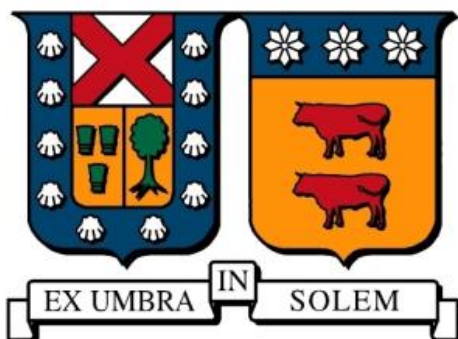


UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA Y AMBIENTAL
VALPARAÍSO - CHILE



**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN
LÓGICA DE CONTROL EXPERTO EN
ESPESADOR DE RELAVES - PLANTA LAS
TÓRTOLAS
(ANGLOAMERICAN SUR S.A. – DIVISIÓN LOS BRONCES)**

PABLO OJEDA VÁSQUEZ

MEMORIA DE TITULACIÓN PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL QUÍMICO

TESIS DE TITULACIÓN PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OPTAR AL GRADO DE MAGISTER EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA QUÍMICA

PROFESOR GUÍA
Dr. LUIS BERGH OLIVARES

PROFESOR CORREFERENTE
Dr. JUAN YANATOS BERNARDINO

INGENIERO CORREFERENTE
MAURICIO MOGLIA PICART

MAYO – 2014

Título de Tesis:

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN LÓGICA DE CONTROL EXPERTO EN ESPESADOR
DE RELAVES - PLANTA LAS TÓRTOLAS**

Autor:

PABLO OJEDA VÁSQUEZ

Trabajo de Tesis como requisito parcial para la obtención del título de Ingeniero Civil Químico y al grado de Magíster en Ciencias de la Ingeniería Química de la Universidad Técnica Federico Santa María.

Dr. Luis Bergh Olivares

Dr. Juan Yianatos Bernardino

Sr. Mauricio Moglia Picart

Valparaíso, Mayo 2014

Agradecimientos

A mis padres por su cariño, el apoyo incondicional durante mi vida y por formar al profesional que hoy día soy. Este logro es también de ellos y de toda mi familia.

Muy especialmente a Natalia, por ser un pilar fundamental en todo mi paso por la Universidad y estar a mi lado en cada desafío adquirido. Sin ella, todo esto no hubiese sido posible.

A todos aquellos amigos que formaron parte de vida universitaria, estuvieron a mi lado apoyándome y entregando consejos. Podría llenar esta hoja con todos aquellos, que me ayudaron y de quienes aprendí día a día.

Al profesor Luis Bergh, por su confianza y apoyo en todo momento, durante el período universitario y el desarrollo de la presente tesis.

Al equipo de la Superintendencia de Control de Procesos de División Los Bronces de AngloAmerican, en especial a Macarena Willer, Luis Torres, Marcelo Adaro y Mauricio Moglia, por todo su apoyo durante el desarrollo del presente trabajo. Además a los equipos de operaciones y mantención, por su constante colaboración.

RESUMEN

Este trabajo presenta el desarrollo e implementación de un sistema de control experto estructurado en reglas lógicas, para mantener el control de la operación de espesamiento de relaves en la Planta “Las Tórtolas” de AngloAmerican. Las reglas han sido diseñadas a partir de las filosofías de operación del personal experto, con el objetivo de lograr un control estable de las variables de interés y la optimización de los indicadores de rendimiento de este espesador de 125 m de diámetro, diseñado para procesar en torno a 13000 m³/h de pulpa.

La importancia en el consumo del recurso hídrico en la industria minera, hace necesario aumentar los esfuerzos en recuperar la mayor cantidad de agua posible desde los procesos de separación sólido-líquido. Adicionalmente, los desafíos futuros de la minería en nuestro país, se focalizan en la reducción de costos, por ejemplo en el consumo de recursos como floculante, y la seguridad para las personas y el medioambiente.

Para cumplir estos objetivos, el sistema experto se estructuró en dos fases. Primero, permite bajo ciertas condiciones tomar el control de la operación, ajustando las variables dentro de una banda de seguridad y luego, utiliza los recursos disponibles para optimizar las condiciones de operación que permitan una mayor recuperación de agua.

La primera fase del encadenamiento de reglas lógicas, revisa las variables de operación con la instrumentación disponible en el espesador de relaves, asociadas al torque de las rastras, presión de la cama de lodos (inventario de sólidos) y nivel de interfase (profundidad de cama).

Mediante el análisis conjunto de estas mediciones, el sistema determina las acciones necesarias para ajustar las variables dentro de un rango seguro, mediante la modificación de los recursos de control disponibles: flujo de descarga y dosificación de floculante. Para ello, el sistema cuenta con flujómetros y válvulas de control en las dos líneas de descarga, y variadores de frecuencia en las bombas de dosificación de floculante.

La segunda fase, ejecuta acciones que permitan optimizar la recuperación de agua, a través de la obtención de porcentajes de sólidos más altos en la descarga, al mismo tiempo que se busca reducir el consumo de floculante y mantener la estabilidad del sistema, en la medida que las condiciones de operación lo permitan. Para ello, la instrumentación del sistema cuenta con medidores de densidad nucleares, que determinan el contenido de sólidos en las líneas de descarga del espesador.

El sistema de control experto que se presenta, logró ser una herramienta poderosa para lograr una operación estable en el espesamiento de relaves pese a las constantes perturbaciones en la alimentación, ejecutando acciones de forma automática en función de la lectura de las variables de proceso disponibles. Junto con ello, consiguió alcanzar mejores indicadores de rendimiento mediante un aumento en el flujo de agua recuperada y una reducción en el consumo de floculante en el espesador.

Durante su operación el sistema experto aumentó la concentración de sólidos de descarga en torno a un 3%, lo que en término de agua recuperada significa alrededor de 6000 m³/día adicionales. Además permitió reducir el consumo de floculante en torno a un 4%, mientras que en términos operacionales, se redujo la varianza en todas las variables del equipo sin presenciar situaciones de riesgo.

Finalmente se presentan oportunidades de mejora que permitirían potenciar los resultados obtenidos por el sistema experto, asociados a su operación u otras condiciones de la planta que optimizarían su desempeño. La exitosa implementación del sistema muestra la posibilidad de replicar la estrategia de control en otros espesadores, mediante un ajuste de acuerdo a las condiciones de operación del nuevo equipo.

ABSTRACT

This work presents the development and implementation of an expert control system structured in logical rules, to maintain under control the operation of tailings thickening of “Las Tórtolas” plant of AngloAmerican. The rules have been designed from the operating philosophies of expert personnel in order to achieve a stable control of the variables of interest and the optimization of performance indicators of this 125 m diameter thickener, designed for processing 13000 m³/h of slurry.

The importance in consumption of water resources in the mining industry, becomes necessary to increase efforts to recover as much water as possible from solid-liquid separation process. Additionally, future challenges of mining in our country are focused on reducing costs, for example in the use of resources as a flocculant, and security for people and environment.

To achieve these objectives, the expert system was structured in two phases. Under certain conditions, first lets take control of the operation, adjusting variables inside a safe band and then use the available resources to optimize the operating conditions allowing to improve water recovery.

The first phase of the chain of logical rules, check the operating variables with instrumentation available in the tailings thickener related to the rake torque, bed pressure (solids inventory) and interface level (depth of bed).

By analyzing all these measurements, the system determines the necessary actions to adjust the variables inside a safe band by modifying the control resources available: underflow rate and flocculant dosage. To do this, the system has flowmeters and control valves in the two underflow lines, and variable frequency drives on pumps flocculant dosage.

The second phase takes action to optimize the water recovery by obtaining higher percentages of solids in the underflow, while the flocculant consumption is reduced and maintain system stability, as operating conditions permit. For this purpose the instrumentation system includes nuclear density gauges that determine the solid content in the underflow lines of thickener.

The expert control system presented is a powerful tool to achieve a stable operation of tailings thickening despite constants disturbances in the feed, performing automatic actions based on the reading of process variables available. It also allowed to improve the performance indicators, by increasing the flow of water recovered and decreased flocculant consumption in the thickener.

During operation, the expert system increased discharge solids concentration about 3%, which in terms of additional recovered water means about 6000 m³/day. It allows to reduce flocculant consumption around 4%, while in operational terms, the variance was reduced in all variables for this equipment without risk.

Finally, opportunities for improvement that would allow enhance results obtained by the expert system, associated with its operation or other plant conditions that would optimize performance are presented. The successful implementation of the system shows the possibility to replicate the control strategy in other thickeners, by adjusting according to the operational conditions of the new equipment.

Contenidos

1 Alcances	1
1.1 Introducción	1
1.2 Identificación del Problema	1
1.3 Objetivos	2
1.4 Estructura de la Tesis	3
2 Antecedentes	4
2.1 Antecedentes Generales	4
2.2 Antecedentes Planta Concentradora “Las Tórtolas 2”	9
2.2.1 Flotación Colectiva	9
2.2.2 Flotación Diferencial (Planta de Moly)	10
2.2.3 Espesamiento y Filtrado Concentrado de Cobre	12
2.2.4 Tratamiento de Relaves	13
2.3 Sistemas Expertos	14
2.3.1 Componentes y Estructura de un Sistema Experto	16
2.3.2 Lenguaje y Plataforma de Programación	20
3 Espesamiento: Conceptos y Tecnologías	23
3.1 Definición de Espesamiento	23
3.2 Espesadores	23
3.3 Componentes de un Espesador	27
3.3.1 Elementos Estructurales	27
3.3.2 Equipos de Instrumentación	32
3.4 Dinámica de Espesamiento	38
3.5 Estado del Arte: Sistemas de Control	40
4 Espesador de Relaves “Las Tórtolas”	46
4.1 Descripción del Sistema	46
4.1.1 Espesamiento de Relaves	46
4.1.2 Planta de Floculante	51
4.2 Identificación de Variables	54

5	Diseño del Sistema de Control Experto	63
5.1	Metodología de Desarrollo del Sistema	63
5.2	Filosofías de Operación	65
5.3	Reglas Lógicas	68
5.4	Parámetros de Control	76
5.5	Tiempos de Control	80
5.6	Activación de Alarmas	85
6	Implementación y Ajuste de la Lógica de Control	87
6.1	Ambiente de Control Espesador de Relaves	87
6.1.1	Diseño Interfaz de Control	87
6.1.2	Lazo de Control de Flujo de Descarga.....	89
6.2	Implementación Sistema Experto	91
6.3	Sintonización de Parámetros y Ajustes.....	95
6.3.1	Sintonización de Tiempos de Control	95
6.3.2	Ajuste Dosis de Floculante	98
7	Análisis de Resultados y Oportunidades.....	100
7.1	Funcionamiento del Sistema Experto	100
7.2	Resultados Globales.....	106
7.2.1	Distribución de Sólidos de Descarga	106
7.2.2	Otras Variables de Operación	108
7.3	Identificación de Oportunidades	111
7.3.1	Recuperación de Agua	111
7.3.2	Situaciones de Bajo Tonelaje en la Alimentación	114
7.3.3	Optimización del Sistema Experto	115
8	Conclusiones y Recomendaciones	118
8.1	Conclusiones.....	118
8.2	Recomendaciones	120
9	Referencias.....	122

ANEXOS DIGITALES (CD ADJUNTO)

La información de anexos debe ser solicitada al profesor guía de la presente tesis, Dr. Luis Bergh Olivares, como administrador de estos recursos. Los anexos digitales incluyen:

ANEXO A Registro Histórico de Variables

ANEXO B Estructura de Programación

ANEXO C P&ID

ANEXO D Tags PI y DCS

ANEXO E Pautas de Mantenimiento

ANEXO F Pantallas Sistema Experto

Índice de Figuras

Figura 2.1 Ubicación Geográfica Operaciones AngloAmerican Sur S.A	4
Figura 2.2 Diagrama General Plantas División Los Bronces.....	5
Figura 2.3 Diagrama General Procesamiento Mineral Sulfuros Los Bronces.....	6
Figura 2.4. Diagrama Esquemático Flotación Colectiva Planta 2.....	9
Figura 2.5 Diagrama Esquemático Planta de Moly.....	11
Figura 2.6 Diagrama Esquemático Espesaje y Filtrado Conc. Molibdeno.....	12
Figura 2.7 Diagrama Esquemático Espesamiento y Filtrado Conc. Cobre.....	13
Figura 2.8 Diagrama Esquemático Espesamiento de Relaves.....	14
Figura 2.9 Etapas del Desarrollo de un Sistema Experto	18
Figura 3.1 Diseño Original del Espesador de Dorr	23
Figura 3.2 Diagrama Interior de un Espesador	24
Figura 3.3 Diagrama Espesador Convencional	25
Figura 3.4 Diagrama Espesador de Alta Capacidad.....	26
Figura 3.5 Elementos Estructurales Básicos de un Espesador	27
Figura 3.6 Estructuras de Soporte Tipo Puente (a) y Tipo Pilar Central (b).....	29
Figura 3.7 Perfil de Concentración de Sólidos en un Espesador	34
Figura 3.8 Interacción de un Haz de Luz con las Partículas	36
Figura 3.9 Efecto de Floculación.....	39
Figura 3.10 Curva Test de Sedimentación.....	40
Figura 3.11 Sistema Básico de Control en Espesadores	41
Figura 3.12 Funciones de Pertenencia en Lógica Difusa.....	42
Figura 4.1 Sistema Espesamiento de Relaves.....	46
Figura 4.2 Planta de Floculante	51
Figura 4.3 P&ID Simplificado Espesador de Relaves	54
Figura 4.4 Medidor de Interfase Milltronics.....	55
Figura 4.5 Medidor de Densidad Descarga Espesador	56
Figura 4.6 P&ID Simplificado Planta Distribución Floculante.....	59
Figura 5.1 Planificación Sistema Experto Espesador de Relaves	63
Figura 5.2 Lógica de Control Sistema Experto.....	69
Figura 5.3 Respuesta de Variables ante Aumento de Flujo de Descarga	71
Figura 5.4 Primera Fase Lógica de Control	73
Figura 5.5 Segunda Fase Lógica de Control.....	75
Figura 5.6 Cambio Disminución Descarga y Aumento Floculante	77
Figura 5.7 Aumento Flujo Descarga por Torque Alto.....	78
Figura 5.8 Aumento Flujo Descarga por P. Cama Alta	78
Figura 5.9 Reducción Flujo Descarga por P. Cama Baja.....	79

Figura 5.10 Salto Escalón 300 m ³ /h Flujo Descarga	82
Figura 5.11 Salto Escalón 200 m ³ /h Flujo Descarga	83
Figura 5.12 Salto Escalón 1 g/ton Dosis Floculante	84
Figura 6.1 Interfaz de Usuario Espesador de Relaves	88
Figura 6.2 Ventanas Control Flujo de Descarga	90
Figura 6.3 Red de Señales Sistema Experto	91
Figura 6.4 Switch Activación Sistema Experto	93
Figura 6.5 Switch Selector Densímetro	93
Figura 6.6 Interfaz de Control Sistema Experto	94
Figura 6.7 Descenso de Nivel Estanque Almacenamiento Floculante	98
Figura 7.1 Operación Experto Caso 1	102
Figura 7.2 Operación Manual Caso 1	102
Figura 7.3 Operación Experto Caso 2	103
Figura 7.4 Operación Manual Caso 2	103
Figura 7.5 Operación Experto Caso 3	104
Figura 7.6 Operación Manual Caso 3	104
Figura 7.7 Operación Experto Caso 4	105
Figura 7.8 Operación Manual Caso 4	105
Figura 7.9 Distribución de Sólidos Sistema Experto	107
Figura 7.10 Distribución de Torque Sistema Experto	109
Figura 7.11 Distribución de Presión de la Cama Sistema Experto	110
Figura 7.12 Recuperación de Agua desde el Overflow	112
Figura 7.13 Oportunidad Piscina Agua Recuperada	113
Figura 7.14 Oportunidad para Bajo Tonelaje de Alimentación	114

Índice de Tablas

Tabla 2.1 Destino y Pureza de Productos AngloAmerican - Unidad Negocios Cobre.....	5
Tabla 4.1 Criterios de Diseño Espesador de Relaves	50
Tabla 4.2 Granulometría Mineral de Alimentación al Espesador	50
Tabla 4.3 Variables de Proceso Espesamiento de Relaves	61
Tabla 5.1 Cuidados Operacionales Espesamiento de Relaves	67
Tabla 5.2 Magnitudes de Acciones de Control	76
Tabla 5.3 Definición de Parámetros Límites Lógica de Control.....	80
Tabla 5.4 Definición de Parámetros de Acción Lógica de Control.....	85
Tabla 6.1 Relación Floculante-Alimentación según Capacidad de Planta	99
Tabla 6.2 Modificación Dosis Máxima de Floculante	99
Tabla 7.1 Definición de Límites Deseables en la Operación	101

1 Alcances

1.1 Introducción

Algunos de los ejes fundamentales en los desafíos futuros de la industria minera a nivel mundial, están asociados al consumo de agua en sus procesos y la seguridad medioambiental de sus faenas. Tanto las nuevas plantas mineras como los proyectos de expansión, requieren necesariamente de mayor disponibilidad de agua cerca de sus operaciones, como asegurar el cuidado del medio que los rodea, para cumplir las normativas ambientales que cada día se vuelven más exigentes.

En el caso particular de la utilización del agua en la industria minera, la actualidad de nuestro país ha demostrado que representa uno de los principales desafíos, en un territorio en que el recurso hídrico es particularmente escaso. De este modo, algunas faenas chilenas están bombeando agua de mar hasta sus instalaciones, incluyendo a AngloAmerican en los próximos meses, haciendo que el agua constituya un recurso costoso.

En ambos sentidos, el espesamiento de relaves tiene una función relevante en lo que refiere a reutilización de agua de proceso y el cuidado del medioambiente en la faena. En el primer caso, el aumento en los requerimientos del recurso hídrico, incentivan a dedicar esfuerzos en optimizar los procesos de recuperación de agua en los procesos de separación sólido-líquido. Mientras que desde el punto de vista ambiental, la disminución de las leyes de mineral en los yacimientos obliga a procesar grandes cantidades de minerales aumentando además los flujos de relaves a disponer. Estos grandes flujos de relaves, requieren de un procesamiento con los máximos estándares de seguridad, ya que un error podría generar un desastre ambiental de proporciones.

Por otra parte, los sistemas expertos basados en reglas han mostrado ser una importante herramienta para la estabilización de variables de operación y la optimización de recursos en la industria minera, donde las condiciones de proceso cambian de forma constante. Además son especialmente ventajosos frente a controles de tipo predictivo basados en modelo, cuando en procesos como éste existe una falta de modelos dinámicos confiables e incertidumbre en algunas mediciones (Bergh & Yianatos, 2011).

1.2 Identificación del Problema

- Hasta el inicio de este trabajo, el sistema de espesamiento de relaves de la planta concentradora “Las Tórtolas” no cuenta con una estrategia de control automática que maneje su operación.

- La creciente importancia del recurso hídrico en los procesos mineros, requiere de la mayor recuperación de agua posible en los procesos separación sólido-líquido.
- La recuperación de agua desde el tranque de relaves si bien es una alternativa, presenta significativas desventajas con respecto a la separación en el espesador de relaves, en términos de costos asociados y pérdidas por evaporación.
- Los lentos tiempos de respuesta de la operación en el espesador de relaves, puede generar situaciones que ponen en riesgo el equipo, la operación de la planta y llegar a provocar un peligro medioambiental.
- Además de los costos asociados al recurso hídrico, el espesamiento de relaves influye en el consumo de floculante, que representa un costo significativo dentro de los insumos utilizados en la planta.

1.3 Objetivos

Objetivo general

Diseñar una lógica de control que permita la implementación de un sistema experto, para operar de forma automática el espesador de relaves de planta “Las Tórtolas”, asegurando el control operacional de las variables disponibles y optimizando los indicadores de la operación.

Objetivos específicos

- Elaborar una secuencia de reglas lógicas para el control operacional del espesador de relaves, basado en las metodologías utilizadas por parte de los operadores, para el diseño de un sistema que replique de forma automática sus mejores decisiones.
- Asegurar que el sistema de control automático, será capaz de mantener las variables de operación del equipo dentro de los márgenes establecidos, logrando una operación más estable y evitando la presencia de situaciones de riesgo.
- Diseñar un mecanismo de razonamiento que junto con controlar la operación, sea capaz de optimizar los principales indicadores de rendimiento en la operación: porcentaje de sólidos en la descarga y consumo de floculante utilizado.
- Implementar y sintonizar el sistema experto con las herramientas computacionales disponibles en la planta, para que pueda tomar control de la operación de espesamiento de relaves y ejecutar de forma automática las acciones que sean necesarias para estabilizar las variables de proceso.
- Realizar una evaluación preliminar de los resultados obtenidos por el sistema experto en comparación con la operación manual previa.

1.4 Estructura de la Tesis

El presente trabajo de tesis, se compone de 8 capítulos ordenados de acuerdo al detalle que se explica a continuación.

- Capítulo 1. Alcances: Se establecen los objetivos y la estructura de la presente tesis en base a la identificación del problema que da origen a este proyecto.
- Capítulo 2. Antecedentes: Se contextualiza la información respecto a la operación “Los Bronces” de AngloAmerican y su planta de espesamiento de relaves. Adicionalmente se entrega información general respecto de los componentes y la programación de un sistema experto.
- Capítulo 3. Espesamiento, conceptos y tecnologías: El capítulo detalla en profundidad los conceptos asociados a los procesos de espesamiento, las características de sus equipos, la fenomenología de la operación y el estado del arte de los sistemas de control para estos procesos.
- Capítulo 4. Espesador de Relaves “Las Tórtolas”: Se realiza una descripción completa del espesador de relaves de la planta concentradora, detallando cada una de las variables involucradas.
- Capítulo 5. Diseño del Sistema de Control Experto: Se muestra el procedimiento de elaboración de la lógica de control, identificando las filosofías de operación, las reglas lógicas de razonamiento y los parámetros asociados al control.
- Capítulo 6. Implementación y ajuste de la Lógica de Control: Se analiza en detalle los mecanismos de implementación del sistema en la operación y los ajustes realizados de acuerdo a las primeras observaciones.
- Capítulo 7. Análisis de Resultados y Oportunidades: Se estudian las respuestas ejecutadas por el sistema experto durante su operación y los resultados generales obtenidos para los parámetros de interés. Además se realiza un reconocimiento de las oportunidades de mejora o desarrollo, sobre el mismo sistema experto o en las condiciones de operación.
- Capítulo 8. Conclusiones y Recomendaciones: Se resumen las conclusiones obtenidas tras la operación con el sistema de control experto y se presentan recomendaciones que permitan mejorar los resultados obtenidos o lineamientos de investigación que se pueden desarrollar a futuro en base a este trabajo.

2 Antecedentes

2.1 Antecedentes Generales

AngloAmerican plc es un grupo minero, cuya casa matriz se ubica en Londres, Reino Unido. La compañía cuenta con operaciones en Chile, Brasil, Canadá, Estados Unidos, Perú, Sudáfrica y Australia, entre otros países.

Sus unidades de negocios incluyen Platino, Diamantes, Cobre, Níquel, Hierro, Carbón y otros activos mineros e industriales. En el caso de la unidad de negocios Cobre, la producción incluye cátodos de cobre, ánodos y blíster, concentrados de cobre, molibdeno y ácido sulfúrico.

La casa matriz de la unidad de negocios Cobre, se encuentra ubicada en Santiago, teniendo operaciones a lo largo de Chile que se organizan sobre la base de 2 sociedades anónimas cerradas: AngloAmerican Norte S.A. propietaria de las operaciones Mantos Blancos y Mantoverde; y AngloAmerican Sur S.A. propietaria de las operaciones Los Bronces, El Soldado y Chagres; además de poseer la propiedad del 44% de Collahuasi (AngloAmerican, 2012).

En particular, la División Los Bronces se encuentra ubicada en la Región Metropolitana a 65 kilómetros al este de Santiago (véase Figura 2.1). Esta mina a rajo abierto se ubica en la Cordillera de Los Andes, a 3500 metros sobre el nivel del mar, donde se ubican además del proceso extractivo, la Plantas de Chancado, Molienda y Cátodos (San Francisco). Por su parte, la Planta Concentradora “Las Tórtolas” de esta misma División se ubica en la comuna de Colina al norte de Santiago, distante a 60 kilómetros y 2800 metros más bajo con respecto a la mina.



Figura 2.1 Ubicación Geográfica Operaciones AngloAmerican Sur S.A (AngloAmerican, 2013.a)

Como se observa en la Figura 2.2, División Los Bronces cuenta además con las Plantas de Molienda “Confluencia” y Concentradora “Las Tórtolas 2” que forman parte del Proyecto Desarrollo Los Bronces, puesto en marcha el 2011.



Figura 2.2 Diagrama General Plantas División Los Bronces (AngloAmerican, 2013.a)

La producción total de la unidad de negocios Cobre durante el año 2012 fue de 659.700 toneladas, siendo obtenidas en gran proporción por la División Los Bronces, que alcanzó las 365.300 toneladas. Esta producción total de 2012, incluye 150.367 toneladas de cátodos, 506.831 toneladas de cobre contenido en concentrado y 2.502 toneladas de sulfato de cobre (AngloAmerican, 2012). Las características de los productos elaborados por esta unidad de negocios se detallan en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1 Destino y Pureza de Productos AngloAmerican - Unidad Negocios Cobre (AngloAmerican, 2013.b)

Producto	Pureza	Destino
Concentrado de Cobre	28 -32 % Cu	Fundición
Ánodos de Cobre	99,5 % Cu	Refinería
Cátodos de Cobre	99,999 % Cu	Molinos de Barra de Bronce
Concentrado de Molibdeno	48 – 50 % Cu	Tostadores de Molibdeno

De un total de 13.145 empleados en la unidad de negocios Cobre al 31 de Diciembre de 2012, más de 5.000 personas ejercen sus labores en la División Los Bronces, ya sea como personal propio, contratistas en operaciones o contratistas en proyectos (AngloAmerican, 2012).

Las principales actividades productivas de la División Los Bronces de AngloAmerican, vinculadas al procesamiento de mineral de sulfuros (véase Figura 2.3), se detallan a continuación:

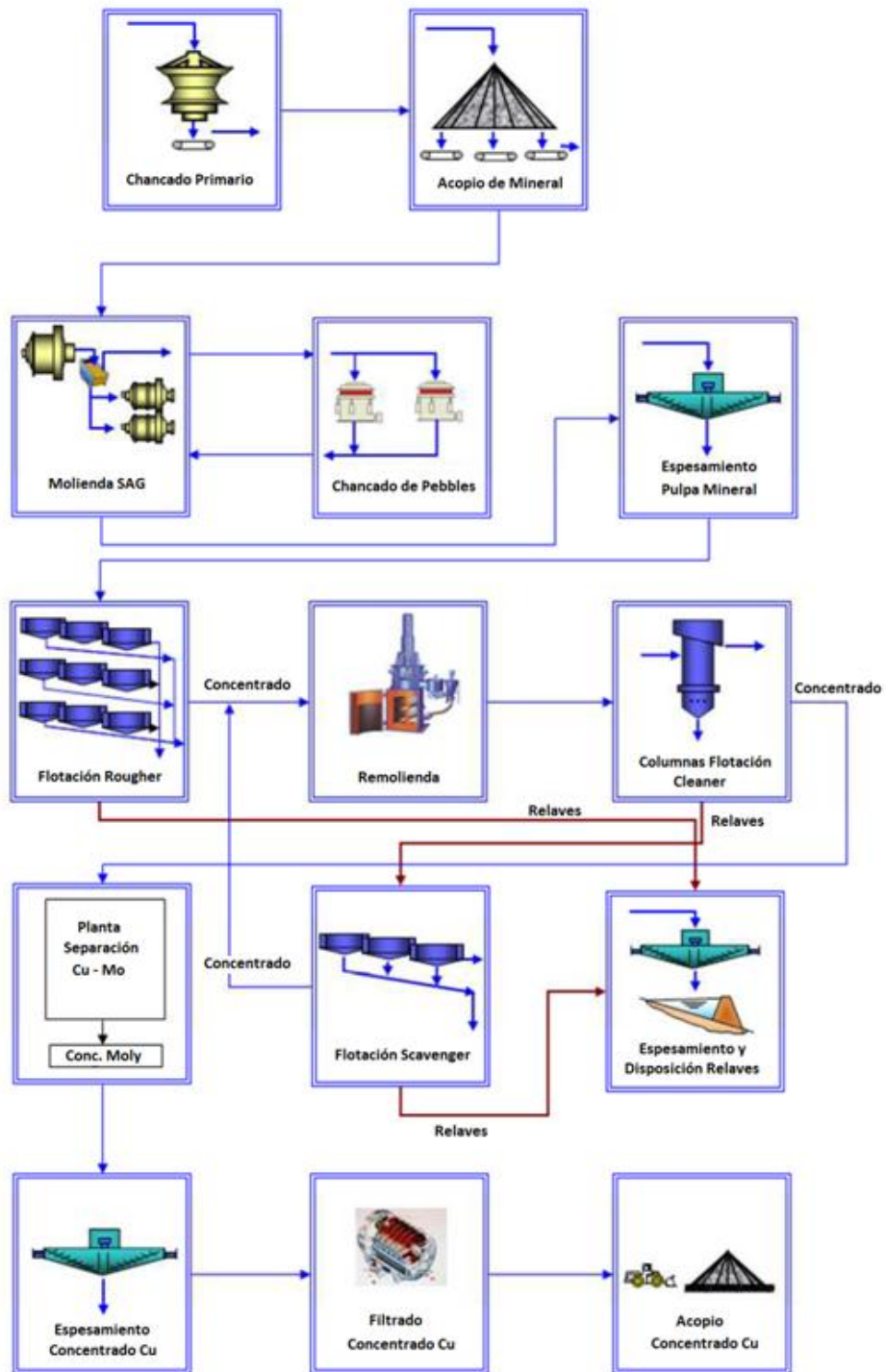


Figura 2.3 Diagrama General Procesamiento Mineral Sulfuros Los Bronces (Bechtel Chile, 2007)

Extracción de mineral y lastre en la Mina

El yacimiento de la División se explota bajo un esquema de rajo abierto convencional, cuya operación se inicia con la preparación y ejecución de tronaduras, que desprenden el material estéril (lastre) y la roca con mineral. Este material que se remueve es transportado en camiones hacia los depósitos de lastre y el chancador primario, respectivamente.

Disposición de lastre en los depósitos

El lastre, que contiene bajo o nulo contenido de cobre, se dispone en los depósitos ubicados para este efecto en los sectores de San Francisco y Donoso. Ocasionalmente pueden usarse otros depósitos de lastre menores, todos mediante el volteo de tolva de los camiones mineros.

Chancado de mineral

Por su parte la roca con mineral extraída se transporta hacia los chancadores primarios, ubicados entre la mina y las plantas de Molienda. Las descargas de ambos Chancadores llegan a una Torre de Transferencia, donde se realiza la distribución del mineral que se envía, por medio de correas transportadoras, hacia los acopios de mineral grueso en las plantas de Molienda en Los Bronces y Confluencia.

Molienda de mineral

El mineral que proviene desde el acopio de mineral grueso de cada planta, ingresa a un circuito de Molienda formado por Molinos SAG, de bolas y Chancado de Pebbles, cuyo objetivo es reducir el tamaño del material y formar una pulpa de mineral con la adición de agua de proceso.

El circuito inicia en el molino SAG, cuya descarga alimenta a un harnero, que a su vez clasifica las partículas por tamaño. El producto grueso, se envía a la planta de chancado de Pebbles y luego se recircula al proceso. Por su parte el producto fino del SAG, se envía a la molienda secundaria (molinos de bolas) que operan en circuito cerrado con baterías de ciclones. A su vez el producto de los ciclones, se envía a harneros utilizados como medida de protección del sistema de Transporte de Pulpa hacia las plantas concentradoras.

Espesamiento de Mineral

La pulpa de mineral que se obtiene en las Plantas de Molienda, se envía a estanques espesadores ubicados también en Los Bronces y Confluencia, donde se les extrae agua para alcanzar la densidad requerida para el transporte hidráulico hasta las plantas concentradoras.

Transporte de Pulpa hacia plantas concentradoras

Después de ser espesada la pulpa de mineral en las plantas de Los Bronces y Confluencia, se envía a través de un mineroducto cerrado de acero hacia las Plantas 1 y 2 de Las Tórtolas respectivamente, por tuberías independientes. Dada la diferencia de cotas entre las plantas de Molienda y las Concentradoras (superior a 2000 metros en ambos casos), no se requiere de energía externa, necesitando incluso de estaciones disipadoras de energía para controlar la presión y la velocidad de la pulpa.

Procesamiento de minerales sulfurados por Flotación

En las plantas concentradoras de Las Tórtolas, la pulpa transportada se procesa en una planta de flotación colectiva, cuyo producto es un concentrado de cobre y molibdeno. Este a su vez, se envía a una planta de flotación selectiva, donde se separan los concentrados, que luego se proceden a espesar, filtrar, secar y envasar en el caso del concentrado de Molibdeno, mientras que el concentrado de Cobre se somete a espesamiento, filtrado y almacenamiento en acopios para su posterior transporte.

En el área de Las Tórtolas, se cuenta con dos plantas concentradoras independientes: La primera, procesa la pulpa de mineral enviada desde molienda Los Bronces, y la segunda procesa el mineral desde molienda en Confluencia.

Disposición de relaves en tranque Las Tórtolas

Por su parte los relaves generados en las plantas concentradoras son transportados al Tranque de relaves ubicado al norte de la Planta desde donde se recupera agua para su reutilización en el proceso mediante sistemas de bombeo. En el caso particular de la Planta 2 se cuenta con un espesador de relaves que previamente a su envío al Tranque recupera agua desde estos relaves.

2.2 Antecedentes Planta Concentradora “Las Tórtolas 2”

La Planta 2 de Las Tórtolas recibe la pulpa de mineral desde la Molienda en el sector de Confluencia. La planta concentradora perteneciente al Proyecto Desarrollo Los Bronces, incluye las áreas operacionales de Flotación Colectiva, Flotación Diferencial (Planta de Moly), Espesaje y Filtrado Concentrado de Cobre, y Espesamiento de Relaves.

Desde el mineroducto la descarga se realiza directamente en el cajón de recepción, que permite alimentar al circuito de flotación durante la operación normal o desviar parcial o totalmente el caudal hacia una piscina de emergencia, mediante el accionamiento de las válvulas de tapón. Junto a la piscina de emergencia del mineroducto de aproximadamente 25000 m³ de capacidad, se cuenta con otra más pequeña para el manejo de derrames en el área de flotación (Bechtel Chile, 2008).

2.2.1 Flotación Colectiva

El circuito de Flotación Colectiva de Cobre y Molibdeno, se inicia con la recepción del mineral que descarga el mineroducto, culminando con el envío del concentrado colectivo a un Espesador Mixto y de los relaves a espesaje. En este circuito (véase Figura 2.4) se incluyen las siguientes operaciones unitarias: Flotación Primaria, Remolienda, Flotación de Limpieza y Flotación de Barrido.

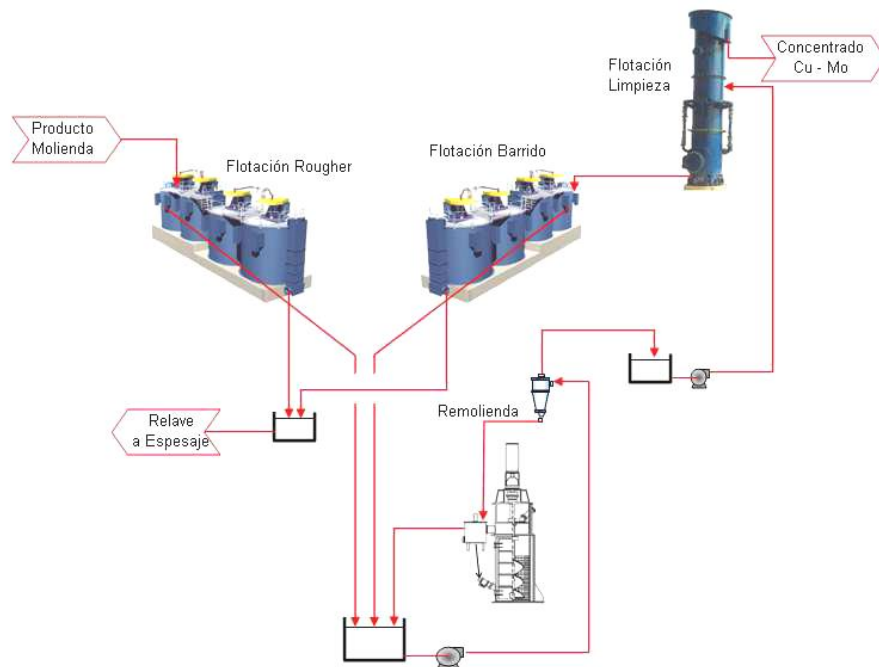


Figura 2.4. Diagrama Esquemático Flotación Colectiva Planta 2 (Bechtel Chile, 2008)

La pulpa ingresa a la Flotación Primaria o Rougher que se realiza en tres líneas de 7 celdas, con capacidad de 257 m³ de capacidad cada una. Su concentrado pasa a un circuito de remolienda, compuesto de dos baterías de 14 ciclones y tres molinos verticales de 1120 kW.

Luego de ello, en el circuito de limpieza se cuenta con 4 celdas tipo columnas de 20 m² de área y 14 m de alto, para finalmente pasar a una etapa de Flotación de Barrido o Scavenger en una línea de 7 celdas de 257 m³ de capacidad (Bechtel Chile, 2007).

Para la operación de esta área de Flotación Colectiva, la Planta cuenta además con instalaciones destinadas a la preparación, almacenamiento y dosificación de reactivos necesarios para la flotación de los minerales de interés: Colector principal, Colector secundario, Diesel, Espumante, además de un sistema para almacenamiento y distribución de lechada de Cal.

Para el caso de aquellos reactivos que se reciben de forma líquida, se dispone de un estanque de almacenamiento y un estanque diario de dosificación, pudiendo ser provistos en camiones aljibe, en el caso del diesel y el espumante, o en tambores en caso del colector principal. Por su parte el colector secundario, se provee en forma sólida, por lo que requiere adicionalmente de un estanque de preparación.

La dosificación de los reactivos en los puntos de consumo respectivo, se realiza en función de razones con respecto al tonelaje que ingresa a la Planta, excepto en el caso de la lechada de Cal, que se adiciona para regular el pH.

2.2.2 Flotación Diferencial (Planta de Moly)

La denominada Planta de Moly, es aquella que procesa el concentrado producido en el área de Flotación Colectiva, llevando a cabo una Flotación Diferencial, puesto que genera dos productos: concentrado de molibdeno seco envasado y una pulpa de concentrado de cobre que se transporta hacia un Espesador de Cobre para su tratamiento.

En este circuito de Flotación Diferencial (véase Figura 2.5), se llevan a cabo las siguientes operaciones unitarias: espesamiento del concentrado Cu-Mo, acondicionamiento, Flotación selectiva de Mo, espesamiento de concentrado de Mo, filtrado y embasado de concentrado de Mo.

En este circuito, así como varios otros en la planta, se usa agua fresca (AF) y agua de proceso (AP). La diferencia entre ellas, es que la primera corresponde a agua no reciclada obtenida desde fuentes de abastecimiento naturales como pozos o embalses, mientras que el

agua de proceso, es aquella cuya calidad no es potable y cumple normas de uso industrial, siendo generalmente recirculada desde otros procesos.

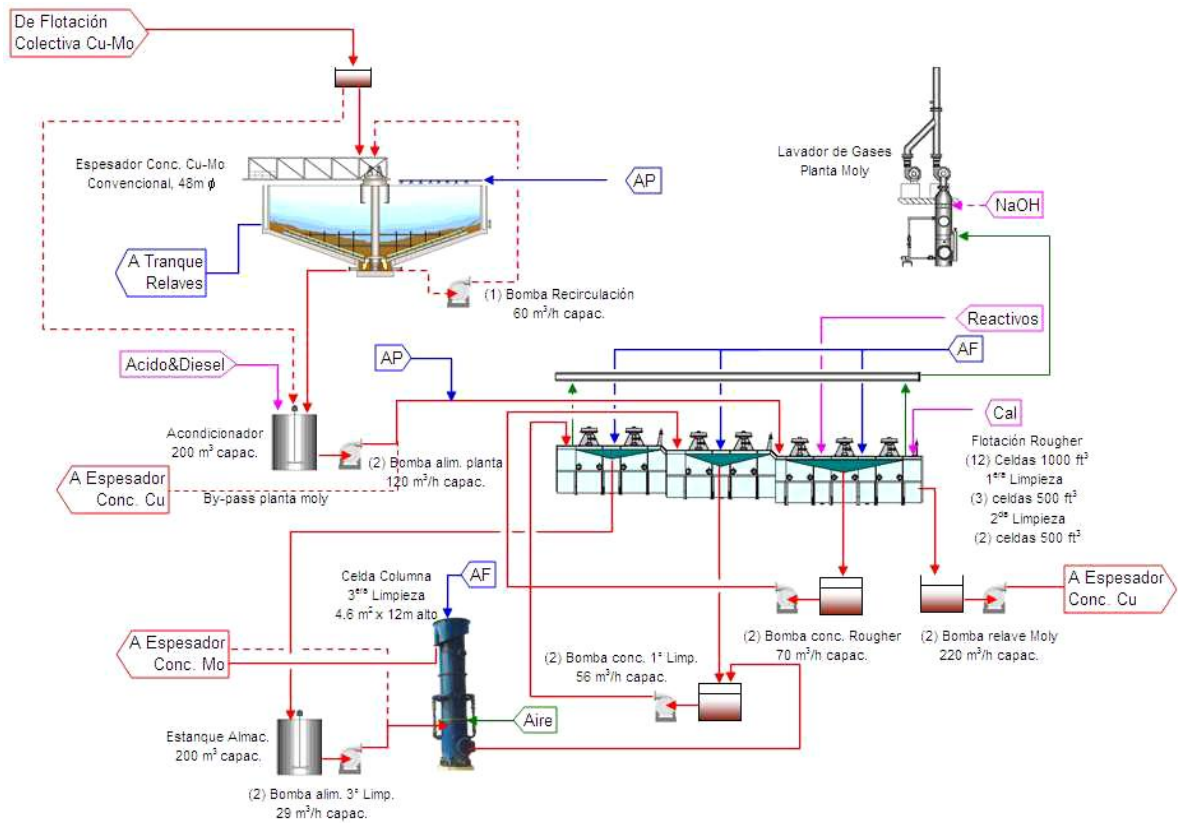


Figura 2.5 Diagrama Esquemático Planta de Moly (Bechtel Chile, 2008)

El concentrado que se recibe desde la Planta de Flotación Colectiva, es espesado en un equipo convencional de 48 m de diámetro denominado Espesador Mixto. La descarga de este espesador, se envía a un estanque acondicionador donde se adiciona Ácido Sulfúrico y Diesel.

Posterior a ello, el circuito de flotación selectiva propiamente tal, considera una etapa Rougher, dos de limpieza en celdas convencionales y una tercera limpieza en columnas. Aquellas celdas donde se realiza la flotación, son de tipo encapsuladas, ya que dado su pH de operación y la adición de NaHS como depresor de Cobre, se genera gas sulfhídrico altamente peligroso, siendo necesaria la presencia de un sistema lavador de gases.

Desde la tercera etapa de limpieza, se obtiene un concentrado de Molibdeno que alimenta de forma gravitacional al Espesador de Moly de 12 m de diámetro, cuya descarga alimenta a su vez a tres estanques agitados (véase Figura 2.6). Estos estanque encargados de alimentar al

filtro, funcionan en tres etapas, considerando uno en carga, otro en alimentación al circuito de filtrado y el último en muestreo. En el caso eventual, que la ley de concentrado de Molibdeno sea inferior a la requerida, existe la posibilidad de recircular hacia la tercera etapa de limpieza para el retratamiento del mineral.

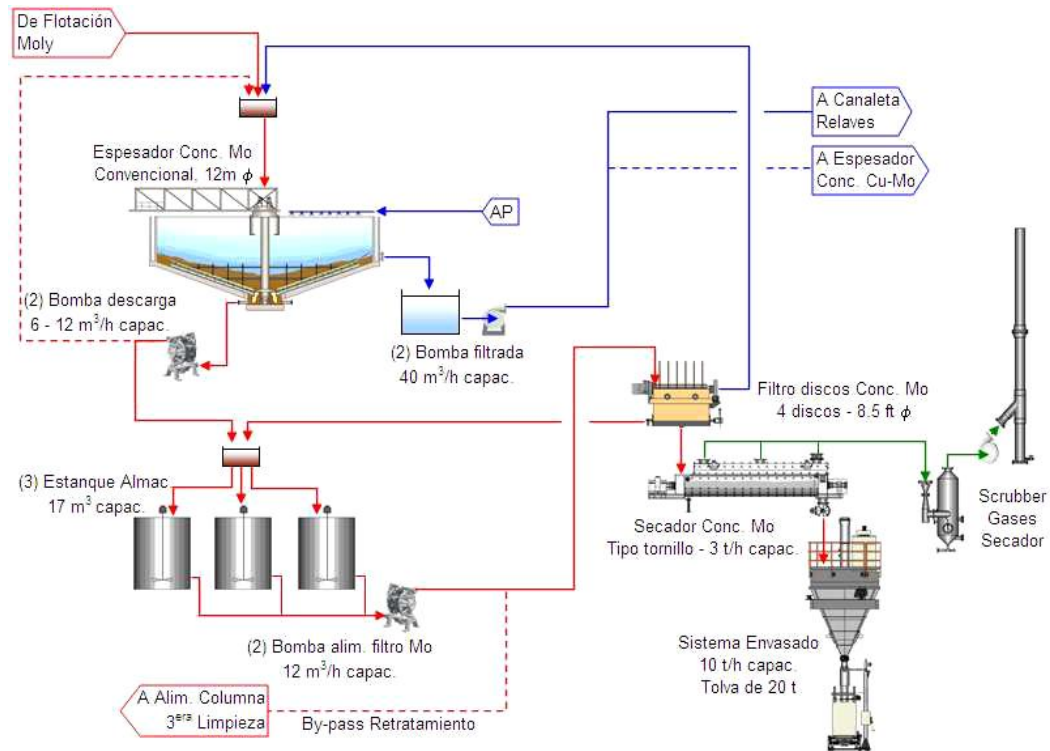


Figura 2.6 Diagrama Esquemático Espesaje y Filtrado Conc. Molibdeno (Bechtel Chile, 2008)

En el filtro de discos del concentrado de Molibdeno, se reduce la humedad del concentrado hasta un 15 a 18%, el que se envía a un secador que funciona mediante circulación de aceite caliente, obteniendo un producto con humedad 3-4 %. Este concentrado seco, alimenta una tolva de 20 toneladas de capacidad, que descarga mediante un cono vibratorio sobre la máquina encargada del envasado de sacos.

2.2.3 Espesamiento y Filtrado Concentrado de Cobre

La pulpa de concentrado de cobre, correspondiente al relave del proceso de flotación selectiva, ingresa a un espesador convencional de 48 m de diámetro, cuya descarga alimenta mediante bombas, a dos filtros hiperbáricos (véase Figura 2.7).

Los filtros hiperbáricos de discos, poseen un área filtrante total de 120 m² cada uno, con capacidad de filtrar aproximadamente 132 toneladas diarias, obteniéndose un concentrado seco de 9-10 % de humedad residual (Bechtel Chile, 2007).

El concentrado seco, se envía mediante correas hacia un acopio cerrado, dividido en seis módulos, que permite la sectorización de concentrados según su calidad. En el mismo acopio se cuenta además, con la estación de carga de camiones, con romana de pesaje y estaciones de lavado de ruedas para la entrada y salida.

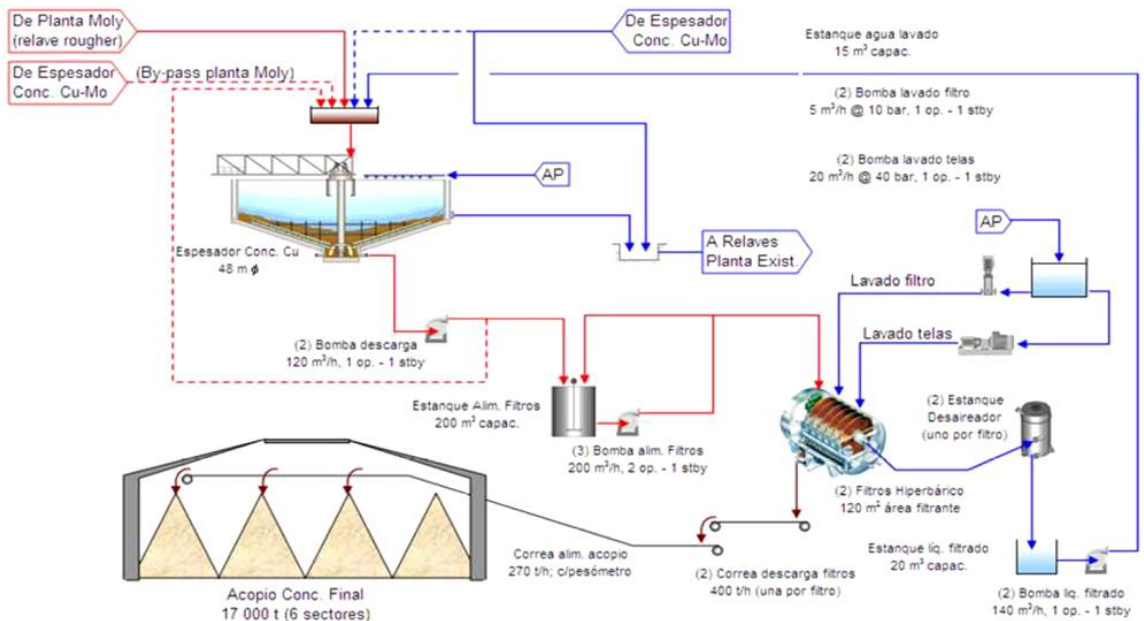


Figura 2.7 Diagrama Esquemático Espesamiento y Filtrado Conc. Cobre (Bechtel Chile, 2008)

2.2.4 Tratamiento de Relaves

En la etapa de flotación colectiva, en particular desde las líneas Rougher y Scavenger, se generan relaves que se envían a espesamiento, con el objetivo de recuperar agua de proceso para su reutilización en el mismo. Para ello, se suministra floculante al espesador, con el objetivo de optimizar su operación y alcanzar una densidad óptima.

El espesamiento de relaves considera una operación continua, en un espesador de alta eficiencia (véase Figura 2.8). El área de espesamiento, comienza con un cajón de alimentación, que recibe los relaves y los dirige hacia el espesador durante la operación normal, o eventualmente desvía el flujo sin espesar al Tranque de la Planta.

Desde el espesador de relaves, la descarga se realiza por efecto de gravedad a través de 2 líneas principales, hacia un cajón que conecta con una canaleta de transporte gravitacional hasta la estación de bombeo, que finalmente deposita los relaves en el tranque.

Por su parte el agua recuperada en el espesador, se acumula en una piscina desde donde se impulsa con bombas de turbina, hacia los estanques de agua de proceso de la Planta.

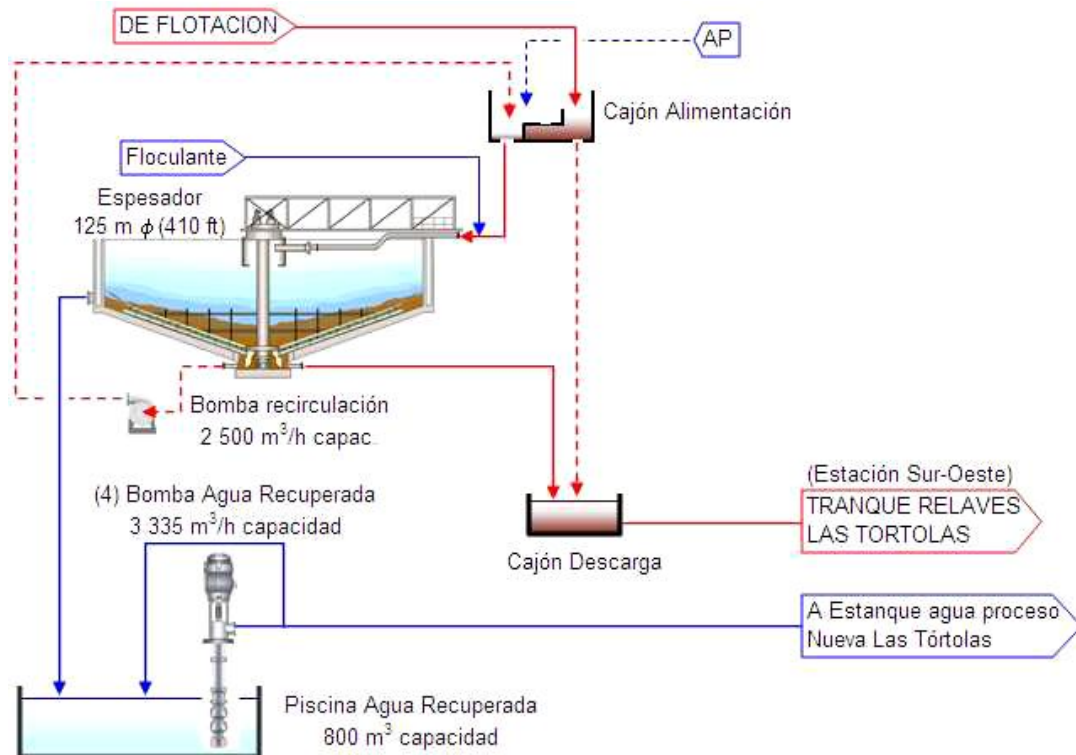


Figura 2.8 Diagrama Esquemático Espesamiento de Relaves (Bechtel Chile, 2008)

2.3 Sistemas Expertos

Los sistemas expertos son parte importante de un amplio campo de investigación, conocido como Inteligencia Artificial. Este campo investigativo, que lleva ya varias décadas de desarrollo, comprende conceptos y metodologías de inferencia que buscan reproducir a través de máquinas computacionales, razonamientos y resoluciones de problemas que en la antigüedad se creían de exclusiva capacidad humana.

Al respecto, una de las primeras definiciones de Inteligencia Artificial, la explicaba como “la parte de la ciencia relacionada con el diseño de sistemas computacionales inteligente, es decir, sistemas que exhiben las características que nosotros asociamos a la inteligencia en el comportamiento humano – comprensión del lenguaje, aprendizaje, razonamiento, resolución de problemas, etc.”(Barr & Feigenbaum, 1981).

En este contexto, la Inteligencia Artificial estudia los diversos métodos existentes para construir sistemas que sean capaces de razonar acerca de problemas y tener la capacidad de entregar una solución, que pueden abarcar temáticas muy distintas, tales como juegos automáticos, control de procesos, reconocimiento de voz, robótica, etc. Cuando estos sistemas, logran solucionar problemas u obtener soluciones basadas en el conocimiento de personas expertas en algún área específica, entonces se habla de Sistemas Basados en Conocimiento o Sistemas Expertos.

En efecto, algunas fuentes lo describen como “un sistema informático que simula a los expertos humanos en un área de especialización dada” (Castillo, et al., 1997). De esta forma, un sistema experto debe basar su operación en la experiencia que ha desarrollado un especialista en determinada área. Se asume que el experto tiene habilidades o conocimientos especiales con respecto al común de las personas, identificando problemas y encontrando soluciones de una manera rápida y eficiente.

Los conocimientos de este tipo de sistema, pueden ser adquiridos por consulta directa con los especialistas o por medio de investigación en libros o revistas, tratándose así de Sistemas Expertos o Sistemas Basados en Conocimiento respectivamente. Pese a esta sutil diferencia, se tienden a denominar Sistemas Expertos independientemente de la fuente de conocimiento.

Por otra parte la naturaleza de los problemas que trata un sistema experto, puede ser variada, dando lugar a dos tipos de sistemas: deterministas y estocásticos. La diferencia es que los problemas de tipo determinista, a diferencia de los segundos, no involucran razonamientos basados en la teoría de probabilidad, para determinar el estado futuro de un sistema o alguna conclusión. Los análisis deterministas producen una misma respuesta para una determinada condición inicial, descartando la existencia de alguna clase de incertidumbre o fenómenos del azar involucrado.

Dada la certeza en sus razonamientos de análisis, los sistemas expertos de tipo determinista pueden ser estructurados utilizando reglas o un conjunto de ellas, que relacionen objetos o parámetros definidos. Estos sistemas expertos que tratan problemas deterministas, son denominados comúnmente como “sistemas basados en reglas”, utilizando los principios de la lógica como mecanismo de razonamiento.

En aquellos casos en que el conocimiento puede ser parcialmente incierto, se habla de problemas estocásticos o razonamiento con incertidumbre. Esta incertidumbre puede estar asociada tanto las reglas como las condiciones iniciales, por lo que se hace necesaria la aplicación de un “peso” o factor de confiabilidad. En estos casos, se aplican principios asociados a la probabilidad como mecanismo de razonamiento, además de la aplicación de algunos factores que permitan tratar la incertidumbre. Uno de los métodos utilizados para esta clase de problemas, son los sistemas de lógica difusa.

Los sistemas son “básicamente”, deterministas o estocásticos, ya que en el caso de los segundos pueden contener algunos razonamientos deterministas, y a su vez, estos problemas podrían tener algún grado de incertidumbre, que pueda de todas formas ser razonado en forma de reglas lógicas.

Independiente del tipo de problema a tratar y el razonamiento que se utilice para resolverlo, los sistemas expertos generan una serie de beneficios, asociado principalmente a algunas ventajas de la máquina por sobre el hombre. Entre ellos, la confiabilidad en la toma de decisiones ya que los sistemas no sufren desgastes como cansancio o agotamiento; la permanencia en el tiempo, que a diferencia de un especialista puede retirarse o morir; la experiencia múltiple, asociada a que el conocimiento de varios especialistas puede combinarse en un solo sistema; respuestas más rápidas ante situaciones que así lo ameriten; o la posibilidad de que personas con menor experiencia puedan operar con el sistema.

Todo lo anterior, sin dejar de lado la importancia del recurso humano en cualquier área de especialización, considerando que los sistemas “expertos” se denominan así precisamente por estar basado en el conocimiento de especialistas, y porque además, en ocasiones pudiese requerirse de la participación de un experto según sea la aplicación.

2.3.1 Componentes y Estructura de un Sistema Experto

Cada uno de los sistemas expertos, está conformado por dos partes principales: el origen de la información conocido como la “base del conocimiento”; y el razonamiento conocido como “motor de inferencia”. Adicionalmente, existen otros sub componentes que se encuentran asociados a los dos anteriores, y que en su conjunto dan lugar a una estructura para diseñar un sistema experto.

Para entender la base del conocimiento, es importante diferenciar los conceptos de datos y conocimiento propiamente tal. Los datos son la información concreta que se puede rescatar desde una aplicación en particular, mientras que el conocimiento corresponde a aquellas afirmaciones o procedimientos que permite conectar y procesar los datos disponibles. De este

modo, la base del conocimiento de los sistemas expertos, está formada por información efectiva y heurística. La primera corresponde a métodos y procedimientos estándar o asociadas al área, que se encuentran disponibles en diferentes fuentes bibliográficas (libros, manuales, etc.). Por su parte, los conocimientos heurísticos, son aquellos relacionados a la experiencia, las prácticas y juicios que se obtienen en un determinado tiempo de especialización. Este tipo de conocimiento, es difícil de encontrar en fuentes bibliográficas y generalmente se transmite persona a persona.

Tanto los datos como el conocimiento, deben ser procesados por algún método que permita la obtención de conclusiones a partir de ellos. Estos métodos utilizados por los sistemas expertos, son denominados “motor de inferencia”, siendo los encargados de utilizar y manipular el conocimiento estructurando una línea de razonamiento. En otros términos, representa el procedimiento interno del sistema experto para poder tomar una decisión, a partir de la información disponible en ese instante y del conocimiento adquirido en su etapa de elaboración.

Recopilando una base de conocimiento y determinando el motor de inferencia, ya es posible establecer un bosquejo general, al momento de diseñar un sistema experto, pero además deben considerarse algunos componentes adicionales. Uno de ellos corresponde al factor humano, entendiéndose que además de basarse en expertos humanos y ser diseñado por ingenieros, un sistema experto debe estar pensado en la interacción que pueda tener con el usuario final. Es por ello que será fundamental, la capacidad de hacer un correcto uso y traducción de los lenguajes, utilizados por los expertos, la máquina y finalmente el usuario. En este mismo sentido, la interfaz que relacione al usuario con el sistema experto, deberá tener la capacidad de obtener y entregar información de una forma detallada y comprensible.

Por otra parte debe tenerse presente, que una de las características de los sistemas expertos, debe ser su permanencia en el tiempo. Es por ello, que su método de razonamiento debe ser explícito y conocido, con el objetivo de poder ser ajustado o modificado en el futuro, conforme se adquieran nuevos conocimientos en el área o se deba modificar algunos procedimientos debido a factores externos. Estas intervenciones en el diseño original de un sistema, se conocen como “Adquisición de Conocimiento”.

Otro componente importante que forma parte de un sistema experto, es el denominado “Control de Coherencia”. Este control inserto en la programación de un sistema experto, debe ser capaz de reconocer posibles inconsistencias en los datos o en el conocimiento, que pudiesen dar lugar a resultados insatisfactorios. El sistema debe evitar de este modo, la

incorporación de conocimiento contradictorio en la interacción con el usuario, pudiendo resultar en la obtención de conclusiones erróneas o acciones contraproducentes.

Finalmente, otra componente importante de un sistema experto, es aquella que permitirá realizar determinadas acciones a partir de las conclusiones obtenidas. Se conoce comúnmente como “Subsistema de Ejecución de Órdenes” y corresponde al mecanismo que se utiliza, para transformar los resultados obtenidos en acciones concretas, dependiendo del área de utilización del sistema.

Con los componentes descritos anteriormente, es posible desarrollar un sistema experto, basándose en las siguientes etapas propuestas en el año 1984 por Weiss y Kulikowsy (Castillo, et al., 1997).

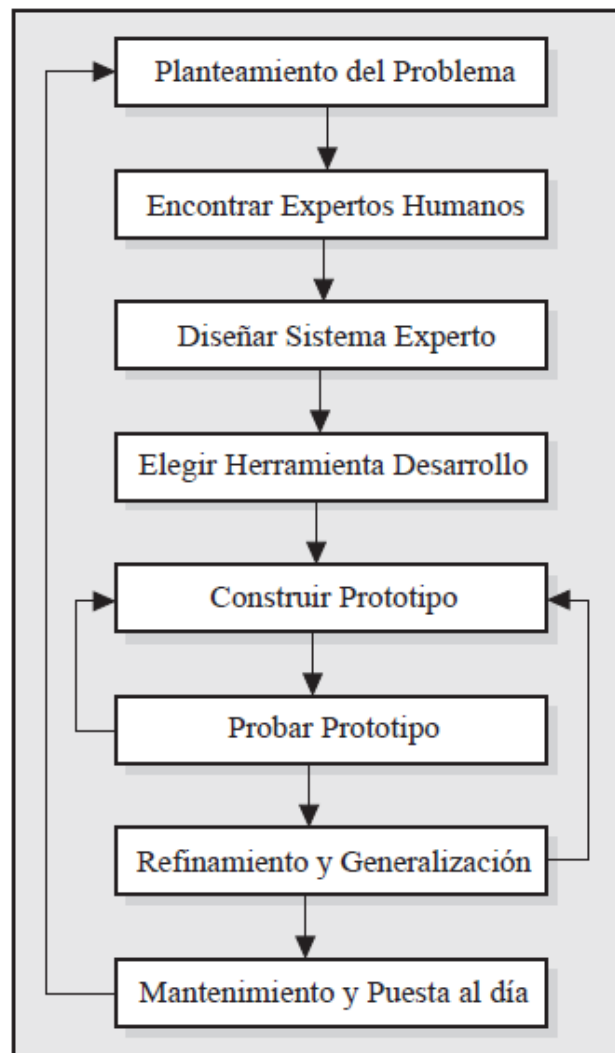


Figura 2.9 Etapas del Desarrollo de un Sistema Experto (Castillo, et al., 1997)

La primera etapa, significa el reconocimiento de la situación que da lugar a un problema, y cuyas soluciones se buscan resolver a través del sistema experto, además de establecer los objetivos que deberán lograrse con su puesta en operación. Esta etapa debe contextualizar la situación, definiendo todas aquellas variables que serán involucradas en el diseño e implementación del sistema.

La segunda etapa, es aquella que debe definir la “base del conocimiento” explicada anteriormente. Esta definición selecciona al personal especialista del área, que entregará el conocimiento efectivo y heurístico que da lugar a la estructuración del sistema experto. Esta fase además, contrasta y combina la información entregada por varios expertos, para luego poder establecer el motor de inferencia definitivo con que se determinarán las conclusiones.

La tercera etapa, correspondiente al diseño propiamente tal del sistema, es aquella en la que se debe dedicar el mayor cuidado, ya que debe combinar todos los elementos definidos anteriormente, de modo de asegurar la determinación correcta de conclusiones según los datos que reciba el sistema. Adicionalmente, es la última etapa en que los costos asociados a cualquier modificación son mínimos, en comparación a errores posteriores que pudiesen estar asociados a un mal diseño. Esta fase, debe entonces combinar el conocimiento, establecer el motor de razonamiento, definir las soluciones y modelar el Subsistema de Ejecución de Órdenes.

La siguiente etapa, es aquella donde se selecciona la herramienta utilizada para el desarrollo del sistema experto diseñado. La selección de esta herramienta se refiere a definir la forma de programación del sistema, dependiendo de las alternativas disponibles y los costos asociados a cada una. De este modo, se elige un lenguaje y una plataforma de programación, que tenga la capacidad de reproducir el motor de inferencia, pudiendo aprovechar algunas herramientas computacionales ya existentes en el área de aplicación.

Las etapas de construcción y prueba de un prototipo, forman un ciclo que se puede repetir en varias oportunidades, con el objetivo de asegurar preliminarmente que el sistema cumple con lo que se requiere. Generalmente la etapa de pruebas de un prototipo, está asociada a revisar la correcta programación del sistema, aunque también puede dar lugar a la identificación de situaciones que no han sido consideradas en el diseño y que deben corregirse antes de su puesta en marcha. Sólo una vez que el prototipo responda correctamente a todas las situaciones posibles, puede continuarse con las siguientes etapas del desarrollo.

La fase denominada Refinamiento y Generalización, es aquella donde se llevan a cabo las primeras pruebas del funcionamiento del sistema experto en la aplicación real. Estas pruebas deben lograr identificar posibles errores del diseño original, para poder modificarlos

oportunamente. Además contempla la corrección de variables o parámetros, en aquellas aplicaciones que requieran un ajuste fino durante la puesta en marcha.

Finalmente, la etapa de Mantenimiento y Puesta al día, corresponde a la implementación final del sistema y cuyas modificaciones deben estar asociadas a la incorporación de nuevos conocimientos o la actualización de diseño por cambios en las variables del problema. Por otra parte, pudiesen incorporarse correcciones en función de la evaluación por parte del usuario.

2.3.2 Lenguaje y Plataforma de Programación

El principio fundamental de la inteligencia artificial y en particular de los sistemas expertos, es que existe la capacidad de transcribir las capacidades humanas a un lenguaje que pueda ser procesado por máquinas como un computador. Para ello se han desarrollado en el tiempo, un número importante de lenguajes de programación que permitan controlar el comportamiento lógico y físico de estas máquinas. Estos lenguajes han formalizado símbolos y reglas sintácticas, que permiten desarrollar algoritmos que logren el control de un programa mediante la ejecución de procedimientos lógicos.

Estos lenguajes permiten la representación del conocimiento, de un modo formal y ordenado. En el caso de los sistemas expertos, una herramienta ampliamente utilizada es la definición de "regla". Una regla se puede definir como "una afirmación lógica que relaciona dos o más objetos e incluye dos partes, la premisa y la conclusión. Cada una de estas partes consiste en una expresión lógica con una o más afirmaciones objeto-valor conectadas mediante los operadores lógicos Y, O, o NO" (Castillo, et al., 1997).

Esta asociación por medio de reglas, se conoce tradicionalmente como la relación SI-ENTONCES. En esta relación, la parte SI es el conjunto de condiciones combinadas de forma lógica, que establece el cumplimiento o incumplimiento de la regla, por lo que la parte ENTONCES, corresponde a la conclusión generada cuando la regla es satisfecha. Adicionalmente, puede incorporarse a esta misma relación, una tercera parte donde se establece la conclusión en los casos que la regla no se cumpla.

Esta representación, conocida también como IF-THEN-ELSE, por su traducción en inglés y frecuente uso en lenguaje de programación, es la unidad básica que permite encadenar una serie de reglas, formando así el método de razonamiento de este tipo de sistemas expertos. Estas reglas de inferencia, forman un esquema que permite deducciones válidas a partir del cumplimiento de ciertas condiciones, y cuyo funcionamiento está basado completamente en los principios de la lógica matemática.

Los lenguajes de programación, han ido evolucionando en niveles, desde algunos elementales que sólo implementan una representación simbólica del código binario con el que trabajan las máquinas, hasta lenguajes de nivel medio y alto que expresan los algoritmos de una forma que facilite su manipulación por el usuario. Dentro de estos últimos, se han desarrollado varios lenguajes que buscan unificar la programación sin importar su área aplicación, entre los que destacan Pascal, C/C++, Java, Visual Basic, PHP, etc.; A diferencia de otros más antiguos, como ProLog o DataLog, que se enfocaban exclusivamente en la programación de tipo lógica.

Actualmente en sistema de mayor complejidad, suele combinarse la utilización de varios de estos lenguajes de programación, lo que puede lograrse a través de los denominados “Entornos de Desarrollo Integrado” o IDE por su sigla en inglés. Estos entornos son programas informáticos, que contienen herramientas para facilitar el trabajo con uno o varios lenguajes de programación. Estos entornos de programación, son aplicaciones que pueden funcionar de forma independiente, realizar modificaciones a otras aplicaciones mediante conexiones temporales o simplemente, formando parte de un grupo de aplicaciones interconectadas.

Los Entornos de Desarrollo Integrado, permiten editar códigos, compilarlos, depurarlos, e incluso poseen herramientas para la construcción de interfaces gráficas para el usuario. La edición de códigos, corresponde a la elaboración de una determinada rutina, utilizando el lenguaje de programación que se desee. La compilación, hace referencia a la traducción del código en lenguaje de programación, al lenguaje con el cual trabaja la máquina, proceso en el que se puede determinar la presencia de errores en la rutina elaborada, los que podrán ser corregidos en el proceso conocido como depuración.

En el caso particular de la Planta “Las Tórtolas” de AngloAmerican, los contratos activos durante el período de trabajo de tesis, incorporan la utilización de las herramientas de *Wonderware Development Studio*, de la empresa británica Invensys plc. El eje principal de este grupo de aplicaciones, es ArchestrA® IDE, entorno de desarrollo que permite configurar y rediseñar sistemas de información y automatización. Este ambiente trabaja sobre el conocimiento de los lenguajes de programación Visual Basic y C++, además de las herramientas de *Visual Studio .NET* de la empresa Microsoft®.

El ambiente ArchestrA® IDE, está especialmente desarrollado para su uso industrial, trabajando acoplado a aplicaciones del tipo HMI, SCADA o DCS. En el caso de la Planta “Las Tórtolas”, la operación de todas sus áreas se maneja a través de un Sistema de Control

Distribuido (DCS) denominado I/A *Series*® de Foxboro, unidad de negocios de la misma empresa británica mencionada anteriormente.

Este tipo de sistemas de control DCS, se aplican principalmente a procesos industriales de alta complejidad, procesando miles de señales asociadas a mediciones, alarmas, eventos de un proceso, etc. Todas estas señales trabajan con una sola base de datos integrada que permite monitorear, procesar e intervenir las variables del proceso desde la sala de control.

Adicionalmente, sistemas como el I/A *Series*®, poseen herramientas incorporadas que facilitan la implementación de otros sistemas, como por ejemplo un sistema experto, que puede ejecutarse a partir de la misma base de datos y en forma sincronizada, con las demás herramientas de control de la planta.

3 Espesamiento: Conceptos y Tecnologías

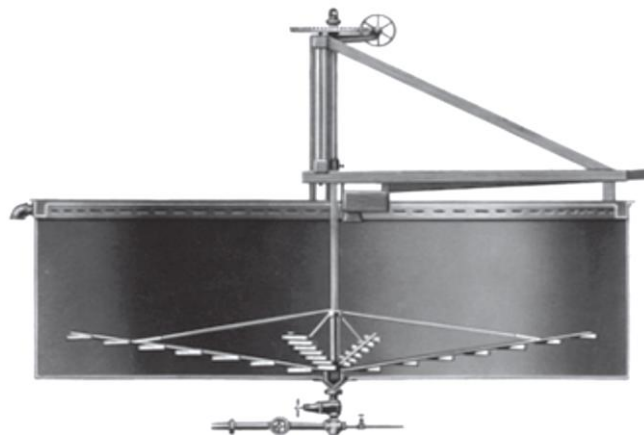
3.1 Definición de Espesamiento

El concepto de espesamiento, consiste en la remoción de agua desde lodos o pulpas, con el objetivo de lograr una reducción en el contenido de humedad presente en ellas. En particular, el espesamiento continuo por sedimentación es la separación de partículas sólidas en suspensión de una corriente líquida por asentamiento a causa de la gravedad, teniendo como propósito principal, aumentar la concentración de sólidos de la corriente de alimentación (Shammas, et al., 2007).

Los procesos de espesamiento, junto con incrementar el contenido de sólidos en una pulpa, permiten la obtención de agua clara, como producto del proceso. En muchos casos, se agregan compuestos floculantes, que favorecen la velocidad con que sedimentan las partículas sólidas a través de su aglomeración y al mismo tiempo, mejoran la claridad del agua recuperada (Schoenbrunn & Toronto, 1999). Dependiendo de la aplicación en la cual se lleva a cabo el espesamiento, y basado en la importancia que tenga para ésta, la concentración de sólidos o la recuperación de agua clara, se definen los tipos de equipos necesarios y las filosofías de operación para ellos.

3.2 Espesadores

Los espesadores son equipos característicos de la industria, que no han cambiado mucho en apariencia desde 1905, año en el cual John V. N. Dorr inventó el espesador que lleva su nombre, y se considera el punto de partida para los estudios y diseños que se desarrollan hasta el día de hoy (véase Figura 3.1).



**Figura 3.1 Diseño Original del Espesador de Dorr
(Dorr, 1936)**

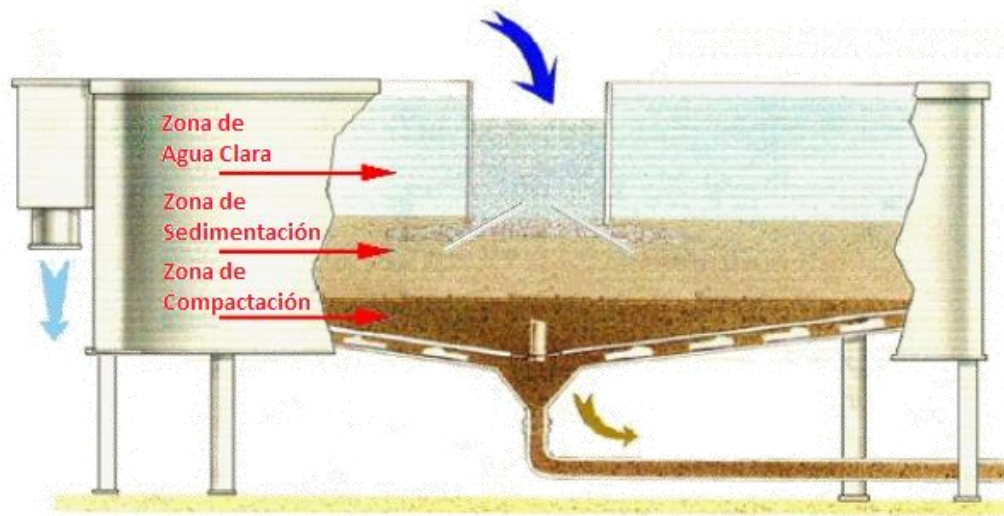
En términos generales, el método de operación de un espesador consiste en que, a medida que una corriente de alimentación con sólidos ingresa al equipo, estos comenzarán a depositarse en la parte inferior. Al mismo tiempo que esto sucede, el líquido clarificado se desborda por la parte superior, mientras que la corriente de descarga inferior será una pulpa con un contenido de sólidos más alto con respecto a la alimentación.

Para que lo anterior ocurra de forma correcta, deberán cumplirse ciertas condiciones de operación en el equipo, las que además permitirán la formación de tres zonas o capas características, tal como se observa en la Figura 3.2 donde se muestra una sección transversal de un espesador típico.

La zona superior, conocida como zona de agua clara, corresponde aquella sección que está libre de sólidos o con un contenido muy bajo de ellos y que además corresponde al agua que se recupera por el desbordamiento en la parte superior del espesador.

La zona media, denominada zona de sedimentación, consiste en una pulpa con características muy similares al flujo de alimentación respecto a la concentración de sólidos, la cual a su vez comienzan a aumentar a medida que se desciende dentro del equipo, por efecto del asentamiento gravitacional de las partículas sólidas.

Finalmente la capa más profunda conocida como zona de compactación, contiene la pulpa más concentrada y con un porcentaje de sólidos similar al que se obtiene en la descarga del equipo, producido por la deshidratación lograda por el desbordamiento de agua en la parte superior.



**Figura 3.2 Diagrama Interior de un Espesador
(Stelios Project Management, 2010)**

Un punto importante en el diseño de estos equipos, es convertir el flujo de sólidos diluidos en la alimentación en una suspensión de sólidos diluidos, que permita la sedimentación de las partículas en una capa con poco movimiento lateral, pero suficiente para distribuir el efecto del floculante al interior del espesador.

En base a las características de la pulpa que se está tratando y como resultado de los avances en el desarrollo de distintos tipos de floculante, en la actualidad se pueden distinguir dos tipos de espesadores continuos: Convencionales y Alta Capacidad. (Stelios Project Management, 2010)

Ambos cumplen con características generales tales como la remoción de agua, conocida como “*overflow*” a través de canaleta de rebalse en la periferia del espesador y la descarga de una corriente con mayor concentración de sólido en la parte inferior del equipo, conocida como “*underflow*”. Sin embargo, estos dos tipos de espesadores difieren en la forma en que se alimenta la pulpa a procesar.

En el caso de los espesadores convencionales (véase Figura 3.3), se caracterizan porque la bandeja de alimentación se ubica en la parte superior del equipo, donde desemboca la tubería o canaleta abierta por donde circula la pulpa. Este flujo alimentado se mezcla en parte con la primera capa de agua clara, diluyéndose progresivamente hasta alcanzar la concentración de la segunda zona o de sedimentación.

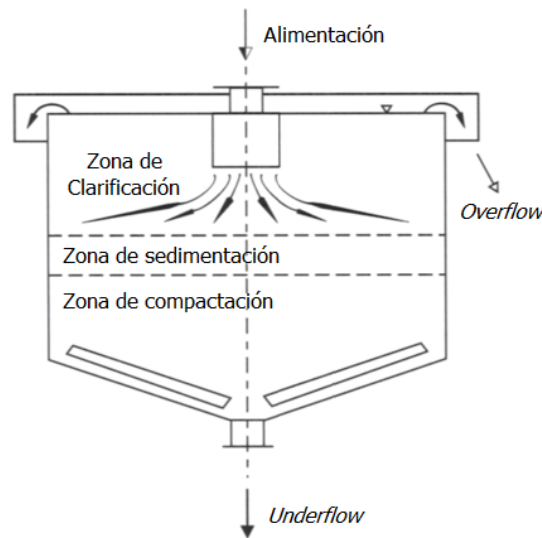


Figura 3.3 Diagrama Espesador Convencional (Svarovsky, 2000)

Los espesadores convencionales pueden ser utilizados con aplicación de floculante o sin ella, dependiendo de la aplicación y las características de la pulpa. En aquellos casos en que se emplea floculante, su adición generalmente se lleva a cabo directamente en el ducto de

alimentación de pulpa, aprovechando así la turbulencia de la corriente para un correcto mezclado.

Por su parte los espesadores de Alta Capacidad difieren principalmente en poseer una bandeja de alimentación más profunda, la cual descarga el flujo de alimentación bajo la capa de sedimentación (véase Figura 3.4). Con ello se busca maximizar la eficiencia de sedimentación por efecto del floculante, por lo que se espera que un espesador de alta capacidad generalmente incluya la adición de este compuesto.

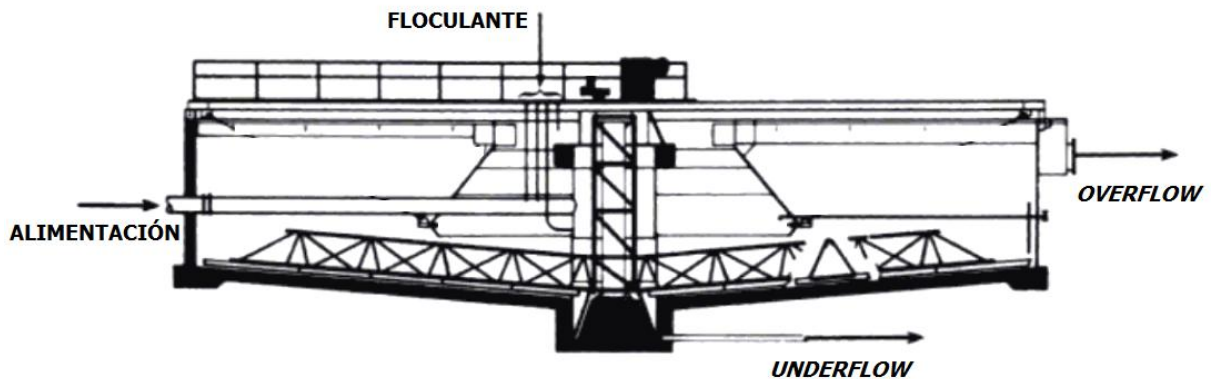


Figura 3.4 Diagrama Espesador de Alta Capacidad (McKetta, 1992)

La adición de floculante en estos espesadores se realiza de forma más cuidadosa, de modo tal que la pulpa de alimentación no dañe el trabajo de sedimentación por parte del floculante, por lo que el compuesto se agrega en el extremo de la tubería que alimenta la pulpa.

Adicionalmente, un aumento en la velocidad de sedimentación, generado principalmente por la eficiencia en la adición de floculante para el caso de espesadores de alta capacidad, favorece la utilización de equipos más pequeños con respecto a un espesador convencional. Sin embargo, esto mismo hace que los cambios en la velocidad, o las características del sólido en el flujo de alimentación, generen cambios operacionales importantes en las zonas al interior del equipo, lo que puede significar a su vez, una mayor inestabilidad y por ende, la necesidad de algún sistema de control.

Lo anterior, de acuerdo al concepto original de equipos de Alta Capacidad, puesto que en la actualidad la definición de espesadores *High Rate* o Alta Capacidad, es usada para describir aquellos equipos donde la pulpa de mineral es mezclada con el floculante en la bandeja de alimentación y se inyecta uniformemente en la zona de sedimentación (Betancourt & Concha, 2011). Estos nuevos diseños que han sido patentados por distintas compañías dedicadas a su

fabricación, además de inyectar la pulpa de alimentación en una zona diferente al concepto original, han desarrollado equipos de gran dimensión que superan los 100 metros de diámetro y cuyo esfuerzo en mejorar el rendimiento apunta al diseño de la bandeja de alimentación y la combinación con el floculante.

3.3 Componentes de un Espesador

3.3.1 Elementos Estructurales

Independiente del tipo de espesador, existe un grupo de elementos estructurales que componen estos equipos, y que a partir de las características de cada uno de ellos, dan lugar a espesadores diferentes según sea la aplicación en la que se utilice. Algunos de estos elementos básicos se muestran en la Figura 3.5 y se describen a continuación:

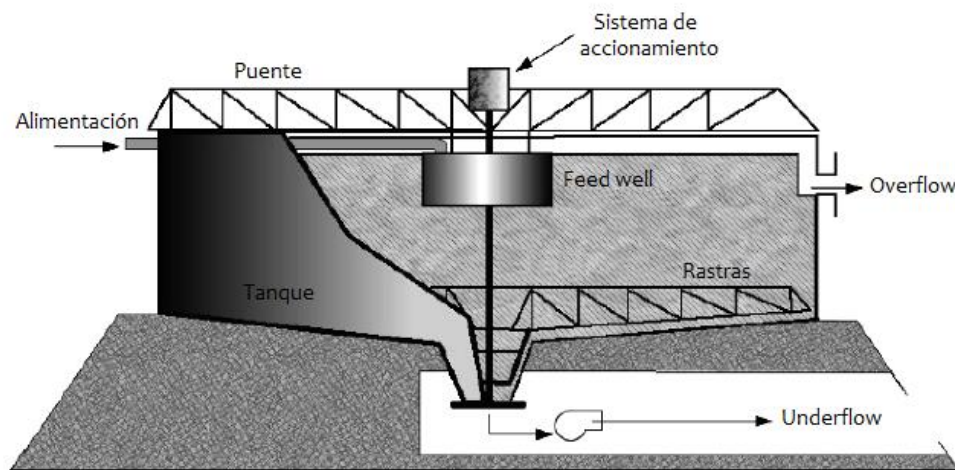


Figura 3.5 Elementos Estructurales Básicos de un Espesador
(Gupta & Yan, 2006)

Tanque

El tanque es la estructura básica de todo espesador, y corresponde al recipiente donde ocurre el proceso de sedimentación y que puede ser construido de materiales tales como acero, concreto, plástico e incluso madera. La selección de este material depende principalmente de factores como las características de la pulpa (corrosión, densidad), condiciones de operación (temperatura, presión), costos, condiciones climáticas y volúmenes de procesamiento.

Precisamente, uno de los criterios más importantes en el diseño de un espesador, es el diseño de su tanque, en particular su área y profundidad. En el caso del área, se selecciona la de mayor dimensión según los requerimientos de cada capa, en base a métodos metalúrgicos

teóricos y experimentales tales como Coe y Clevenger o el procedimiento de Talmage y Fitch (Svarovsky, 2000).

Por su parte la profundidad del tanque, está determinada principalmente por los requerimientos de la capa de compresión, debido a que determina la concentración de sólidos en el *underflow* dependiendo del tiempo de residencia de las partículas al interior del equipo.

Rastras

Las rastras son mecanismos que giran al interior del tanque, conocido también como rastrillos o brazos giratorios. Estos son los encargados de transportar los sólidos sedimentados hacia el punto de descarga central del espesador y al mismo tiempo que generan pequeños canales que permiten liderar el agua atrapada y por ende obtener una cama de lodos con mayor contenido de sólidos.

El diseño de las rastras depende principalmente de las características de los sólidos, las dimensiones del tanque y el efecto del floculante, aunque frecuentemente se utilizan rastras que poseen dos brazos largos que pueden ir acompañados de otros dos con menor longitud.

La gran mayoría de los espesadores, cuentan con rastras que están unidas a un eje central o una estructura circular giratoria, los cuales se encuentran conectados a un motor que permite el movimiento de los brazos, aunque existen algunas excepciones tales como espesadores donde su giro es guiado por medio de cables.

La velocidad de giro de rastras es un punto muy importante en el diseño de un espesador, puesto que deben ser capaces de evitar la acumulación excesiva de sólidos en el fondo del equipo y a su vez, no debe generar turbulencia que impida la correcta sedimentación de las partículas.

Sistema de accionamiento

Este sistema es el conjunto de componentes que entregan la fuerza necesaria para permitir el movimiento de la rastra a través de la pulpa espesada, al mismo tiempo que la transporta hacia el punto de descarga del espesador. Estos sistemas son generalmente accionados con el apoyo de unidades mecánicas o hidráulicas.

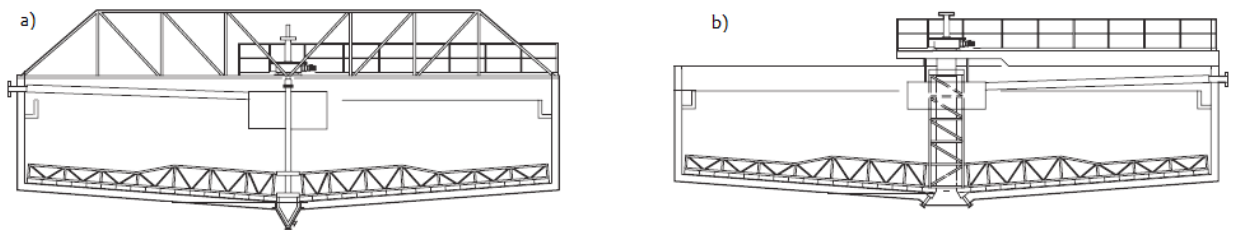
Este conjunto incluye el mecanismo de apoyo que permite transmitir el movimiento a través del eje y debe ser capaz de tener una resistencia adicional adecuada, frente a la posibilidad de sobrecargas temporales generadas por la fricción con la cama de lodos. En este mismo sentido, es importante que el sistema cuente con un control fiable que proteja el mecanismo completo, ante la eventual presencia de una sobrecarga mayor.

En la mayoría de los espesadores, la confiabilidad de los sistemas de accionamiento es fundamental para la operación. Esto se debe a que el correcto funcionamiento de un espesador, depende en gran medida de su capacidad para transportar el sólido espesado hacia el centro del equipo, de lo contrario no puede seguir operando. Esto implica que otro equipo deberá soportar la carga extra (en caso de existir), o desviar la carga en caso de ser posible, o bien, detener la cadena de producción completa.

Estructura de soporte

Los espesadores también pueden ser clasificados por el tipo de estructura que se utiliza para soportar el sistema de accionamiento. De este modo, se pueden reconocer como espesadores “tipo puente” (*bridge type*) o “tipo pilar central” (*centre pier type*).

En el caso de los primeros, son aquellos cuyo eje central y mecanismo de accionamiento, se sostiene sobre una estructura que atraviesa el tanque y que tiene la fuerza necesaria para resistir el peso completo del mecanismo, además del torque que se ejerce sobre las rastras por efecto de los sólidos sedimentados. Por lo general, se utilizan estructuras “tipo puente” para espesadores de diámetros relativamente pequeños, es decir hasta 30 o 40 metros (véase Figura 3.6a).



**Figura 3.6 Estructuras de Soporte Tipo Puente (a) y Tipo Pilar Central (b)
(Metso Corporation, 2013)**

Por su parte los equipos cuyo soporte es de tipo pilar central, son utilizados para espesadores de diámetro superior, en donde el sistema de accionamiento se sostiene sobre un pilar fijo que puede estar construido de materiales como hormigón o acero. Para permitir el movimiento de las rastras se emplean estructuras giratorias alrededor del pilar, las cuales conectan el mecanismo de accionamiento con los brazos de las rastras (véase Figura 3.6b).

Pese a que muchos de estos espesadores también incluyen un puente en la zona superior, sólo se utiliza como método de soporte para las tuberías de alimentación y para el acceso del personal autorizado en caso de ser necesario.

Mecanismo de elevación de rastras

La mayoría de los espesadores cuentan con estos mecanismos que permiten levantar la posición de las rastras, frente a ciertas situaciones de emergencia, aunque también puede ser empleado como mecanismo de control.

De esta forma, el levantamiento de rastras puede ser utilizado en algunos casos, para evitar un aumento de torque cuando el flujo de descarga es insuficiente, ingresan al equipo sólidos de mayor tamaño o ante acumulaciones menores en el fondo del equipo. Para situaciones como ésta, hay sistemas que permiten levantar las rastras hasta que el torque recupere valores que se consideran normales, a partir de lo cual el mecanismo se baja lentamente hasta su posición original.

Los mecanismos de elevación de rastras están también configurados para actuar cuando, ante situaciones anormales en la operación, se alcanzan valores de torque excesivos para la estructura. En general se utilizan secuencias que para límites establecidos de torque, pueden levantar las rastras, activar un sistema de alarmas e incluso detener el movimiento de las rastras y cerrar la alimentación del espesador.

Bandeja de alimentación

La bandeja o pozo de alimentación (*feed well*) se ubica normalmente en el centro del espesador, y recibe la pulpa que se alimenta al equipo por medio de un tubo o canaleta, con el objetivo de reducir la turbulencia del flujo disipando su energía cinética y distribuyéndola de forma uniforme al interior del equipo.

Estas bandejas cilíndricas aprovechan el esfuerzo de cizalle para amortiguar la turbulencia del flujo alimentado, obteniendo un régimen de ingreso al equipo lo más laminar posible, para así evitar que interfiera con aquellos sólidos que ya están sedimentando.

En la medida que la claridad del *overflow* es más importante, o bien la gravedad de la pulpa es más cercana a la gravedad específica del líquido, es necesaria la utilización de bandejas de alimentación más profundas y de mayor diámetro.

En el caso de los espesadores *High Rate*, el diseño de bandejas de alimentación más complejas, toma relevancia debido a la importancia de una eficiente mezcla entre el pequeño volumen de floculante y el gran flujo de la corriente principal. De este modo se han desarrollado nuevos modelos que dividen la alimentación en compartimientos al interior de la bandeja, aprovechando el esfuerzo de cizalle para amortiguar la velocidad del flujo y al mismo tiempo introducir el floculante formando una mezcla uniforme.

Conectado directamente bajo la bandeja de alimentación, se ubica un cono encargado de distribuir la pulpa al interior del espesador de acuerdo a la forma en que fue diseñado el equipo.

Sistema de recuperación del overflow

El *overflow* como se conoce normalmente al flujo de agua clara recuperada en la parte superior del espesador, se elimina del equipo a través de una canaleta periférica que puede estar ubicada por el borde interior o exterior del tanque.

La canaleta debe tener la capacidad de soportar eventuales aumentos en el flujo de agua recuperada, para impedir su inundación y evitar la necesidad de detener momentáneamente la alimentación al equipo o bien, afectar la densidad que se obtiene en la descarga por el *underflow*.

El flujo total recuperado a través de la canaleta que bordea todo el equipo, converge hacia una cañería que dirige el agua recuperada hacia algún estanque de almacenamiento o una piscina de retención según sea las condiciones del entorno, y a partir de los cuales puede ser derivado por medio de bombeo hacia las zonas de procesamiento que se requiera.

Como se explicó anteriormente, la capa de líquido clarificado rebosa del borde superior del espesador, a través de intersticios consecutivos ubicados a lo largo de todo el perímetro del tanque. Las formas que tienen estas ranuras son generalmente de dos tipos: la primera y más simple corresponde a muescas planas espaciadas simétricamente; mientras que la segunda conocida como muesca en forma de V, es comúnmente utilizada en espesadores de gran dimensión. Además esta última destaca por ser capaz de evitar tasas de desbordamiento demasiado irregulares, ante la presencia de viento en la superficie de líquido y porque son menos sensibles a desviaciones en el nivel del tanque.

Sistema de descarga del underflow

En el fondo del tanque, la cama de sólidos sedimentados debe ser retirada del espesador con la ayuda del giro de las rastras, que facilitan el transporte de la pulpa hacia el centro del tanque. En esta zona se ubica una estructura cónica que conecta con la línea de descarga para eliminar finalmente los sólidos, pudiendo tratarse de una sola cañería o varias de ellas.

Para favorecer la descarga de los sólidos desde el fondo del equipo, se pueden utilizar bombas centrífugas, bombas de desplazamiento positivo o simplemente aprovechar el efecto de gravedad, dependiendo de las características de la pulpa obtenida y la disposición geográfica del equipo.

En aquellos casos en que se utilizan bombas, se recomienda que su posición sea lo más cercano posible al cono de descarga debido principalmente, a las altas densidades del *underflow* en variadas operaciones. Mientras que cuando se puede aprovechar el efecto de gravedad, se hace necesario incorporar válvulas de control que permitan modificar el flujo de acuerdo a las necesidades del proceso, de modo de asegurar la recuperación de agua y al mismo tiempo la obtención de una densidad de descarga óptima.

Desde el punto de vista operacional, el sistema de descarga del *underflow* debe tener la capacidad necesaria para remover todos los sólidos desde el interior del equipo, para cualquier condición de alimentación.

En caso contrario, una acumulación de sólidos puede generar situaciones de riesgo para el equipo y la necesidad de detener el mecanismo, y por ende la operación. En este mismo sentido y para situaciones particulares, los espesadores cuentan con sistemas que permiten detener la alimentación o desviarla del equipo.

3.3.2 Equipos de Instrumentación

Los principales instrumentos con los que se equipa un espesador, están pensados en poder controlarlo a través de la lectura de señales que permitan identificar a tiempo lo que sucede en su interior.

El control de cualquier espesador requiere de una combinación de señales confiables y del conocimiento de los fundamentos de operación del equipo. Mientras mayor sea el grupo de equipos de instrumentación disponible, menor será la dificultad para desarrollar una estrategia de control ya sea de forma manual o mediante algún sistema de control automático.

Entre algunas de las variables que se monitorean comúnmente destacan torque, presión de la cama de lodos, nivel de interfaz, flujos y densidades en la alimentación y en la descarga, entre otras que permitan complementar la información, dependiendo además de los objetivos del equipo o las características de la planta.

Torque

El concepto de torque desde un punto de vista práctico en la operación, es una medición en el espesador que se utiliza como un indicador de la fuerza necesaria para hacer girar las rastras.

De esta forma, una medición de torque alto puede significar una densidad del *underflow* muy alta o una cama de lodos muy gruesa. Pese a que ambas son las situaciones más comunes, puede indicar el ingreso de una mayor fracción de material grueso en la alimentación u otros

fenómenos menos frecuentes, los que se podrán identificar con el análisis de las demás señales.

Como se mencionó anteriormente, las mediciones de torque no sólo responden a la necesidad de controlar el equipo sino que también, representan un medio de protección para las rastras del espesador, pues permiten tomar medidas en aquellos casos de torque excesivamente alto, tales como la activación de alarmas, el levantamiento de rastras o la detención de ellas acompañada de una desviación en la alimentación.

Normalmente los medidores de torque son proporcionados por el fabricante del espesador, quienes utilizan métodos como el uso de celdas de carga, mediciones en la potencia del motor, o la presión hidráulica cuando se trata de un mecanismo de estas características.

Altura de rastras

La medición de altura de rastras está directamente relacionada con el mecanismo de elevación de las mismas. Este sistema, como se detalló en el punto anterior, se utiliza frecuentemente en función de los límites establecidos para la medición de torque, pudiendo permitir que las rastras continúen girando incluso durante condiciones irregulares o bien, para evitar situaciones que pongan en riesgo la estructura.

De este modo un indicador de la posición de las rastras, permite al operador conocer la posibilidad de controlar la operación mediante este método, evitando un desgaste innecesario cuando las condiciones permitan ajustar la altura relativa de las rastras, en caso que el equipo haya sido diseñado con este sistema.

Por otro lado, cuando sólo se trata de un mecanismo de protección para las rastras, un indicador de altura permite conocer la posición real de ellas y así asegurar que el mecanismo de levantamiento funciona correctamente frente a situaciones de alto torque.

Al igual que los indicadores de torque, los medidores de altura de rastras son típicamente suministrados por el fabricante del espesador, utilizando métodos simples como un cable enrollado que se conecta a un potenciómetro o la detección mediante señales y sensores ultrasónicos.

Nivel de cama

Los instrumentos utilizados para medir la variable conocida como nivel de cama, buscan identificar la altura correspondiente al nivel de sólidos que han sedimentado al interior del equipo, denominada zona de compactación.

Esta indicación representa la altura aproximada a la cual se tiene un determinado nivel de sólidos, entendiendo que el fenómeno de sedimentación, genera un perfil de concentración de partículas desde la superficie hasta el fondo del equipo (véase Figura 3.7).

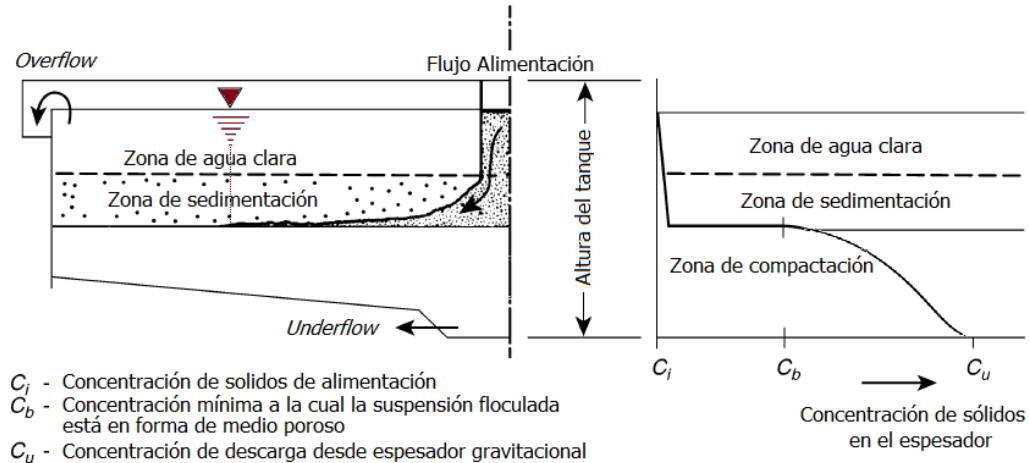


Figura 3.7 Perfil de Concentración de Sólidos en un Espesador (Shammas, et al., 2007)

En la industria existen variados tipos de instrumentos que permiten determinar el nivel de cama, los cuales funcionan a partir de distintos métodos, cada uno de los cuales poseen sus ventajas y debilidades dependiendo de la aplicación donde se utilice. Entre ellos se pueden mencionar los de tipo ultrasónico, nuclear y por métodos físicos.

Aquellos sensores que utilizan ondas de ultrasonido para detectar el nivel de cama, funcionan mediante el envío de un pulso desde la superficie del espesador, el cual a su vez rebota en la superficie de la cama de lodos enviando de regreso una señal hacia el receptor. El principio se basa en determinar el nivel de cama de acuerdo al tiempo que transcurre desde el envío de la señal hasta su llegada al instrumento receptor. Destacan por tener un rango de operación amplio y porque su instalación además de ser sencilla, no interfiere en la operación del equipo; sin embargo, la medición puede verse afectada debido a la interferencia que pudiera existir ante la presencia de turbidez en la zona de agua clara.

Los sensores de tipo nuclear, funcionan bajo el principio de medir la atenuación de los rayos enviados desde un emisor hasta un receptor, al pasar a través de un recipiente de proceso. Son particularmente útiles, en aquellos casos en que es necesario evitar el contacto con el fluido, pero pueden verse afectados cuando los cambios en el mineral pudiesen tener algún efecto radiactivo, además de la interferencia que se presenta por el paso de las rastras.

Otros métodos más simples, son aquellos que utilizan un flotador conectado a alguna varilla que se desliza hacia arriba o hacia abajo de acuerdo a la posición del flotador, diseñado para mantenerse sobre la superficie de la cama de lodos. Pese a ser muy económicos, estos sistemas presentan ciertas dificultades, asociadas por ejemplo a las incrustaciones de sólido y al hecho, de que sólo pueden medir hasta una zona superior a la ubicación de los rastrillos.

Presión de cama de lodos

La intención de medir la presión en la zona inferior del tanque del espesador, parte de la premisa que esta medición representa un indicador de la gravedad específica global dentro del equipo, debido al volumen constante en su interior.

Además como la gravedad específica del líquido es prácticamente constante, se puede inferir que la gravedad específica global representa directamente la cantidad de sólidos que hay en el interior del espesador, es decir el inventario de sólidos al momento de la medición.

Acompañado de la medición del nivel de cama, un indicador de presión de cama de lodos constituye una herramienta poderosa para el control operacional de un espesador. De este modo un alto nivel de interfaz no significa necesariamente que la presión de cama de lodos sea alta. Como se detallará en adelante la combinación de estas dos mediciones, nos entregan información relevante para conocer la dinámica de sedimentación al interior del equipo y con ello poder ajustar el suministro de floculante o el flujo de descarga según corresponda.

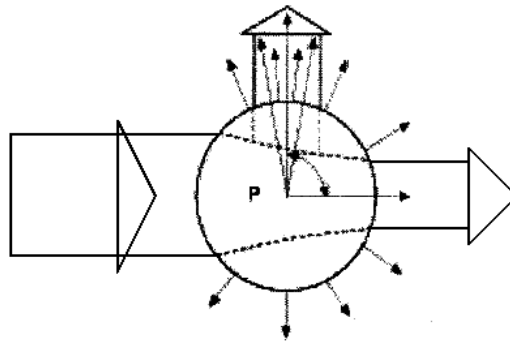
Respecto a los instrumentos para medir la presión de la cama de lodos, generalmente se utilizan sensores de presión diferencial, con una conexión al fondo del espesador y la otra abierta a la atmósfera, con el objetivo de compensar eventuales variaciones de presión del ambiente. En el caso de la conexión con el espesador, típicamente se instala de forma inclinada de tal manera de evitar la obstrucción por acumulación de sólidos, haciendo que estos sedimenten lejos del sensor.

Turbidez del overflow

El concepto de turbidez en el análisis de aguas se define como una “expresión de la propiedad óptica que hace que la luz se disperse y absorba en lugar de transmitirse en línea recta a través de una muestra”(APA AWWA, 1995).

En otras palabras cuando un rayo de luz atraviesa agua pura, los rayos de luz viajan por caminos relativamente inalterables. Pero, ante la presencia de otras moléculas en el fluido puro, se genera un cierto grado de distorsión. De esta forma, es posible identificar la presencia de sólidos en suspensión en la corriente del *overflow*, ya que el haz de luz

interactúa con las partículas re dirigiéndolo en todas direcciones, como se muestra en la Figura 3.8.



**Figura 3.8 Interacción de un Haz de Luz con las Partículas
(Great Lakes Instruments Inc., 1992)**

En la actualidad se conocen tres tipos comunes de turbidímetros de acuerdo a la forma de utilización: de laboratorio, portátil y en línea. Los dos primeros hacen referencia a instrumentos que permiten analizar muestras tomadas desde un determinado proceso. Mientras que los turbidímetros en línea, están diseñados para ser instalados en terreno, midiendo directamente sobre la línea de operación y permitiendo recuperar información en el mismo instante sin la necesidad de tomar una muestra. Por lo general, los instrumentos en línea requieren de una corriente lateral para la medición, la que posteriormente puede ser recirculada. Estos instrumentos en general requieren constante mantención debido al ensuciamiento, además de un cuidado especial en su uso debido a que la presencia de burbujas puede afectar la medición.

Desde el punto de vista del control, la medición de turbidez del *overflow* puede utilizarse para tomar acción sobre la dosificación de floculante. Sin embargo, en varias aplicaciones existe un retardo temporal importante, entre el momento en que se modifica la dosis de floculante y el resultado del efecto sobre el agua clara que desborda del espesador. Es por ello que en muchas ocasiones sólo se utiliza esta medición para efectos de monitoreo y alarmas.

Flujómetro

Este instrumento permite medir el flujo que circula por una cañería, y tanto en la alimentación como en la descarga por el *underflow*, son particularmente útiles en conjunto con los medidores de densidad, ya que permiten establecer un balance de masa al interior del espesador. Adicionalmente, son importantes para aquellos espesadores en que se utiliza la adición de floculante, puesto que ésta se realiza generalmente en base a la tasa de sólidos de alimentación para controlar la velocidad de sedimentación dentro del tanque.

Como las dos corrientes mencionadas son normalmente suspensiones de sólidos, los instrumentos más apropiados para medir la velocidad media del flujo son aquellos medidores de flujo magnético o medidores ultrasónicos con aplicación de efecto Doppler. En ambos casos, se trata de instrumentos que no obstruyen el flujo, por lo que son muy útiles en estas aplicaciones donde se debe tener precaución con la acumulación de sólidos en las líneas. Sin embargo, es importante evitar la presencia de burbujas, puesto que pueden afectar la medición.

Los primeros, se denominan flujómetros magnéticos ya que utilizan como principio la ley de Inducción Electromagnética de Faraday. Para ello, se genera un campo magnético en el medidor, el que se canaliza a través del líquido que fluye en la tubería. De acuerdo a la ley, el flujo de un líquido conductor a través de un campo magnético, dan lugar a una señal de voltaje que es detectada por los electrodos ubicados en las paredes del tubo. La ley de Faraday, establece que la tensión generada es proporcional al movimiento del líquido, es decir, mientras más rápido se mueve el fluido mayor será la tensión detectada por los electrodos.

Por su parte los flujómetros ultrasónicos, al igual que los sensores de nivel del mismo tipo, utilizan ondas de sonido para determinar la velocidad de un fluido a través de una cañería. Si no existe el paso de un flujo, la frecuencia de una onda transmitida en la cañería será la misma de aquellas ondas que se reflejan. Mientras que ante la presencia de un flujo, la frecuencia de la onda reflejada será diferente debido al efecto Doppler. A partir de ello, los sensores ultrasónicos procesan la señal de la onda transmitida y sus reflexiones para poder determinar la velocidad del flujo en la tubería.

Densímetro

Las mediciones de densidad son especialmente útiles en la descarga del *underflow* de un espesador, ya que permiten determinar el contenido de sólidos presente en esa corriente junto con poder controlar la capacidad de sedimentación del equipo. De este modo, determinar la densidad de la pulpa que está saliendo del espesador, permite ejecutar las acciones que sean necesarias para el control operacional del equipo ya sea de forma manual o automática.

Normalmente en procesos de espesamiento se utilizan medidores de tipo nuclear, los cuales con el paso del tiempo han mejorado de tal manera que en la actualidad las fuentes que se utilizan, son de un bajo nivel de radiación facilitando su uso y disminuyendo los riesgos al operar con ellos.

Al igual que en el caso de los flujómetros, su instalación no obstruyen el paso del fluido, de modo tal que de un lado de la tubería se monta una fuente de radiación y por la otra los sensores de detección. De forma análoga al principio de las ondas electromagnéticas, la cantidad de radiación que recibe el detector depende de forma inversamente proporcional a la cantidad de partículas que estén circulando al interior de la tubería. De este modo, a medida que la densidad del fluido varía, también cambiará la cantidad de radiación que llega al detector, es decir, mientras mayor es la densidad del material, menor es el campo de radiación detectado. Con ello y previa calibración que se realiza generalmente utilizando un gas y un líquido de densidad conocida, es posible establecer la densidad del fluido que circula en la cañería.

3.4 Dinámica de Espesamiento

Los espesadores son equipos que tienen una operación de tipo continua, cuya dinámica funciona en un estado pseudo estacionario, en que se lleva a cabo una separación de tipo física con el objetivo de retirar agua desde la pulpa de alimentación, dando lugar al balance que se muestra en la Ecuación 3-1. De esta forma, se espera que el flujo de *overflow* no contenga sólidos presentes, o en otras palabras, el flujo de sólido que alimenta a un espesador debe ser equivalente al flujo de sólidos que se retira por el *underflow*.

$$\text{Flujo Pulpa Alimentación} = \text{Flujo Overflow} + \text{Flujo Underflow} \quad (3-1)$$

Detrás de este balance global en el equipo, existe una dinámica que permite la separación sólido líquido por efecto de la sedimentación, en la cual se ven involucradas dos tipos de fuerzas: la gravedad y el empuje. La primera, es aquella fuerza que la tierra ejerce sobre los objetos y que en el caso del espesador, hace que las partículas de sólidos se dirijan hacia el fondo del estanque. Por otra parte, el empuje es una fuerza en sentido contrario ejercida por el fluido sobre un objeto sumergido (Yianatos, 2005).

Si la gravedad específica de cada partícula, es suficiente para que la fuerza de gravedad supere a la de empuje, entonces esta partícula comenzará a sedimentar hacia el fondo del espesador con una determinada velocidad, en función de la diferencia de fuerzas y la concentración de partículas en el medio. Sin embargo, parte importante de los espesadores incorporan además el concepto de floculación, asociado a la adición de este compuesto químico para favorecer la sedimentación de las partículas, en especial de las más finas.

Estos floculantes son reactivos que tienden a crear aglomeraciones de partículas, actuando como puente entre ellas y permitiendo así que sedimenten más rápido. Los compuestos que se utilizan como floculante son generalmente, polímeros de un alto peso molecular que poseen cargas eléctricas opuestas a las partículas en suspensión que se quiere sedimentar (véase Figura 3.9).

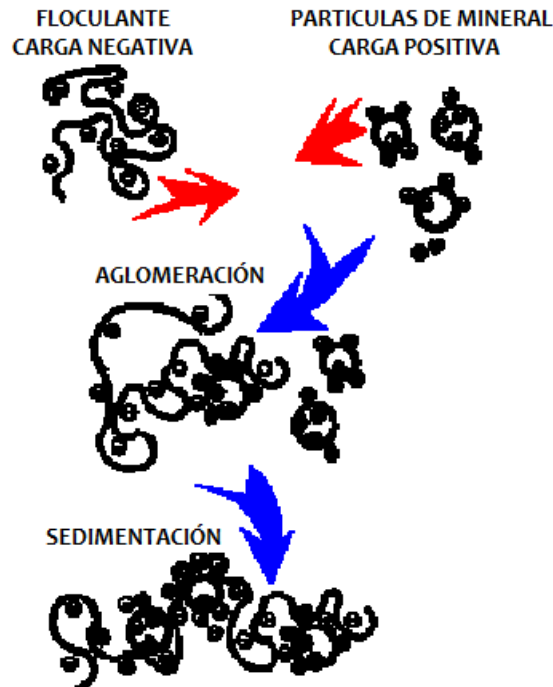


Figura 3.9 Efecto de Floculación
(Stelios Project Management, 2010)

Con el objetivo de favorecer el efecto del floculante sobre las partículas, generalmente se diluye en agua, antes de ingresar a la bandeja de alimentación del espesador, para mejorar la distribución del compuesto y aglomerar la mayor cantidad de partículas posible. Además, el diseño de la bandeja de alimentación de un espesador, debe considerar que los floculantes son largas cadenas que se pueden destruir fácilmente, por la presencia de flujos turbulentos o agitación. Cuando estas cadenas se rompen, el floculante pierde la capacidad de aglomerar partículas, lo que perjudica la sedimentación en el equipo.

De esta forma, el diseño de la bandeja de alimentación de un espesador es fundamental, especialmente cuando se adiciona floculante, de modo de permitir una distribución correcta del compuesto y a su vez, asegurar que las cadenas no se rompan para poder favorecer la velocidad de sedimentación de las partículas. Precisamente esta última, es una de las principales características a analizar en el diseño y dimensionamiento de un espesador. Para

ello, a lo largo del tiempo se han desarrollado distintos procedimientos y modelos que permiten calcular el tamaño necesario de un espesador, a partir de las características del mineral.

En términos generales el dimensionamiento de un espesador, requiere determinar parámetros tales como: las dimensiones del área requerida, la profundidad de cada una de las capas y la carga de sólidos que sedimentarán. Para ello existen varios modelos, de los cuales la mayoría de ellos se basan en ensayos o *test* de sedimentación, que se realizan en tubos o probetas a partir de los cuales es posible obtener las velocidades de sedimentación mediante curvas que entregan la información necesaria para dimensionar un espesador (véase Figura 3.10). A través de estas curvas es posible determinar el denominado flujo de sedimentación, concepto básico en el diseño de un espesador y que hace referencia a la cantidad de masa de sólidos que sedimentan por unidad de área. Con estos datos y la información de proceso, como por ejemplo, la cantidad de mineral a procesar o la concentración de sólidos que se desea alcanzar en el *underflow*, es posible dimensionar las distintas zonas del espesador, mediante diversos métodos entre los que destacan: Coe y Clevenger, Kynch, Talmadge y Fitch, Oltmann(Gupta & Yan, 2006).

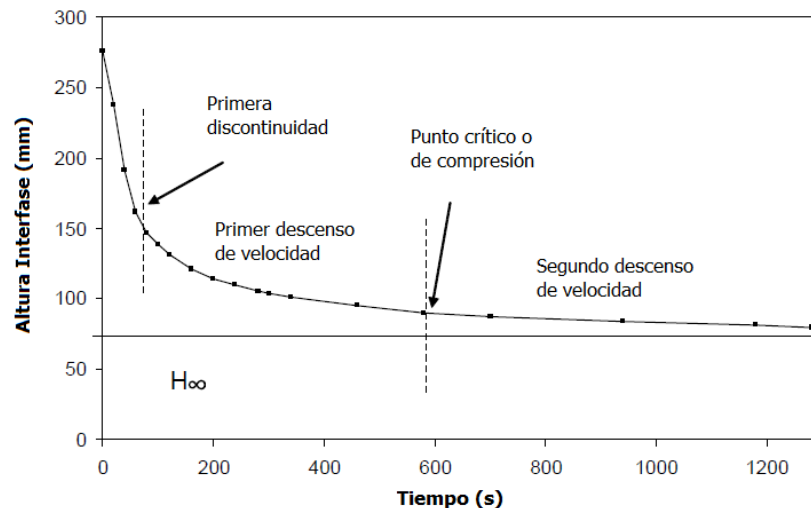


Figura 3.10 Curva Test de Sedimentación (Gupta & Yan, 2006)

3.5 Estado del Arte: Sistemas de Control

Los algoritmos usados para el control operacional de espesadores, se han desarrollado conforme han avanzado las herramientas de la Inteligencia Artificial. En el caso particular de los sistemas expertos basados en reglas, se han desarrollado desde los inicios de los sistemas de control por computador, con variados grados de éxito. Los inconvenientes más

comunes se han relacionado, con la sintonización, implementación y modificaciones posteriores, los que se han simplificado con el perfeccionamiento de nuevas herramientas en el área (Schoenbrunn, et al., 2002).

La mayoría de las estructuras de control para espesadores, se basan en la utilización de una o dos variables para manejar las demás condiciones operacionales del equipo. Típicamente las variables disponibles como recurso de control, corresponden al flujo de descarga por el *underflow* o el flujo de floculante agregado, además del flujo de pulpa de alimentación para casos particulares en que la operación lo permite. Mientras que entre las variables dependientes que determinan las condiciones operacionales de un espesador, se puede tener las mediciones de torque, presión de cama de lodos, nivel de la interfase de sólidos, porcentaje de sólidos en el *underflow* o la turbidez del *overflow*.

Un ejemplo de los tipos más básicos de control, corresponde al Sistema de Control HRT (*High Rate Thickeners*) implementado en la mina de oro *Sunrise Dam* ubicada en Australia (Stelios Project Management, 2010). En ella se implementó un sistema como se muestra en la Figura 3.11, basado en la consideración de que la columna de agua y mineral que ejerce una determinada presión sobre el fondo del equipo, es un buen indicador del inventario de sólidos al interior del espesador y a su vez, de la densidad de descarga en el *underflow*.

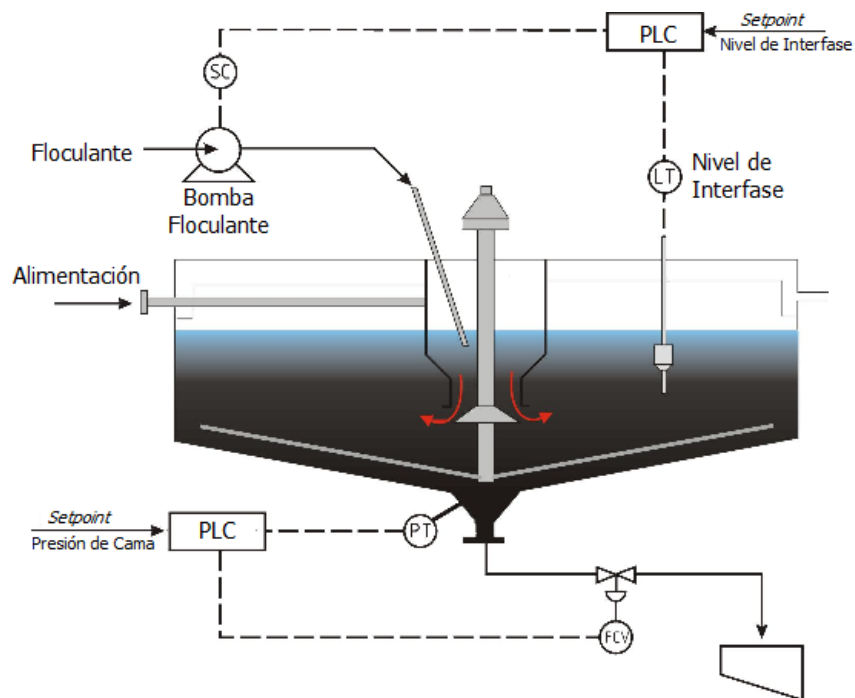


Figura 3.11 Sistema Básico de Control en Espesadores (Stelios Project Management, 2010)

A partir de lo anterior, un sensor de presión instalado en el fondo del espesador se conecta a un PLC, que permite la regulación automática de la válvula de descarga del equipo, a través de un *setpoint* ingresado por los operadores para la presión en el fondo del espesador. De modo similar, se utiliza la medición de nivel de interfase para regular la velocidad de la bomba que dosifica floculante.

De forma análoga al sistema descrito anteriormente, otras plantas de espesamiento han implementado lazos de control similares para controlar las variables de flujo de descarga y adición de floculante, a partir de mediciones de torque o claridad del *overflow*, mediante el ingreso de *setpoint* por parte de los operadores.

Respecto a sistemas de control un poco más sofisticados para espesadores, se han desarrollado sistemas expertos basados en reglas con los principios de la lógica difusa, como el implementado en la planta concentradora de *Cortez Gold Mine* (Schoenbrunn & Toronto, 1999).

En este caso, los conjuntos de reglas se definen por rangos de magnitudes para cada variable dependiente, tales como bajo, medio, alto y muy alto. A partir de la combinación de ellas, se definen cambios en los *setpoints* para las variables a controlar según sean los rangos donde se ubican las variables dependientes, cada una de las cuales, se definen en estructuras triangulares que definen las denominadas “funciones de pertenencia”, como se muestra en la Figura 3.12.

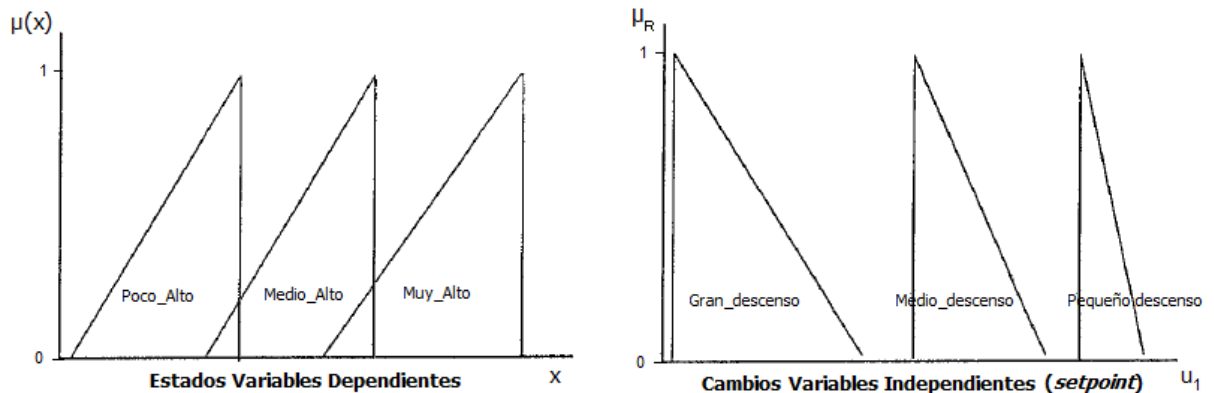


Figura 3.12 Funciones de Pertenencia en Lógica Difusa (Schoenbrunn & Toronto, 1999)

A partir de cada medición de las variables dependientes (x), se obtienen los grados de pertenencia (μ_x) para cada estado posible según la definición de funciones de pertenencias como las mostradas en la figura anterior. De este modo se obtiene una serie de grados de pertenencia para los distintos estados de cada variable independiente.

Según los principios difusos utilizados, se determinan funciones del tipo $\mu_R=f(\mu_{x1},\mu_{x2})$ que utilizan los grados de pertenencia individuales (μ_{x_n}) para la obtención de un grado de pertenencia único (μ_R) asociado a la salida o respuesta de un proceso difuso.

Adicionalmente se declaran grupos de reglas que incluyen todos los estados posibles y la combinación de ellos mediante relaciones de la lógica tradicional, tales como:

SI (Densidad_Descarga = Medio_Alto) *ENTONCES*
Cambio_SP_Floculante = Pequeño_descenso;
Cambio_SP_FlujoDesc = Pequeño_aumento;

SI (Densidad_Descarga = Muy_Alto) *ENTONCES*
Cambio_SP_Floculante = Medio_descenso;
Cambio_SP_FlujoDesc = Medio_aumento;

Dependiendo de si se activan o no, cada una de las reglas establecidas, y de acuerdo a las funciones de pertenencia para las distintas variables de control, se genera un conjunto difuso como respuesta a la lectura de la información de entrada.

Para poder ejecutar una acción real sobre las variables de control de los espesadores, se requiere de traducir la respuesta difusa a un único valor de salida, en términos de cambios de *setpoint*, procedimiento que se conoce como “defuzzificación”. Para ello, al conjunto difuso obtenido a partir de la activación de reglas y el grado de pertenencia (μ_R), se aplican procedimientos matemáticos como centroide o máximo medio, para generar un único punto de salida real que permita ejecutar una acción concreta en el equipo, y que al mismo tiempo sea representativo de todo el conjunto difuso obtenido.

Otra aplicación particular de sistemas de control para espesadores en la industria minera, corresponde a la desarrollada en *St Ives Gold Mine* ubicada en el sur-este de Australia (Karageorgos, et al., 2009). En el espesador de relaves de la planta, se implementó un sistema de control formado por dos estructuras denominadas “cubos”, que determinan los cambios necesarios en el flujo de descarga y de floculante, para mantener las condiciones de operación dentro de rangos considerados óptimos.

Ambas estructuras, una para cada recurso de control disponible, funcionan de forma paralela, clasificando las variables disponibles en rangos, de forma similar al principio de lógica difusa. La diferencia en este caso, es que los rangos (bajo, estable, alto) se combinan con la tendencia de la misma variable (creciente, estacionario, decreciente), dando lugar a 9 composiciones diferentes por cada medición.

El análisis de las variables asociadas a cada recurso de control, da lugar de forma automática a una respuesta de las mismas características, es decir, determina la necesidad de cambio o mantención del *setpoint* y en determinada dirección.

Adicionalmente, algunas fuentes proponen metodologías de control basadas en modelos, que buscan representar la dinámica de espesamiento al interior de un espesador, en base a la lectura de las variables operacionales del mismo. Con el conocimiento de la dinámica interna, se plantea realizar modificaciones en los recursos de control, para optimizar el proceso de sedimentación de partículas.

Entre algunas de estas propuestas, se han desarrollado sistemas de control predictivo basados en modelos, cuyos análisis se basan en simulaciones a partir de datos experimentales de plantas reales (Setiawan, et al., 2013). Los resultados de estas investigaciones, plantean la posibilidad de aprovechar estos modelos como base para algoritmos de control, sujetos a la determinación de parámetros y bajo el cumplimiento de las consideraciones supuestas para el diseño del modelo.

Estos numerosos modelos, por lo general describen fenómenos particulares que ocurren al interior de un espesador bajo ciertas condiciones, tales como métodos numéricos para simular la sedimentación de las partículas (Bürguer, et al., 2000) o la modelación de suspensiones con propiedades dependientes del tiempo (Betancourt, et al., 2014), sin embargo no describen de forma completa la fenomenología de estos equipos.

Por otro lado, otras investigaciones han estudiado la fenomenología para condiciones limitadas en espesadores, tales como modelos para espesadores en estado estacionario (Usher & Scales, 2005), simulaciones numéricas del comportamiento de partículas en espesadores ideales (Bürger, et al., 1999), o controladores simples basados en balances de masa para espesadores sin considerar adición de floculante (Betancourt, et al., 2013). Incluso este último trabajo, ya concluye que este tipo de controladores presenta falencias debido a la pérdida de control dinámico en variables internas, como el nivel de sedimentación, o debido a que suponen propiedades constantes de los sólidos.

Precisamente esta razón entre otras propias de un sistema de espesamiento, tales como los continuos y bruscos cambios asociados al flujo de alimentación, son perturbaciones que alejan a estas operaciones de un sistema ideal o estacionario, haciendo a su vez que los modelos fenomenológicos existentes sean una débil herramienta, cuando el objetivo es desarrollar un sistema de control para un determinado espesador de una planta real.

Al respecto existen fuentes que plantean que pese a existir modelos predictivos de espesamiento en la actualidad, su correlación con la realidad de las operaciones en terreno es pobre (Gladman, et al., 2006) y se requiere avanzar en el acercamiento de ambos para entender los procesos de espesamiento y por supuesto el desarrollo de los sistemas de control. En efecto, en la literatura no se han encontrado algoritmos de control basados en modelos de espesamiento, cuya implementación lograra resultados satisfactorios.

4 Espesador de Relaves “Las Tórtolas”

4.1 Descripción del Sistema

El sistema de espesamiento de relaves de la planta 2 de “Las Tórtolas”, considera un área particular identificada como 4920, pero involucra además la planta de Floculante, que se utiliza para la preparación, almacenamiento y distribución de este compuesto.

4.1.1 Espesamiento de Relaves

El área de espesamiento propiamente tal, se compone básicamente de un cajón de alimentación, un espesador de alta capacidad y una piscina con sistema de bombeo para la recuperación de agua en el circuito (véase Figura 4.1).

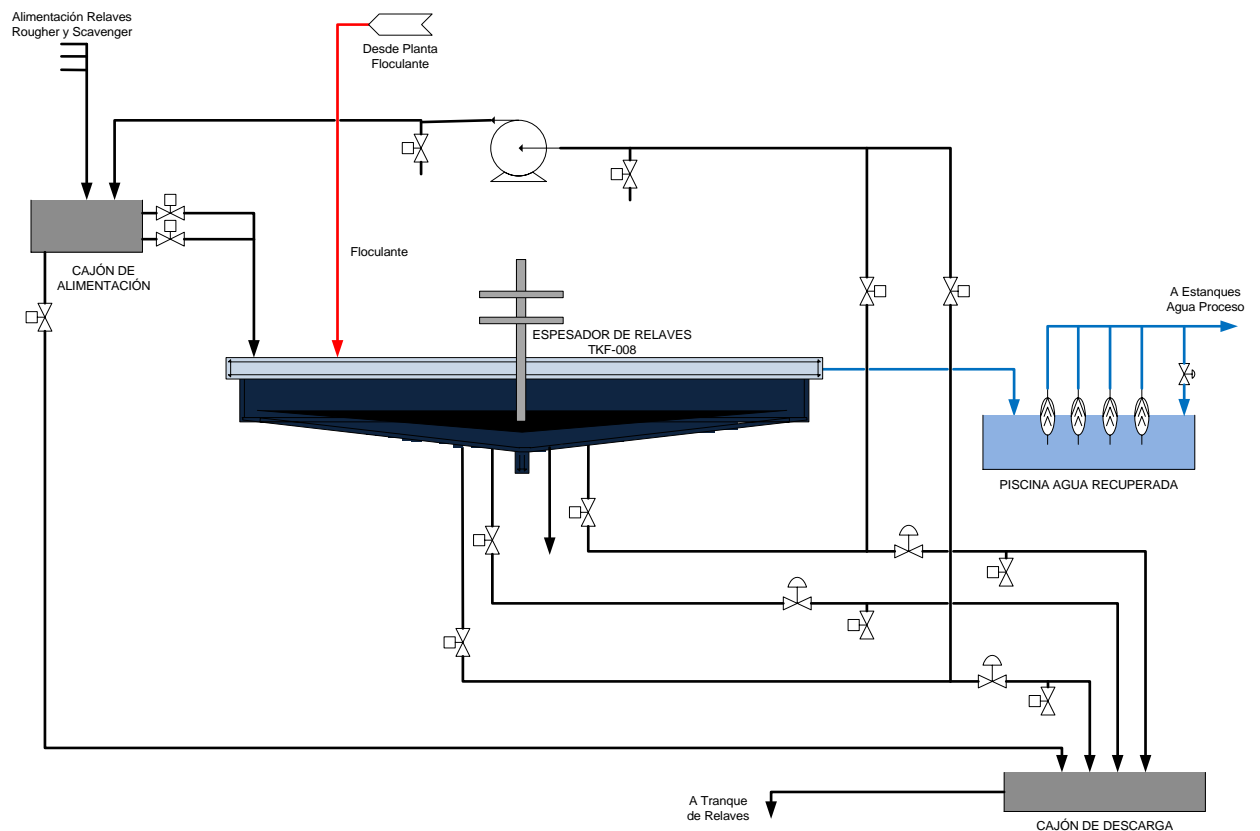


Figura 4.1 Sistema Espesamiento de Relaves

El cajón de alimentación, junto con recibir los relaves desde las líneas de Flotación Rougher y Scavenger, y alimentar con ellos al espesador, permite desviar la totalidad del flujo hacia un cajón de descarga del mismo, en caso de requerir el *bypass* del equipo.

El espesador de relaves, permite la obtención de una descarga en torno al 54% de sólidos, de acuerdo a criterios de diseño (Bechtel Chile, 2008). Esta descarga se lleva a cabo por efecto de gravedad, a través de dos líneas principales controladas por medio de válvulas de control instaladas en cada una de ellas. Además, se dispone de una tercera línea como respaldo, en caso requerir un aumento en la descarga del espesador, por problemas técnicos en alguna de las líneas principales o bien, por mantenciones que requieran vaciar alguna de ellas.

Tanto las líneas de descarga del espesador, como el desvío desde el cajón de alimentación, envían el flujo de relaves hacia el cajón de descarga del equipo. Este cajón a su vez, conecta directamente con una canaleta de transporte gravitacional, hacia la denominada “Estación de Bombeo S-O” que posee una capacidad de 5200 m³/h. De forma paralela a la canaleta principal, se ubica un canal con capacidad equivalente en caso de situaciones de rebose. Desde la estación de bombeo, el relave es enviado al extremo sur del tranque para su disposición final.

El flujo de agua clara que se recupera por el *overflow* o el rebose del espesador, se acumula en una piscina de 800 m³ de capacidad útil. Desde esta piscina, el agua recuperada es impulsada mediante cuatro bombas de turbina vertical de 3000 m³/h (dos en operación), hasta los estanques de agua de proceso de la planta.

Este sistema de colección e impulsión de agua recuperada, contempla una secuencia de control de acuerdo al nivel de la piscina, mediante la partida o detención de las bombas de velocidad fija y una línea de recirculación controlada mediante una válvula modulada. Actualmente el sistema de control de nivel en la piscina no se encuentra disponible, debido a dificultades técnicas en la estructura de la recirculación, lo que impide la utilización de este recurso de control, obligando a los operadores a controlar el nivel con la continua partida y detención de las bombas.

Por su parte, la adición de floculante en el espesador de relaves, se lleva a cabo de forma proporcional al tonelaje procesado por el circuito de flotación, pudiendo ajustarse esta proporción dependiendo de la calidad del agua recuperada y las condiciones de operación del equipo. Su preparación y distribución se lleva a cabo en la Planta de Floculante, cuya descripción detallada se muestra más adelante.

El diseño del área de espesamiento de relaves, considera también una bomba de recirculación conectada a las dos líneas principales de descarga, que permite eventualmente reingresar el flujo de descarga en el cajón de alimentación cuando sea necesario, por ejemplo, durante la partida del espesador con el objetivo de formar una cama de lodos que permita alcanzar la densidad de descarga deseada. Sin embargo, en la actualidad esta línea

de recirculación no se encuentra habilitada, por lo que no está disponible para su utilización como recurso para el control operacional del equipo. Si los restantes recursos de control, no son suficientes para alcanzar condiciones de operación óptimas, puede obtenerse un porcentaje de sólidos en la descarga por debajo de la especificación deseada.

4.1.1.1 Detalles del Equipo: Espesador

La descripción que se muestra a continuación, muestra las principales características de diseño del espesador de relaves utilizado para la recuperación de agua, de acuerdo a la información entregada para AngloAmerican por parte del fabricante y el proveedor (Bechtel Chile, 2007).

El espesador utilizado, corresponde a un equipo de 125 metros de diámetro (420 pies) desarrollado por la empresa FLSmidth *Minerals*® como parte de sus productos “Dorr-Oliver EIMCO® *Thickeners*”. En particular se trata de sus equipos *High-Rate*, cuyo diseño permite el tratamiento de los relaves de la Planta de Flotación Cobre-Moly obteniendo una densidad de descarga en torno al 54% de sólidos. El espesamiento considera una operación continua con un 95% de utilización, determinado principalmente por las condiciones de operación de la planta de molienda.

El modelo del equipo corresponde al C120P-5, cuya estructura de soporte es de tipo “pilar central” que cuenta adicionalmente con un puente de acceso, el que además sirve de apoyo para sostener la tubería con la pulpa de alimentación. El tanque del espesador está construido de concreto y cuenta con una pendiente interior de 167 mm/m, alcanzando una profundidad en el centro superior a 10 metros.

La columna central del espesador, tiene un diámetro externo de 2,59 metros, mientras que la bandeja de alimentación (*feed well*) alcanza los 15,24 metros de diámetro y una profundidad de 2,4 metros. Por su parte, en el fondo del equipo el cono de descarga posee un diámetro de 7,3 metros, con cuatro conexiones de 610 mm (24 pulgadas). Las líneas de descarga del espesador, fueron diseñadas con un diámetro nominal de 508 mm (20 pulgadas), por lo que inmediatamente después de cada conexión, se instalaron reducciones 24x20.

El principal sistema de accionamiento, encargado de hacer girar las rastras al interior del equipo, considera una unidad hidráulica manejada por cinco motores, que permiten alcanzar un torque máximo de diseño de 6,5 MN-m disponibles.

Además, el equipo cuenta con 4 rastras (2 largas y 2 cortas) que puede girar a una velocidad máxima de 0,03 rpm. El sistema central de levantamiento de las rastras funciona mediante un

motor con una potencia de 2,23 kW, el cual se activa de forma automática cuando las condiciones de torque así lo ameriten. Este sistema automático de levantamiento de rastras, funciona de acuerdo a la siguiente secuencia:

- Cuando la medición de torque alcanza en forma sostenida un valor alto, definida como el 50% del torque máximo de diseño, se ejecuta automáticamente el levantamiento hasta alcanzar un torque de 30%.
- Una vez alcanzado un torque de 30%, se detiene el levantamiento y comienza una secuencia de bajada progresiva por cada revolución. Si la medición de torque se mantiene sin alzas, se ejecuta una nueva secuencia de baja automática hasta alcanzar los valores de operación normal.
- Si el torque aumenta de tal forma, que alcanza un 90% del torque máximo de diseño, las rastras se detendrán de forma automática con el objetivo de proteger el mecanismo.

Además el equipo incluye algunos instrumentos para controlar las principales variables de operación, que serán detallados en la Sección 4.2 del presente documento; tales como sensores y transmisores de torque, posición de rastras, presión de cama o nivel de interfase.

4.1.1.2 Criterios de Diseño

Los criterios de diseño que se muestra en este punto, representan aquellos valores considerados como alcanzables al momento de diseñar la planta, de acuerdo a las capacidades individuales de los equipos y pretendiendo soportar la variabilidad del proceso o eventuales mantenciones. En otras palabras, las combinaciones de valores de diseño, no se refieren a producciones anuales predefinidas, ni tampoco buscan representar un balance metalúrgico en la planta, sino más bien, representan las tasas individuales que se usan para el dimensionamiento de los equipos (Bechtel Chile, 2007). La información entregada, corresponde a los criterios que dieron lugar a la implementación de los equipos y líneas de proceso, pudiendo ser modificada con el transcurso del tiempo.

Como se mencionó anteriormente, el espesador de relaves de 125 m de diámetro, permite obtener por diseño una descarga en el *underflow* en torno a un 54% de sólidos. Lo anterior, a partir de una alimentación con un 27% de sólidos provenientes de los relaves de las líneas Rougher y Scavenger de la planta de Flotación. Los valores de diseño en las líneas del espesador de relaves se muestran en la Tabla 4.1.

**Tabla 4.1 Criterios de Diseño Espesador de Relaves
(Bechtel Chile, 2007)**

		Alimentación	Underflow	Overflow
Porcentaje de Sólidos	[%]	26,8	54	-
Flujo de Sólidos	[ton/h]	4270	4270	-
Flujo de Pulpa	[m ³ /h]	13278	5168	8026
Gravedad Específica	[-]	1,2	1,53	1

La operación del espesador, por diseño considera que la alimentación se recibe por canaletas abiertas a la atmósfera, con una temperatura que puede variar entre 18 - 25 °C, y un pH en torno a 10-11, comandado por la operación de la flotación y la adición de reactivos en ella. Estos reactivos, pudiesen en cierta forma afectar el efecto del floculante en el equipo y por ende la velocidad de sedimentación de las partículas. El diseño de la operación considera la presencia de los reactivos de flotación, tales como Xantatos (23 g/ton de mineral), espumantes (28,5 g/ton) y lechada de cal (1,52 kg/ton).

Adicionalmente los criterios de diseño para la operación del espesamiento de relaves, están basados en las características granulométricas del mineral de alimentación (véase Tabla 4.2) para las cuales, la adición de floculante debe ser en torno a 15 g/ton de mineral procesado en la planta, lo que significa un flujo aproximado de 286 m³/h de solución a una concentración de 0,02%. Los detalles, de la variabilidad de cada parámetro en la operación diaria, con respecto a los criterios de diseño indicados, serán mostrados en el apartado Filosofías de Operación de este documento.

**Tabla 4.2 Granulometría Mineral de Alimentación al Espesador
(FLSmith, 2007)**

Tamaño – ASTM Malla (µm)	% Paso
850	100
425	96
300	89
212	83
150	78

4.1.2 Planta de Floculante

El espesamiento de los relaves requiere de la dosificación continua de floculante al espesador, por lo que se dispone de una planta de preparación compacta en un edificio independiente ubicado en el Área 4550 de preparación y distribución de reactivos.

Como se observa en la Figura 4.2, la Planta de Floculante con capacidad para 1,5 ton/día, considera la preparación del compuesto, el almacenamiento y su distribución, para lo cual se disponen de los siguientes equipos (Delkor, 2009):

- Tolva de recepción floculante
- Tornillo de descarga
- Sistema de mezclado: Ventilador y Humectador
- Estanque de Mezcla
- Bombas de transferencia
- Estanque de Almacenamiento
- Bombas dosificadoras

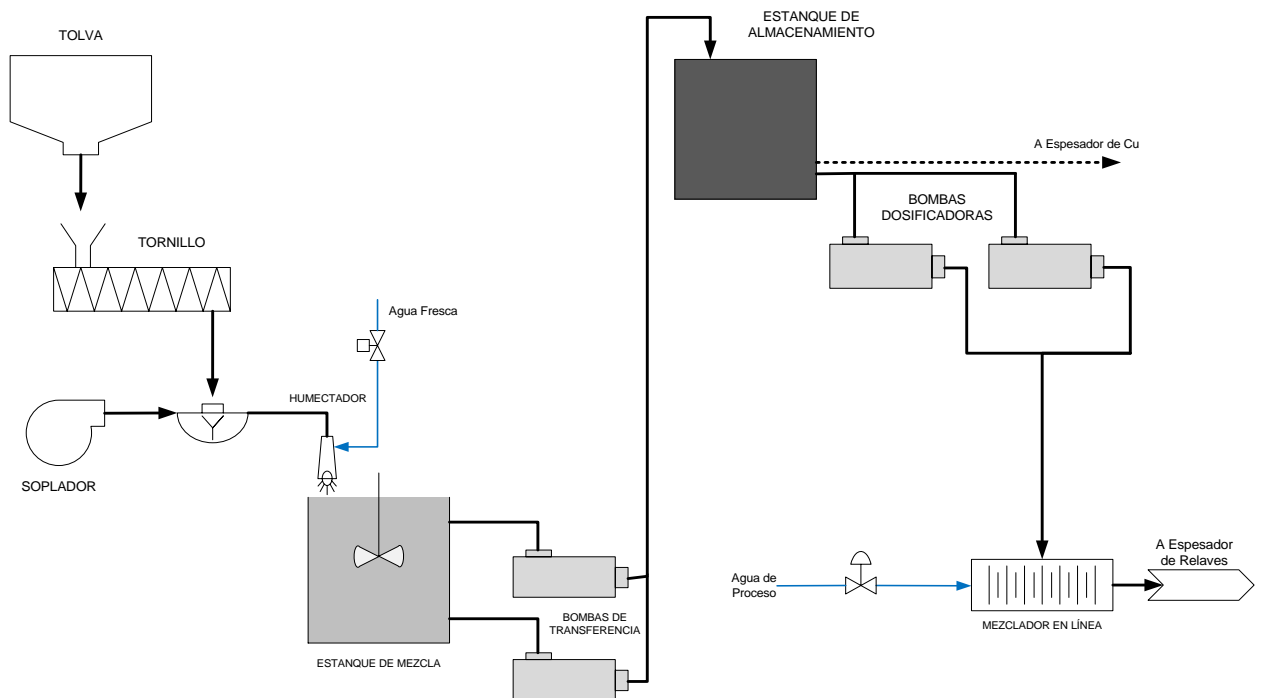


Figura 4.2 Planta de Floculante

La primera etapa de la planta de floculante, corresponde a la preparación de compuesto, que se inicia en la tolva de recepción del floculante en polvo. Esta etapa de preparación de floculante es automática y opera en ciclos discontinuos de aproximadamente dos horas totales, produciendo en cada ciclo 128 Kg de floculante preparado a la dilución requerida.

La tolva se alimenta manualmente por el operador, con la ayuda de grúas que le permiten descargar el polvo almacenado en sacos. Esta tolva, posee un agitador horizontal para el polvo accionado por un motor eléctrico, que evita la aglomeración en el cono de descarga y cuyo funcionamiento está enlazado con la operación del tornillo dosificador.

La tolva dispone de un *switch* de nivel bajo que activa una alarma, informando al operador de la necesidad de llenarla nuevamente con el floculante en polvo. Además puede detener el ciclo cuando el tornillo alimentador se encuentra funcionando o impedir su activación para un nuevo ciclo cuando se encuentra momentáneamente detenido.

El tornillo de descarga es accionado por un motor eléctrico independiente y es el encargado de transportar el polvo que se descarga desde la tolva. Este tornillo funciona en operación *batch*, comenzando a dosificar el floculante en polvo cuando el líquido que ingresa al tanque de mezcla, se encuentra sobre el nivel de las paletas del agitador, hasta un tiempo suficiente para alcanzar los 128 Kg por cada *batch*.

El soplador de aire, posee un tercer motor eléctrico independiente, y permite transportar neumáticamente el polvo hacia el humectador, realizando la mezcla aire-floculante mediante un equipo denominado “eductor”. La operación del soplador es también de tipo *batch*, y está determinada por el tiempo de operación del tornillo, agregando un minuto adicional antes de la partida del mismo y otro minuto después de su detención, con el objetivo de asegurar que todo el humectador y la línea posterior queden limpios de floculante.

El humectador mencionado, se encuentra instalado en la parte superior del estanque de mezcla y se encarga de unir la entrada de polvo proveniente del tornillo dosificador con otra entrada de flujo de agua fresca, cuya combinación produce la humectación del floculante.

El estanque de mezcla, también denominado estanque de preparación, posee una capacidad 50 m³ y un agitador de la solución accionado por un motor eléctrico. Cuenta con un medidor de nivel ultrasónico, que permite conocer al operador el nivel de líquido al interior del estanque y a su vez determinar los tiempos de activación y detención de la secuencia que prepara el floculante. Es decir, la activación de sus alarmas de nivel bajo-bajo, bajo, alto y alto-alto, determinan el funcionamiento del tornillo, el soplador y el humectador.

El ciclo de preparación, se inicia con un llenado rápido de agua hasta alcanzar un nivel sobre las paletas del agitador, en caso de ser necesario. Luego de ello se detiene el llenado rápido, y se inicia la preparación de la mezcla del polvo seco con agua en el humectador, con la respectiva activación del tornillo, hasta alcanzar la carga de floculante suficiente por *batch*. Un minuto después de iniciar el ingreso de polvo humectado, se abre la válvula de llenado rápido hasta alcanzar el nivel alto, tiempo que dura aproximadamente 40 minutos.

Una vez que se termina el proceso de mezcla de polvo con agua y se ha alcanzado el nivel alto en el estanque, se inicia la etapa denominada de humectación, durante la cual se mantiene encendido el agitador y tiene una duración aproximada de 45 minutos. Durante este período, se logra alcanzar una preparación completa del floculante, obteniendo una mezcla homogénea a la concentración recomendada de 3 g/L para su almacenamiento, que posteriormente será diluida a 0,2 g/L para su adición en el espesador de relaves.

Una vez terminada la preparación del floculante en el estanque de mezcla, se inicia la transferencia hacia el estanque de almacenamiento o dosificación, mediante una bomba de desplazamiento positivo, siempre que exista el espacio disponible para almacenar todo el *batch* preparado en el segundo estanque.

Por su parte el estanque de almacenamiento, con una capacidad de 250 m³, posee un agitador de solución mediante aire suministrado desde el fondo del estanque. Al igual que el estanque de mezcla, posee un medidor de nivel ultrasónico con alarmas asociadas a su medición, para controlar la transferencia de floculante y permitir al operador conocer la disponibilidad del compuesto para la operación.

Una vez que se dispone de floculante en el estanque de almacenamiento, se inicia la etapa de dosificación de acuerdo a los requerimientos de la planta. Para ello, existen dos pares de bombas de dosificación, diseñada para alimentar los espesadores de cobre y de relaves de la Planta 2 en "Las Tórtolas". Cada par de bombas de tipo desplazamiento positivo, considera una en funcionamiento y la otra *stand-by*.

Cada bomba dispone de su respectivo motor eléctrico con variadores de frecuencia, que permite ajustar el flujo de floculante alimentado dependiendo de las condiciones de operación. Como se mencionó anteriormente, en el caso del espesador de relaves, la adición de floculante se lleva cabo en función del tonelaje de mineral alimentado a la planta de flotación y de acuerdo a las condiciones de operación en el equipo. De esta forma, el flujo de floculante es directamente proporcional al mineral procesado en la planta, pero a su vez esta razón de proporcionalidad, puede ser ajustada por el operador dependiendo de la calidad de agua clara que se obtenga en el espesador.

Finalmente y antes de ser ingresado al espesador de relaves, el flujo suministrado por las bombas de distribución es diluido mediante la adición de agua en un mezclador en línea, que permite alcanzar una concentración de floculante de 0,02%. La adición de agua en este mezclador, se lleva a cabo de forma automática mediante un lazo de control independiente, que ajusta el flujo de agua ingresado de acuerdo al flujo distribuido por las bombas.

4.2 Identificación de Variables

La identificación de variables corresponde al reconocimiento de las mediciones disponibles en el espesador de relaves, que permiten determinar las condiciones de operación del equipo y aquellas lecturas asociadas a otros sectores de la Planta que puedan tener participación en las filosofías de operación y control en el espesamiento.

Con respecto a la instrumentación con que puede contar típicamente un espesador, de acuerdo a lo descrito en la Sección 3.3.2 del presente documento, el Espesador de Relaves de Planta “Las Tórtolas” dispone de mediciones de torque, presión de cama de lodos, nivel de interfase, flujo y densidad en las líneas de descarga (véase Figura 4.3). El detalle de los P&ID oficiales de la planta se pueden revisar en el Anexo C.

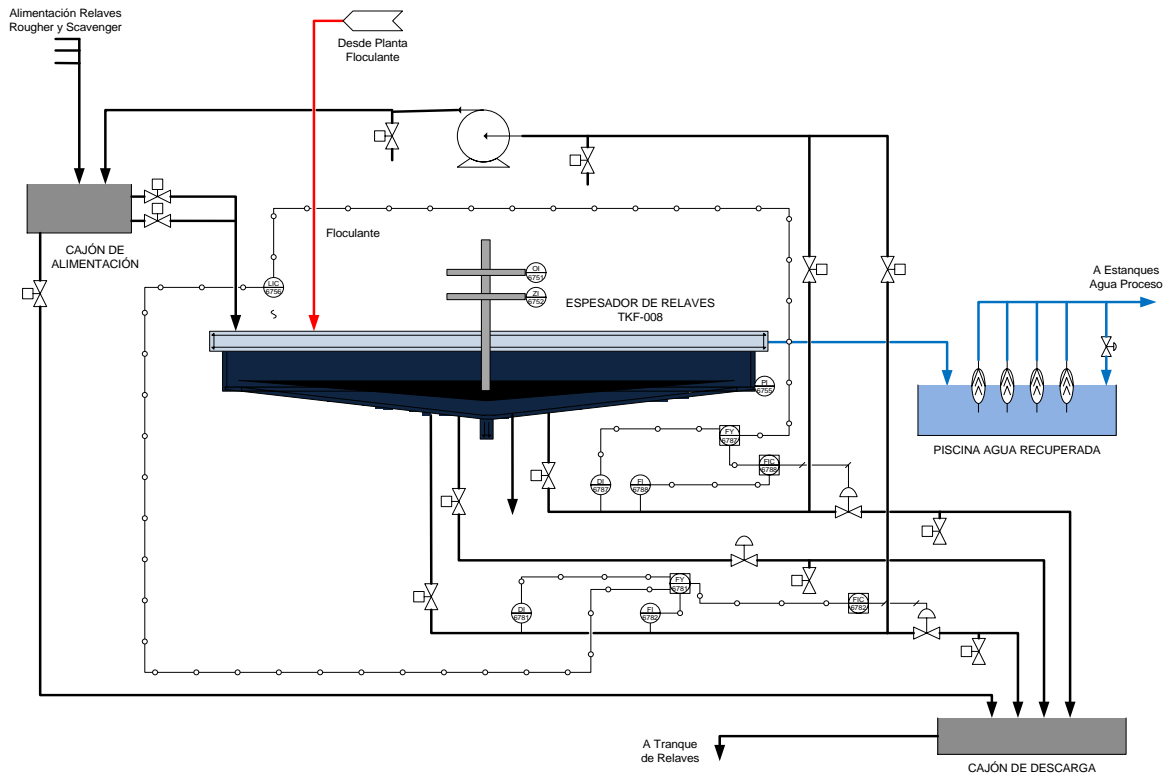
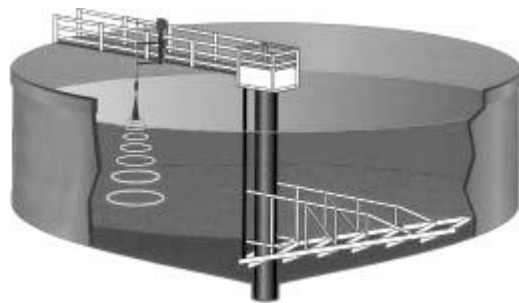


Figura 4.3 P&ID Simplificado Espesador de Relaves

Para monitorear el funcionamiento de las rastras al interior del equipo, el espesador de la planta cuenta con transmisores e indicadores que permiten medir la posición y el torque ejercido sobre las rastras. Las mediciones en terreno, se muestran mediante visualizadores numéricos de la marca *Precision Digital* modelo PD690-3-18, que conectados a los transmisores GP:50 modelo 315-A-RV, permiten conectar la señal de 4-20 mA a los sistemas de control de la planta, para información de los operadores.

El estanque también cuenta con un dispositivo de medición que permite conocer en línea, la altura donde se ubica la interfase de cama de lodos al interior del equipo. Para ello se encuentra instalado un sistema ultrasónico de la empresa Siemens modelo Milltronics InterRanger DPS300, diseñada especialmente para aplicaciones como está donde se requiere identificar el nivel de interfase en suspensiones líquidas, con un rango de operación entre 1 y 30 metros. Como se representa en la Figura 4.4, el soporte se encuentra instalado en el puente del espesador permitiendo sostener un sensor bajo la superficie de líquido, que envía pulsos sonoros de alta frecuencia a través del líquido hacia la profundidad del estanque. De esta forma, se generan ecos que regresan por un efecto de reflexión sobre la interfase, los cuales son capturados a través de sensores que forman parte de un sistema, que permite transformar el tiempo de viaje para cada pulso de sonido en una medición de distancia o nivel. La lectura de esta medición puede ser visualizada directamente en terreno o desde la sala de control a través de la conexión con la señal de salida de 4-20 mA del transmisor.



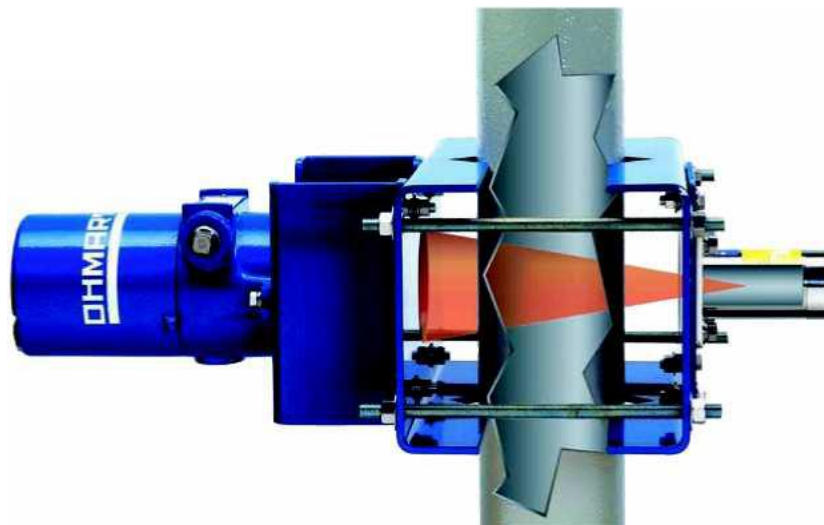
**Figura 4.4 Medidor de Interfase Milltronics
(Siemens Milltronics Process Instruments Inc., 2001)**

Por su parte el estanque del espesador de relaves, cuenta con una toma a la cual se conecta un transmisor de presión manométrica, que permite conocer la presión ejercida por la carga de sólidos en el fondo del equipo. Esta medición sirve como indicador para determinar el nivel de acumulación de sólidos por efecto de sedimentación y junto a la medición de torque en las rastras, permite controlar las condiciones de operación, para evitar una acumulación excesiva al interior del equipo.

Para la medición de la presión ejercida por la cama de lodos, se dispone de un transmisor de la marca Endress+Hauser modelo Cerabar S-PMP75 cuyo mecanismo de medición funciona gracias a una membrana de separación y al igual que el sensor de interfase, permite la visualización en terreno y remota (mediante conexión a la salida de 4-20 mA).

Otro indicador importante para analizar el proceso de sedimentación al interior del espesador, corresponde a los medidores de densidad instalados en las dos líneas principales de descarga del *underflow*. Para obtener la medición, se dispone de dos densímetros nucleares de marca Ohmart Vega, cuyo principio de funcionamiento está basado en el envío de señales de radiación. Para ello, un soporte de la fuente modelo SHLD1-200 y un detector modelo DSGD-A-AXH, se encuentran instalados en lados opuestos de la tubería, como se observa en la Figura 4.5.

Un isótopo de Cesio-137 corresponde a la fuente de radiación gamma que atraviesa la tubería hacia el detector (Ohmath Vega, 2011). Estos rayos gamma son amortiguados por la presencia de flujo sólido al interior de la cañería, de modo tal que el detector puede inferir la densidad de flujo, a partir de la cantidad de radiación recibida. El sistema interno del detector, consiste en un cristal de centelleo, que al recibir la radiación emite pulsos de luz, que se detectan a su vez por un tubo fotomultiplicador. Este tubo emite una señal proporcional al número de pulsos de luz recibidos, la que es procesada por monitores electrónicos del sistema generando una señal en la escala 4-20 mA para su lectura en sala de control, que se traduce en una lectura de densidad en el rango de operación del instrumento, 1,3 a 2,3 g/cm³.



**Figura 4.5 Medidor de Densidad Descarga Espesador
(Ohmath Vega, 2011)**

La importancia de los densímetros en la línea de descarga, no sólo radica en la capacidad de conocer la densidad de la pulpa, sino que al mismo tiempo permite identificar, el porcentaje de sólidos contenidos en la misma. Lo anterior, cuando las características del mineral transportado se mantienen estables, y por ende se pueden tener conocimiento de la densidad del mismo mineral ($\rho_{sólido}$). Con esta información y la lectura de densidad de la pulpa (ρ_{pulpa}) entregada por el instrumento, se puede obtener el porcentaje de sólidos en línea ($\%peso$), a partir de la relación que se muestra en la Ecuación 4-1 (Yianatos, 2005).

$$\frac{100}{\rho_{pulpa}} = \frac{\%peso}{\rho_{sólido}} + \frac{100 - \%peso}{\rho_{agua}} \quad (4-1)$$

Las dos líneas principales de descarga del espesador de relaves, también cuentan con medidores de flujo que permiten determinar la velocidad con la que se está retirando la pulpa concentrada a través de las líneas de descarga de 508 mm (20 pulgadas). La instrumentación utilizada para la medición de flujo de descarga corresponde a un sistema de la marca Khrono, que está formado por un sensor de flujo electromagnético modelo Optiflux 4300F y un convertidor de señal para este tipo de sensores, modelo IFC300F. El rango de operación de estos instrumentos se ubica entre 0 y 3000 m³/h.

Como se detalló en Capítulo 3.3.2, este tipo de medidores, genera un campo magnético por medio de una corriente, el que fluye a través de un par de bobinas de campo. En el interior de la tubería se genera una tensión, que es recogida por electrodos y es proporcional a la velocidad media del fluido y por ende el flujo volumétrico en la tubería. Finalmente el convertidor, se utiliza para amplificar la tensión de la señal, filtrarla del ruido existente y convertirla en señales electrónicas para su lectura y procesamiento.

Como se puede observar en la Figura 4.3, el diseño original del circuito de espesamiento de relaves, considera lazos de control que permiten ajustar el flujo de descarga por medio de válvulas, a partir de tres mediciones disponibles en el sistema: nivel de interfase, densidad de descarga o flujo de descarga. Dependiendo del criterio utilizado, y fijando un *setpoint* en alguna de estas variables se puede ajustar la abertura de estas válvulas de control tipo “*pinch*”, de marca Vulco modelo Sigma de 508 mm (20 pulgadas), mediante el accionamiento de actuadores instalados sobre ellas.

La importancia de los flujómetros en las líneas de descarga del espesador de relaves, radica en que además de conocer el flujo volumétrico de la pulpa, permite en combinación con la medición de densidad, monitorear en línea el flujo másico de mineral que se descarga del equipo. Lo anterior mediante el simple cálculo que se indica en la Ecuación 4-2. Junto a la

medición de flujo másico de pulpa y el porcentaje de sólidos entregado por el densímetro, es posible conocer además el flujo de sólidos que circula por la cañería, que entregan información muy relevante con respecto al balance metalúrgico en el espesador.

$$\text{Flujo volumétrico} \left[\frac{m^3}{h} \right] \cdot \text{Densidad de Pulpa} \left[\frac{ton}{m^3} \right] = \text{Flujo másico} \left[\frac{ton}{h} \right] \quad (4-2)$$

La misma combinación de mediciones de densidad y flujo, basado en el cálculo anterior, permiten determinar el flujo másico de sólidos que alimentan la planta de flotación y que representan una buena estimación del mineral alimentado al espesador. Esto último, debido a que la alimentación al equipo equivale a más del 95% del tonelaje de sólido que alimenta la planta, prescindiendo de un flujómetro y un densímetro adicional en la alimentación del espesador.

La calidad de ambos tipos de mediciones es fundamental, ya que determinan el contenido de sólidos en la alimentación al espesador y en la descarga por el *underflow*, estableciendo de esta forma, un balance de masa en el equipo, que es utilizado para el control operacional del mismo. De esta forma, la presencia de error en la lectura de cualquiera de ellas puede significar la toma de decisiones erróneas, por parte del operador o un sistema de control automático.

Además, la importancia de este parámetro en el control operacional del espesador de relaves, dice relación con la adición del floculante para favorecer la sedimentación de partículas, desde la planta de preparación y distribución del mismo (véase Figura 4.6). Como se explicó anteriormente en el Punto 4.1.2, el flujo de floculante que se agrega al espesador de relaves es proporcional a la medición del tonelaje de sólido que se alimenta a la planta de flotación, basado en la relación explicada en el párrafo anterior.

Por este mismo motivo, cualquier error o desviación en la lectura de densidad o flujo volumétrico de la alimentación a la planta, pueden generar una adición errónea de floculante al espesador de relaves. Reconociendo la importancia en la presencia de desviaciones en estas mediciones y la relevancia económica de este recurso, el sistema experto buscará minimizar la dosificación de floculante, en la medida que las condiciones del equipo lo permitan.

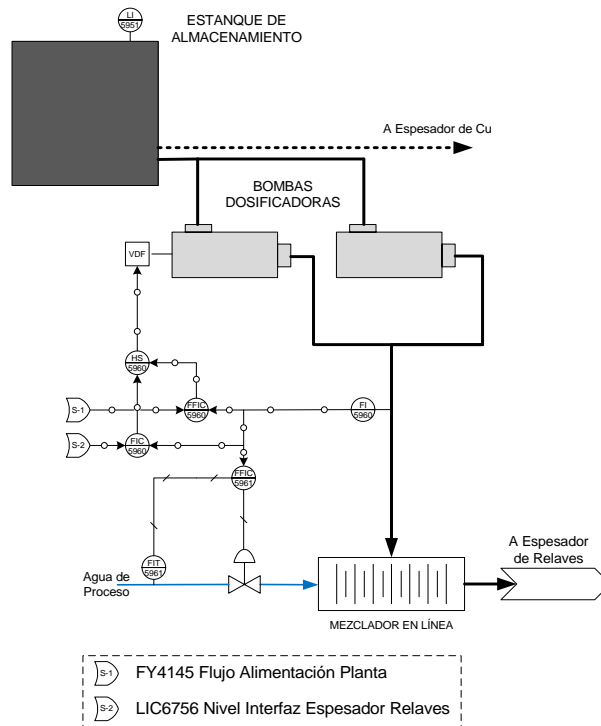


Figura 4.6 P&ID Simplificado Planta Distribución Floculante

De acuerdo a la configuración anterior, el sistema de distribución de floculante determina el flujo del compuesto preparado que debe ingresarse al espesador de relaves, mediante ajustes en los variadores de frecuencia que determinan la velocidad de trabajo de las bombas. La metodología de cálculo que se muestra en la Ecuación 4-3, se basa en la lectura de mineral sólido alimentado a la planta ($Alim_{sólido}$), la dosis proporcional ingresada por el operador ($Dosis$) y la concentración de 3000 g/m^3 con que se preparó el floculante ($Conc$). Por diseño existe además, un lazo independiente que permitiría ajustar el flujo de floculante, como recurso para controlar el nivel de interfase en el espesador.

$$\frac{Alim_{sólido} \left[\frac{\text{ton}}{\text{h}} \right] \cdot Dosis \left[\frac{\text{g}}{\text{ton}} \right]}{Conc \left[\frac{\text{g}}{\text{m}^3} \right]} = Flujo \text{ Floculante} \left[\frac{\text{m}^3}{\text{h}} \right] \quad (4-3)$$

La importancia de disponer de una correcta lectura de las variables en el espesador, dicen relación con asegurar el control operacional y evitar situaciones que puedan poner en riesgo el equipo o las líneas de proceso. En este sentido, las mediciones de torque, presión de cama, nivel de interfase y densidad en la descarga del espesador, son indicadores de la acumulación de sólidos generadas por el proceso de sedimentación de partículas.

Como se analizará más adelante, generalmente un aumento en una de las variables mencionadas, se acompaña de un aumento en todas las otras. En el caso que la densidad o el porcentaje de sólidos en la descarga del espesador sean excesivamente altos, se puede generar un fenómeno de “embancamiento” al interior de las tuberías. Este concepto, corresponde a la sedimentación de partículas dentro de las líneas y la consecuente obstrucción parcial o completa de las tuberías de descarga, cuya causa surge a partir de una baja razón entre la velocidad del flujo que circula y el contenido de sólidos que contiene. Por supuesto, es una situación de alto riesgo que pudiese obligar a detener la operación durante días o dañar seriamente parte de las instalaciones, por lo que una lectura correcta de las variables es fundamental para evitar estos escenarios. Para situaciones de emergencia, los espesadores cuentan con líneas de inyección de agua de operación manual, que permiten diluir la pulpa mediante su adición directa a las líneas de descarga del espesador.

Ahora bien, existe una situación similar de embancamiento al interior del espesador que puede poner en riesgo el equipo y sus estructuras, fenómeno cuya terminología en inglés se conoce como formación de *doughnut*, por el parecido de la forma en que se acumulan los sólidos en estos casos, con la rosquilla del mismo nombre. Un aumento en la medición de torque junto al descenso en la densidad de descarga del espesador, es generalmente un indicador de la formación de *doughnut*, que corresponde a la acumulación excesiva de sólidos en el fondo del tanque y alrededor de la descarga, sin que estos evacuen por las líneas del *underflow*.

El problema en estos casos, se reduce a romper la tendencia a este embancamiento interior del equipo antes que ponga en riesgo el sistema de rastras o se produzca su detención de emergencia por altos niveles de torque. La ocurrencia de este fenómeno de embancamiento, puede obligar a detener la alimentación al espesador ya que agregar más sólidos podría agravar la situación, además de procedimientos de emergencia como la inyección de aire a presión dentro del equipo, a través de conexiones existentes para estos casos, rompiendo la acumulación y permitiendo su descarga. Es importante recalcar, que las situaciones de embancamiento mencionadas son situaciones de extrema emergencia, que escapan de la operación normal dentro de los márgenes establecidos como seguros para cada una de las variables de proceso y por ende no deben presentarse mientras se ejecute un correcto control del equipo acompañado de mediciones confiables para cada instrumento.

El listado completo de las variables disponibles en la operación del espesador de relaves se muestra en la Tabla 4.3. En ella, se indican los tags utilizados para identificar cada una de las variables descritas anteriormente, tanto en la plataforma DCS I/A *Series System*® para monitoreo y control operacional, como su análogo para registros y análisis históricos por

medio de las herramientas de PI System®. El detalle completo de todos los tags de la planta y los asociados a la implementación del sistema experto se pueden revisar en el Anexo D.

Tabla 4.3 Variables de Proceso Espesamiento de Relaves

INSTR.	DESCRIPCIÓN	TAGS DCS	TAGS PI
OI6751	Torque Espesador Relave	920TKF008:OI6751.PNT	T2:920.OI6751.PNT.FOX
PIC6755	Presión Cama Lodos Espesador Relave	920TKF008:PIC6755.MEAS	T2:920TMH008:PIC6755.FOX
LIC6756	Interfase Cama Lodos Espesador Relave	920TKF008:LIC6756.MEAS	T2:920TMH008:LIC6756.FOX
DIC6787	Sólidos Descarga Esp. Relave Línea 1	920TKF008:DIC6787.MEAS	T2:920TKF008.DIC6787.OUT.FOX
FIC6788	Flujo Descarga Esp. Relave Línea 1	920TKF008:FIC6788.MEAS	T2:920.FIC6788.MEAS.FOX
DIC6781	Sólidos Descarga Esp. Relave Línea 2	920TKF008:DIC6781.MEAS	T2:920TKF008.DIC6781.OUT.FOX
FIC6782	Flujo Descarga Esp. Relave Línea 2	920SUL005:FIC6782.MEAS	T2:920.FIC6782.MEAS.FOX
FIC5960	Dosis de Floculante a Espesador Relave	550ZMF001_16:FIC5960CA.RI03	T2:550ZMF001_16:FIC5960.RI03.SP.FOX
TPH4146	Tonelaje Alimentación Planta	510LAL032:TPH4146.PNT	T2:510LAL032:TPH4146INST.PNT.FOX
Variables Monitoreo			
ZI6752	Nivel de Rastras Espesador Relave	920TKF008:ZI6752.PNT	T2:920.ZI6752.PNT.FOX
DT6787	Densidad Descarga Esp. Relave Línea 1	920TKF008:DT6787.OUT	T2:920.DIT6787.OUT.FOX
FI6788	Flujo másico Sólidos Descarga Esp. Línea 1	920TKF008:FI6788.PNT	T2:920TKF008:FI6788.PNT.FOX
ZI6788	Abertura válvula control Desc. Esp. Línea 1	920TKF008:ZI6788.OUT	T2:920.ZI6788.OUT.FOX
DT6781	Densidad Descarga Esp. Relave Línea 2	920TKF008:DT6781.PNT	T2:920.DIT6781.OUT.FOX
ZI6782	Abertura válvula control Desc. Esp. Línea 2	920SUL005:ZI6782.OUT	T2:920.ZI6782.OUT.FOX
FIC6785	Abertura válvula control Desc. Línea Respaldo	920SUL005:ZI6785.OUT	T2:920SUL005:ZI6785.FOX
TPH_6781	Flujo másico Pulpa Descarga Esp. Línea 2	920TKF008:TPH_6781.PNT	T2:920TKF008:FI6782.PNT.FOX

Cada una de las variables mencionadas en la tabla anterior, corresponden a mediciones directas de instrumentos o cálculos derivados de ellas, que otorgan una gran importancia a la calidad de su lectura cuando son utilizados en el control operacional del espesador de relaves y al mismo tiempo, para evitar situaciones de riesgo que pongan en peligro la operación.

Si bien en la planta se cuenta con pautas para la mantención de estos instrumentos, en algunos casos pueden presentar deficiencias cuando se requiere de la confiabilidad en las mediciones, pensando en su aplicación en sistemas de control más complejos, comprometiendo la información que se recibe desde la operación.

De este modo, las pautas de mantenimiento periódicas (mensuales o semestrales), están enfocadas principalmente en la revisión del funcionamiento en aspectos de instalación o limpieza de transmisores y sensores, lo que no necesariamente asegura la calidad de la medición que se entrega. Pudiese existir así, una desviación u errores significativos en la medición poniendo en riesgo las decisiones en la operación, que se basan precisamente en estas lecturas. Calibraciones que aseguren la calidad de las mediciones, no forman parte de estas pautas de mantención u ninguna otra existente, por lo que labores de este tipo son generalmente solicitadas por los operadores de control, cuando las fallas son demasiado evidentes efectuando un trabajo de mantención correctivo. De este modo, la implementación de un sistema de control experto requerirá necesariamente, de ejecutar acciones de calibración, previo a la puesta en marcha y en periodos posteriores.

A modo de ejemplo, las siguientes indicaciones corresponden a la pauta mensual de los flujómetros magnéticos en la descarga del espesador de relaves, donde claramente no se asegura la calidad de la medición que entrega el equipo. Algo similar, ocurre con las pautas semestrales de este y otros instrumentos, algunos de los cuales se pueden revisar en el Anexo E, del presente documento.

Flujómetro Magnético

1. Inspeccionar sujeción y accesorios de fijación de transmisor.
2. Inspeccionar información de la medición a través de *display*, verificar con sala de control.
3. Inspeccionar estado de sensor (limpieza).
4. Inspeccionar que sensor no presente fuga, y se encuentre fijado según norma.

5 Diseño del Sistema de Control Experto

La elaboración del Sistema Experto para el Espesador de Relaves de la Planta 2 en “Las Tórtolas”, se basó en el diseño de una “Lógica de control”, que permita su posterior implementación en el equipo y que consistió en la planificación, investigación y creación de una estructura de reglas, que formarán el motor de inferencia del sistema.

5.1 Metodología de Desarrollo del Sistema

A partir de la propuesta de etapas de desarrollo de un sistema experto, detalladas en la Sección 2.3.1 del presente documento, y aplicándolas a las condiciones que contextualizan la Planta 2 en “Las Tórtolas”, se elaboró una planificación basada en tres etapas, según se muestra en la Figura 5.1. Cada una de ellas, incorpora una serie de objetivos según se detallan a continuación.

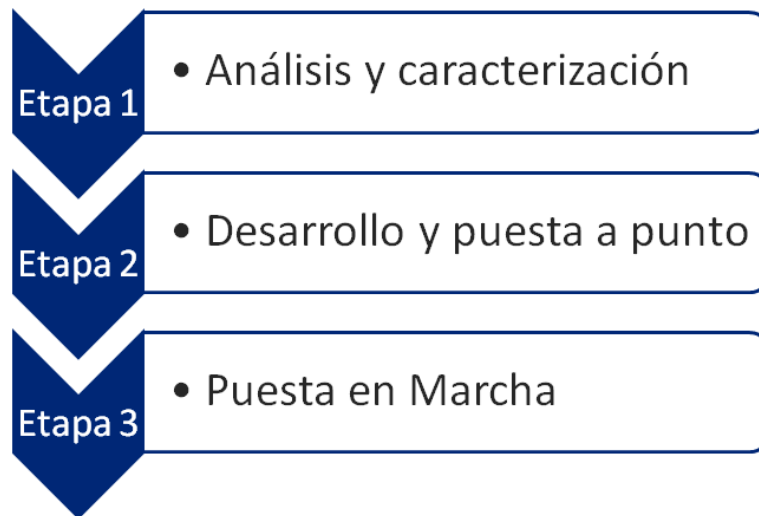


Figura 5.1 Planificación Sistema Experto Espesador de Relaves

La Etapa 1 de Análisis y Caracterización, agrupa todos aquellos objetivos que buscan obtener la base del conocimiento. De este modo, se llevan a cabo las investigaciones necesarias para adquirir el conocimiento, como información efectiva y heurística, según lo descrito en la Sección 2.3.1 del presente texto.

En el primer caso, se hace una comparación y evaluación de las alternativas de control existentes en la industria minera, para la operación con distintos tipos de espesadores. Con respecto al conocimiento de tipo heurístico, se lleva a cabo un estudio de las “Filosofías de Operación” por parte de los operadores de sala de control, que son los encargados de operar

el espesador de relaves. Este concepto de “Filosofías de Operación”, hace referencia a los procedimientos que utiliza cada uno de los operadores, para mantener el control del equipo dentro de los rangos permitidos.

Desde el punto de vista de la caracterización, en esta primera etapa se identifican todas las variables de proceso involucradas en la operación del espesador de relaves. Junto con la identificación de variables, se hace un levantamiento de los equipos y la instrumentación disponible, además de analizar el estado actual de cada una de las mediciones.

La segunda etapa y más larga en términos del tiempo necesario para cumplir los objetivos, corresponden al “Desarrollo y Puesta a punto”. El desarrollo comprende la organización del conocimiento adquirido en la etapa anterior, mediante la elaboración de una estructura de razonamiento, que en adelante se denomina Lógica de Control. Esta estructura, es una secuencia de reglas lógicas que forman el motor de inferencia del sistema, basada en la experiencia de los operadores del espesador y los procedimientos de manejo en estos equipos.

Este desarrollo de la lógica de control, incluye además la identificación de situaciones especiales que se pueden presentar en la operación del equipo, y que se incorporan como tal en la estructura diseñada. La combinación de todo el conocimiento disponible con respecto a la operación del equipo y las situaciones especiales que puedan ocurrir, dan lugar a la elaboración de una propuesta de Lógica de Control del Sistema Experto, que posteriormente deberá ser programada como un prototipo y evaluada previo a su implementación.

Esta segunda etapa, incluye en forma paralela la preparación del área de espesamiento de relaves, para la futura implementación del sistema experto. Esta preparación, considera la revisión y calibración de cada uno de los instrumentos disponibles en el área, para asegurar la correcta medición de las variables involucradas y llevar a cabo las modificaciones pertinentes. Estos procedimientos, requieren de la coordinación y planificación con personal de Mantenimiento de la planta.

Finalmente, una tercera etapa de puesta en marcha, comprende desde la programación del sistema diseñado, hasta la entrega final del proyecto. Junto a la programación sobre la plataforma DCS disponible en la planta, se llevan a cabo las pruebas del prototipo, para asegurar que el método de razonamiento funciona de acuerdo a lo esperado y que el diseño elaborado, es capaz de mantener la operación del espesador de forma automática. Estas pruebas, consideran la sintonización de parámetros y la modificación de reglas, dependiendo de los resultados preliminares obtenidos durante la puesta en marcha.

5.2 Filosofías de Operación

En la operación del espesador de relaves, el criterio fundamental es la recuperación de agua, pudiendo oscilar el porcentaje de sólidos a la descarga en el *underflow* dentro de ciertos márgenes sin mayor dificultad, siempre y cuando se aseguren las condiciones para evitar embancamiento en el espesador o en alguna de sus líneas.

Las principales variables a controlar en la operación con este espesador son torque, presión de cama de lodos, nivel de interfase y porcentaje de sólidos en la descarga. Variables que se ven afectadas principalmente, por el tonelaje de alimentación a la planta y las características del mineral. El control de las variables de este circuito de espesamiento, se lleva a cabo desde la sala de control principal de Planta “Las Tórtolas”.

Como se explicó anteriormente, el circuito de espesamiento mantiene al equipo operando con dos líneas de descarga abiertas, mientras que la tercera línea está destinada a ser utilizada como respaldo para labores de mantención. Esta tercera línea de descarga no cuenta con medidores de flujo ni densidad, por lo que en caso de ser necesario su uso, debe ser controlada de forma manual desde la sala de control, tomando como referencia la información entregada por la línea principal que continúa en operación.

Para asegurar la correcta operación del espesador y evitar el embancamiento en su interior, la presión de cama de lodos debe mantenerse en un rango entre 98 – 110 kPa con valores de torque que no excedan un 15% (valores basados en criterios de diseño y ajustados según la experiencia en la operación). Se debe considerar que desde mediciones de torque de un 50%, se activará el sistema automático de protección de rastras, independiente de las condiciones de operación existentes.

Tanto la presión de la cama de lodos, como el porcentaje de torque en el espesador, pueden ser ajustados mediante la modificación en el flujo de descarga del mismo, evitando su disminución a valores inferiores a 1800 m³/h en cada línea por peligro de embancamiento en las mismas. Por esta misma razón, se recomienda que el sólido en las líneas de descarga no exceda un 62%.

Un aumento en el flujo de descarga del espesador genera una disminución en el torque y en la presión de cama de lodos, y viceversa. Asociada a esta disminución en la presión de cama, se observará una disminución en el porcentaje de sólidos en la descarga del espesador, cada vez que se aumente el flujo de estas líneas.

De acuerdo a lo señalado en la descripción de la planta de floculante, la adición de este compuesto es controlada de forma automática y proporcional al flujo de sólidos en la alimentación a la planta de flotación.

Para ello es necesario que el operador de la sala de control, entregue el valor de la proporción para el consumo del compuesto, en términos de gramos de floculante por cada tonelada de sólidos ingresado a la planta. Esta proporción o dosis, la podrá ajustar dependiendo de la calidad del agua recuperada, el nivel de la interfase y en forma opcional, para ajustar el porcentaje del sólido de descarga del equipo. Esta dosis de floculante debiese ajustarse en torno a los 15 g/ton (criterio de diseño), pudiendo ser modificada en un rango de entre 12 a 18 g/ton.

Dependiendo de algunos factores como características de la alimentación, puede aumentar o disminuir el porcentaje de sólidos en la descarga, afectando la cantidad de agua recuperada por el *overflow*. En el caso de tener una tendencia continua (alza o baja) puede modificarse paulatinamente el *setpoint* del flujo de descarga, siempre que las demás condiciones de operación del espesador lo permitan.

En caso de un aumento en el tonelaje de alimentación de la planta, se podrá observar un aumento en la carga del espesador, reflejándose al mismo tiempo como un aumento en el torque y en la presión de cama de lodos, por lo que se debe aumentar proporcionalmente la descarga del espesador, para equilibrar el balance de materia en el equipo, restablecer las condiciones de operación y con ello asegurar la correcta recuperación de agua por el *overflow*. Se debe tener presente además, que se recomienda no sobrecargar las líneas de descarga del espesador, evitando superar los 2500 m³/h en cada una.

Adicionalmente, el operador de la sala de control debe tener permanente visualización sobre dos variables asociadas al proceso espesamiento. La primera de ellas, corresponde al nivel del estanque de almacenamiento de floculante, debido a que dependiendo de la dosis utilizada y el tonelaje de alimentación a la planta, puede generarse un consumo superior a la capacidad de preparación de la planta de floculante. La segunda variable a observar, corresponde al nivel de la piscina de agua recuperada, la que puede entregar información al operador con respecto al flujo de agua clara que se obtiene en el *overflow*.

De esta forma, los principales cuidados operacionales con respecto al espesador de relaves, pueden resumirse según se muestra en la Tabla 5.1.

**Tabla 5.1 Cuidados Operacionales Espesamiento de Relaves
(Bechtel Chile, 2008)**

Descripción	Tipo	Observación
Bajo porcentaje de sólidos descarga <i>underflow</i>	Condición de proceso	Se requiere disminuir el flujo de descarga y/o aumentar la dosis de floculante.
Alto porcentaje de sólidos descarga <i>underflow</i>	Condición de proceso crítica	Existe riesgo de embanque en el espesador y en sistema de transporte a tranque de relaves. Se requiere abrir válvulas de descarga y/o disminuir dosis de floculante.
Aumento torque espesador	Condición de proceso crítica	Existe riesgo de embanque en espesador. Se requiere abrir válvulas de descarga y se activa levante de rastras.
Pérdida calidad de agua por alta presencia de sólidos	Condición de proceso	Existe riesgo de daño en equipos de bombeo y aumento de desgaste por abrasión en líneas de distribución de agua. Se requiere aumentar la dosis de floculante.

Situaciones particulares identificadas con respecto a la operación del espesador, como por ejemplo un “*batch* de agua” en la alimentación a planta, serán analizadas en las siguientes secciones, como parte de la operación del sistema experto.

5.3 Reglas Lógicas

La elaboración de la lógica de control experto que se explica a continuación, está basada en los criterios de diseño y operación por parte de los operadores del espesador de relaves. Su estructura está establecida en reglas lógicas que determinan las acciones a seguir de modo automático, a partir de la información entregada por las variables disponibles en el equipo.

En términos generales, la lógica de control propuesta consta de una columna principal, que permite revisar la normalidad de las condiciones de operación del espesador. A su vez ésta columna, fue ordenada por prioridades de acuerdo a las filosofías de operación explicadas en la Sección 5.2.

De esta forma, la primera prioridad es tener un equilibrio en el balance de materia del espesador, el cual se asegura mediante la revisión de las mediciones de torque, presión de cama de lodos y nivel de interfase del equipo. Si algunas de estas variables no se encuentra dentro del rango permitido, la lógica determinará cuáles son las medidas necesarias a seguir para corregir este desequilibrio.

Para determinar las medidas necesarias, la lógica debe ser capaz de reconocer la capacidad del sistema de ejecutar alguna acción dentro de los márgenes permitidos, para aquellas variables que se usan como recurso de control: flujo de descarga y dosis de floculante.

Luego se procede a ajustar el control de porcentaje de sólidos en la descarga del espesador, en caso de estar fuera de un rango óptimo. Se realizarán las modificaciones necesarias, sólo después de haber asegurado el equilibrio de las variables de primera prioridad y buscando generar el mínimo efecto sobre ellas.

Finalmente, si todas las variables revisadas se encuentran dentro de un rango óptimo, se mantendrán las condiciones actuales, y se procederá a una nueva revisión, hasta que las condiciones de proceso requieran de alguna acción por parte del sistema experto.

La lógica completa del sistema de control experto, se expresa como un encadenamiento de reglas lógicas, como se muestra en la Figura 5.2. La columna principal (izquierda) que revisa la normalidad de las condiciones de operación en el equipo, determina las acciones automáticas a seguir en caso de la desviación de alguna variable. Estas acciones pueden significar un cambio en el *setpoint* de los recursos para controlar la operación del espesador, o la activación de alarmas para el operador en situaciones muy particulares, que escapen de la operación normal para la cual fue diseñado el equipo.

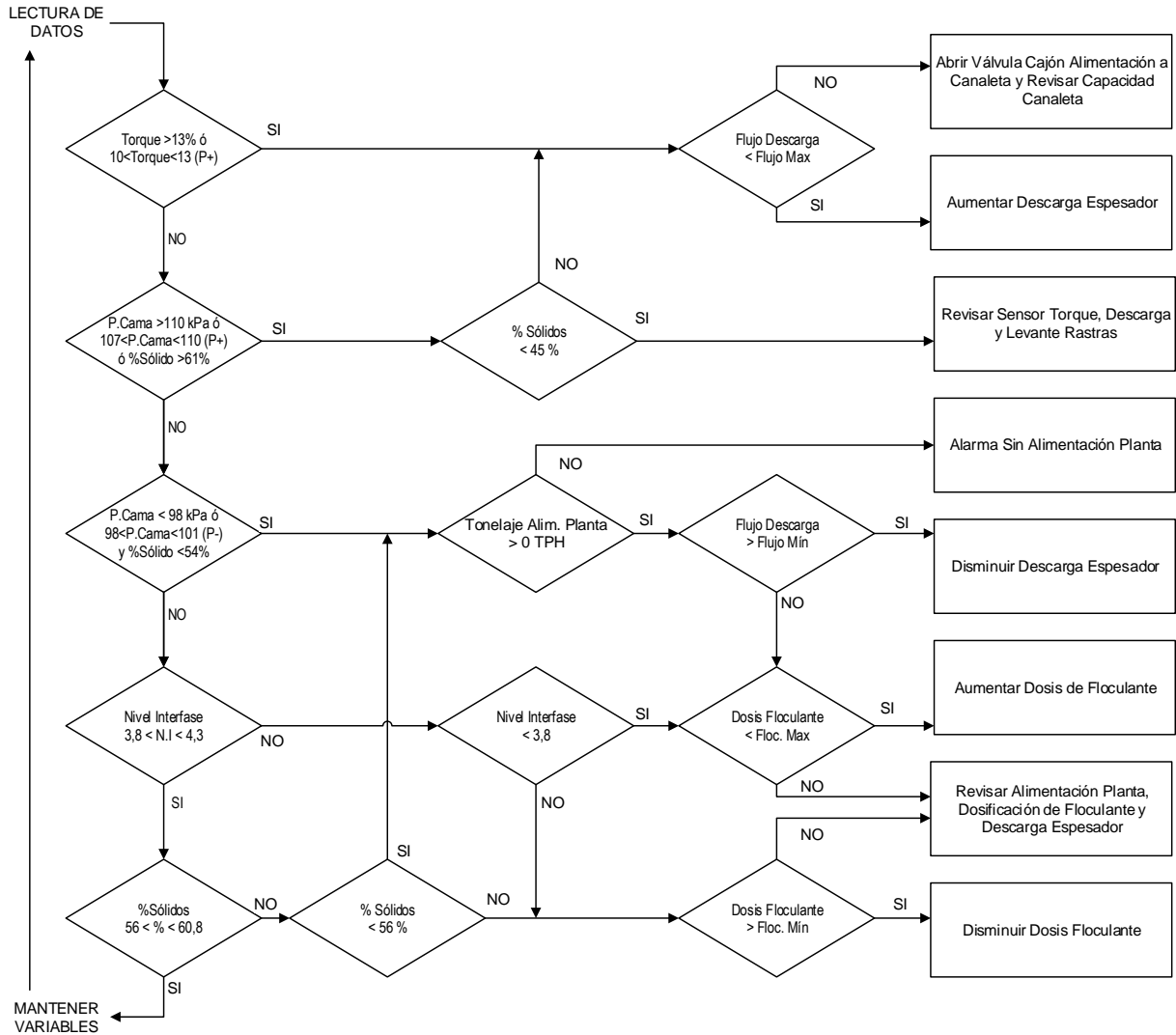


Figura 5.2 Lógica de Control Sistema Experto

En la primera etapa de revisión de la lógica de control, se busca evitar situaciones de riesgo en la operación del espesador, vinculadas a alto torque y/o presión de la cama por la acumulación de sólidos dentro del equipo, que pueden generar un embancamiento del mismo y representan un peligro de dañar el sistema de rastras.

Para ello se evalúan los valores de torque y presión de la cama de lodos, para que en caso de estar sobre los límites recomendados (torque > 13% y presión > 110kPa) o con una tendencia al alza medida como una pendiente positiva (P+) antes de alcanzar los límites recomendados, se pueda revertir esta situación mediante un aumento del flujo de descarga del espesador, exceptuando situaciones especiales que deben ser identificadas por la lógica de control.

Es importante considerar que este análisis del sistema experto y todos los siguientes, toman sus decisiones a partir de señales filtradas de la lectura de cada instrumento, con el objetivo de evitar posibles errores asociados a la presencia de ruido en la señal original. En el caso particular de aquellas reglas que incluyen un análisis de pendientes, una señal sin filtro podría incluso desencadenar una respuesta equivocada por parte del sistema bajo ciertas condiciones.

En los casos de las mediciones de torque y presión de cama, se ha incorporado un rango de acción previo a la superación del máximo valor permitido, que determinará la ejecución de respuestas con el objetivo de quebrar tendencias al alza en ambas mediciones. Es por ello, que la lógica establece un rango que activa las reglas cuando adicionalmente a la medición, se detecta una pendiente positiva (P+) de la variable leída, para lo cual el sistema compara el valor actual de la medición filtrada con un valor guardado 20 minutos atrás.

Entonces para una variable filtrada X , si la diferencia entre $(X_t - X_{t-20})$ es mayor a $\epsilon_1 \rightarrow 0^+$, el sistema declarará la pendiente como positiva y activará la regla para el rango establecido, mientras que en caso contrario la regla no será activada; donde ϵ_1 es un valor positivo cercano a cero, que permite asegurar una pendiente claramente positiva, frente a variaciones que son insignificantes en términos de cambio para la operación. Este análisis se utiliza tanto para las reglas de alto torque como presión de cama de lodos, pero en el caso de la segunda, se utilizará de forma análoga para las reglas de tendencias a la baja, que utilizan la pendiente negativa (P-) como criterio de razonamiento.

El comportamiento de la variable de presión de cama, está directamente relacionado a su símil de porcentaje de torque, debido a lo cual, la corrección de este último debe mantener una presión dentro de los rangos permitidos. El motivo para evaluar inicialmente el porcentaje de torque, se debe a que las pruebas preliminares demostraron, que el torque tiende a reaccionar con mayor retardo, frente a un aumento en la descarga del espesador, tal como se observa en la Figura 5.3. En ella se puede apreciar que pese al cambio en el flujo de descarga (t_1), el torque continúa aumentando durante varios minutos, mientras que la presión de la cama comenzaba a disminuir, de forma casi inmediata.

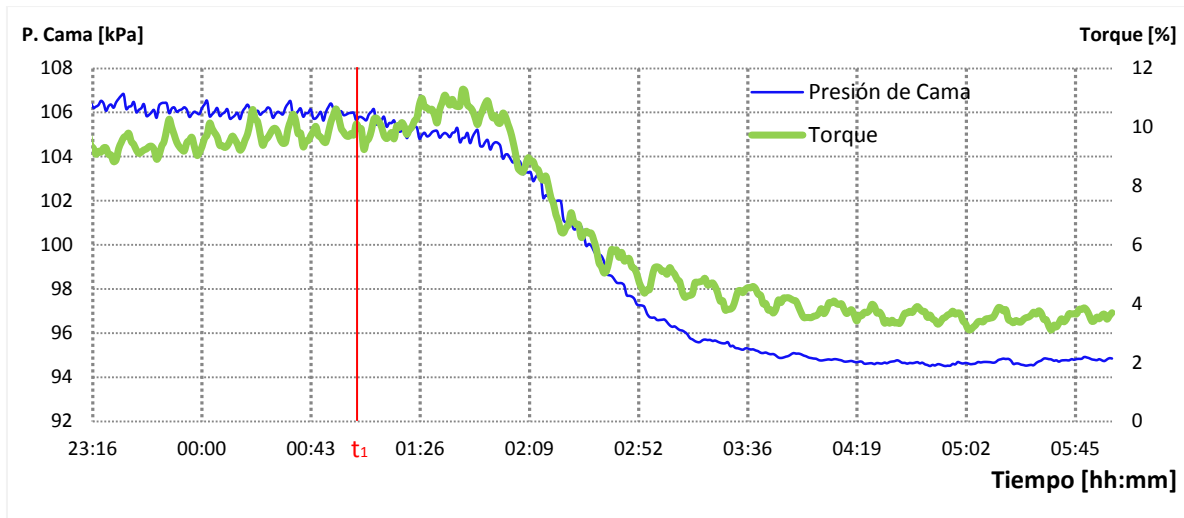


Figura 5.3 Respuesta de Variables ante Aumento de Flujo de Descarga

El análisis físico que explica el comportamiento de ambas variables, tiene relación con la acumulación de sólidos al interior del espesador y por ende con el perfil de concentración de sólidos a lo alto del equipo. Pese a que ambos entregan información del contenido de sólidos dentro del estanque, se debe tener presente, que la medición de torque es un indicador de la fuerza necesaria para permitir el giro de las rastras, las cuales transportan los sólidos sedimentados que se ubican en la zona de compactación, en el fondo del equipo. Mientras que por otra parte, dada las características de un espesador, la presión de la cama medida en el fondo del tanque es una representación del inventario de sólidos en todo el equipo.

Considerando lo anterior, se entiende que la medición de torque es una representación más sectorial de la acumulación de sólidos, mientras la presión de cama de lodos muestra de forma más integral el contenido de sólidos en todo el equipo. Por ello, un aumento en el flujo de descarga del espesador, muestra en forma inmediata la respuesta en la variable de presión de la cama debido a la disminución en el inventario de sólidos, mientras que el efecto en el porcentaje de torque se refleja recién cuando la zona de compactación, reduce su resistencia a causa de la menor sedimentación de partículas.

Ahora bien, la razón para evaluar ambas variables y no solamente la de torque, radica en la importancia ya mencionada de no exceder los límites superiores para estas variables. Bajo esta lógica, ante una eventual falla en la medición de porcentaje de torque, se asegurarán las condiciones óptimas mediante la revisión de presión de la cama, evitando un inminente embancamiento.

Desde otro punto de vista, el motivo para incorporar rangos previos de acción para porcentaje de torque y presión de cama de lodos, acompañados de un análisis de la pendiente en sus respectivas mediciones, tiene relación con información de tipo heurística respecto al conocimiento en la operación con el espesador de relaves. En este sentido, la experiencia de los operadores y la observación durante el control de tipo manual, indican que las dos variables mencionadas requieren de un mayor esfuerzo para modificar tendencias, en términos de la ocupación de los recursos disponibles. En otras palabras, resulta más complejo ajustar estas dos variables cuando escapan de los rangos deseados de operación, en comparación a otras variables como nivel de interfase o porcentaje de sólidos en la descarga, que reflejan rápidamente el efecto de una modificación en los recursos de control.

Adicionalmente, estas primeras reglas en la lógica de control buscan asegurar el balance de materia en el espesador, con lo que se espera mantener todas las variables dentro de sus rangos deseados. De esta forma, las próximas reglas serán sólo un mecanismo de optimización de la operación, por lo que las revisiones de nivel de interfase o porcentaje de sólidos no incorporan un análisis de pendientes.

Como se mencionó anteriormente y se observa en la Figura 5.4, la lógica de control debe reconocer situaciones particulares que no son habituales, pero pueden ocurrir durante la operación. Una de ellas, es precisamente la mencionada falla en la medición de torque y que será detectada por un aumento significativo en la presión de la cama del espesador.

La acción a seguir, corresponde a un aumento en el flujo de descarga del equipo, excepto si el porcentaje de sólidos de las mismas líneas, está muy por debajo de lo recomendado (<45%), lo que sería indicador de un eventual peligro de embancamiento interior del espesador. Como se explicó en la Sección 4.2, este fenómeno conocido como formación de *doughnut* es una situación que escapa de la operación normal y requiere de procedimientos de emergencia que eliminen el peligro. Ante este escenario, que se deduce de una alta presión de la cama acompañada de bajo porcentaje de sólidos en la descarga, se generará una alarma en pantalla que indique la necesidad de revisar el sensor de torque, y estar atento a la necesidad de un levante de rastras.

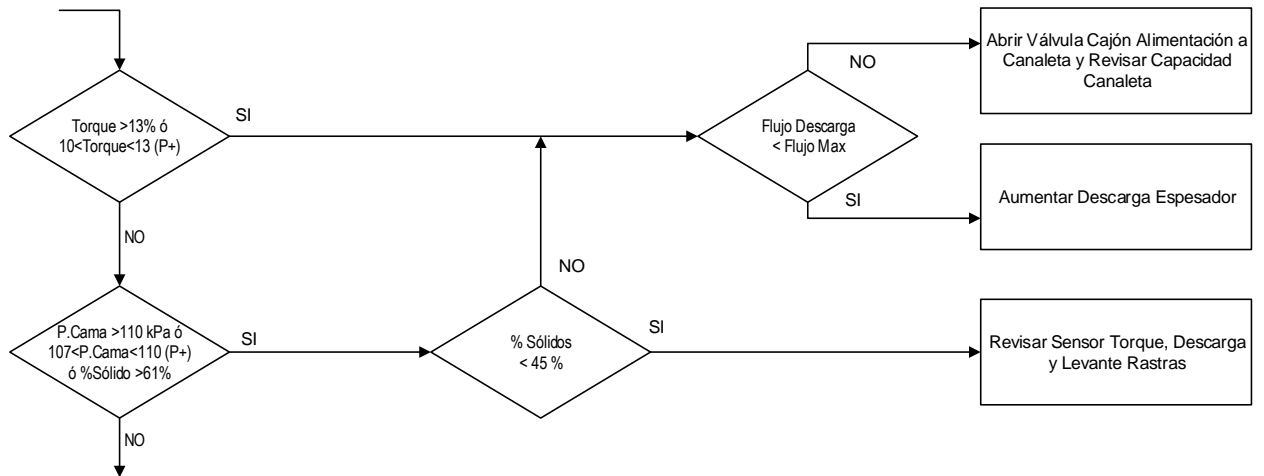


Figura 5.4 Primera Fase Lógica de Control

Por otra parte, si ya se alcanzó el flujo máximo de descarga en las líneas, se tratará de una situación especial de sobrecarga del espesador, por lo que se activará una alarma al operador para evaluar una posible desviación de la carga sin espesar y además, revisar la capacidad de la canaleta que lleva el flujo hasta el tranque de relaves de la planta.

Junto a las revisiones de elevados porcentaje de torque y presión de cama de lodos, se incorpora una tercera condición relacionada con un excesivo porcentaje de sólidos en la descarga del *underflow*. Lo anterior, reconociendo que para valores superiores al 61% de sólidos, puede generarse una condición de riesgo para la operación, que debe ser corregida oportunamente.

Terminada esta primera fase de análisis, se continúa con la revisión de las demás variables para asegurar un correcto balance en el equipo y posteriormente ajustar el porcentaje de sólidos en la descarga, mejorando así la recuperación de agua en el *overflow*, en la medida que las condiciones del proceso lo permitan.

De modo similar a lo realizado anteriormente, la secuencia lógica procede a revisar si la presión de la cama esta bajo el valor mínimo recomendado o con una tendencia a la baja en un rango previo, la cual se determina mediante el cálculo de la pendiente en la medición. Su estimación se lleva a cabo, mediante la diferencia descrita anteriormente para una variable filtrada X , donde si $(X_t - X_{t-20})$ es menor a $\varepsilon_2 \rightarrow 0^-$, se declara una pendiente negativa; donde ε_2 es una valor negativo cercano a cero, que permite asegurar una pendiente claramente negativa, frente a variaciones que son insignificantes en términos de cambio para la

operación. En caso de cumplirse alguna de las dos condiciones, se procede a disminuir el flujo de descarga del espesador o bien aumentar la dosis de floculante en caso que el primer recurso se encuentre agotado. Todo ello, siempre que el porcentaje de sólidos sea inferior a un 54% en la descarga, pues en caso contrario no es necesario ejecutar ningún tipo de acción, dado que se alcanza la concentración de sólidos deseada. En el caso particular, que no se pueda disminuir más el flujo de descarga del equipo o aumentar la dosis de floculante, se generará una alerta preventiva, para revisar la correcta operación de las líneas de descarga, la planta de floculante y realizar un análisis de la alimentación a la planta.

Este último análisis, considera el caso particular de una disminución significativa en el tonelaje de alimentación. Otra situación particular representa el ingreso a la planta de un “*batch*” de agua, correspondiente a un flujo que no contiene sólidos. Para su detección, el sistema se asegura que exista tonelaje de alimentación a la planta, para lo cual el sistema experto incorpora en su análisis las mediciones asociadas al densímetro y flujómetro, instalados al término del mineroducto, que transporta la pulpa desde molienda y alimenta la planta de flotación.

La combinación de ambas mediciones permite determinar el flujo de sólidos que alimenta la planta de flotación y es una buena representación del mineral que alimenta el espesador de relaves, del mismo modo que se usa para la adición de floculante, según se detalló en la Sección 4.2. En caso que el tonelaje de sólidos alimentados a la planta sea nulo, alerta al operador para tomar las medidas correspondientes como detener momentáneamente la operación del experto, detener la planta de floculante y eventualmente cerrar completamente la descarga del espesador para recuperar toda el agua (de acuerdo a los procedimientos operacionales para estos casos).

Con las revisiones realizadas hasta el momento se evitan situaciones de riesgo por sobrecarga en el espesador o embancamiento en las líneas, asegurando un balance de materia en el equipo dentro de los rangos permitidos.

Como se muestra en la Figura 5.5, las siguientes reglas de esta segunda fase buscan asegurar la correcta recuperación de agua por el overflow, junto con optimizar el porcentaje de sólidos obtenido en la descarga, mejorando de este modo el rendimiento del equipo.

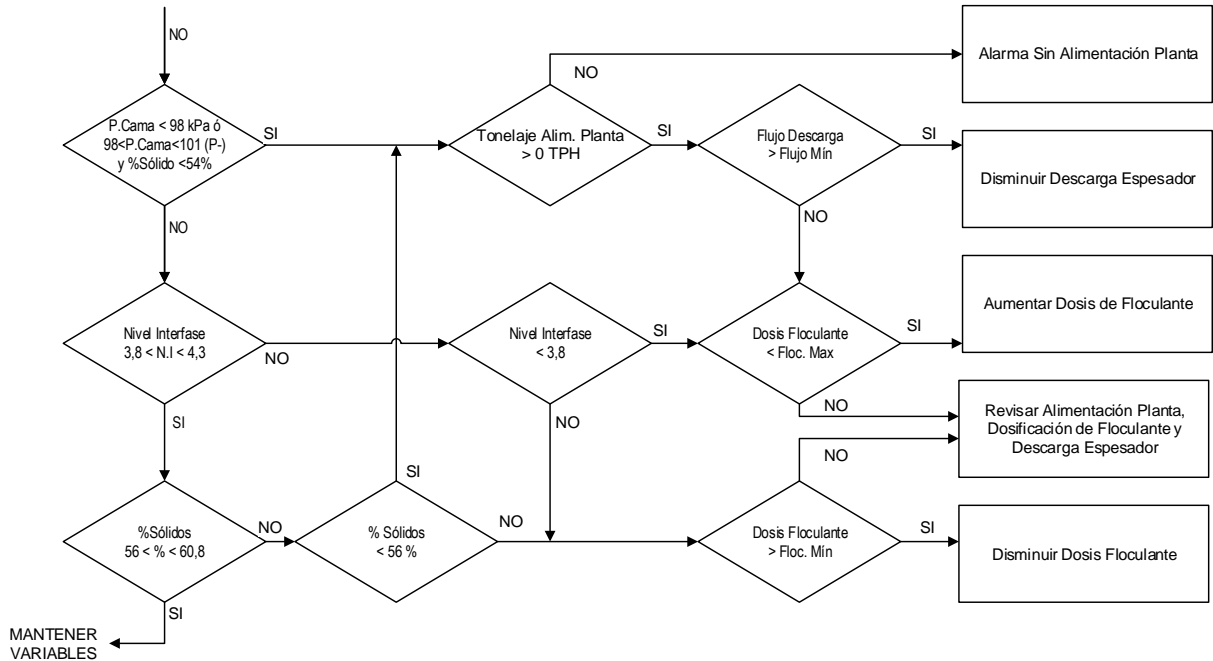


Figura 5.5 Segunda Fase Lógica de Control

La siguiente regla de la lógica de control, busca asegurar la claridad de agua en el *overflow*, con la revisión del nivel de interfase al interior del espesador. Para ello se ajusta la dosis de floculante aumentando o disminuyendo su valor, según el nivel se encuentre bajo o alto respectivamente, conforme a los valores que aseguran la recuperación de agua clara en el *overflow*. De acuerdo a las condiciones típicas de operación, el rango recomendado de floculante permite efectivamente controlar el nivel de interfase, excepto ante situaciones especiales, como las ya mencionadas y que serán alertadas por pantalla al operador.

Finalmente, con las condiciones anteriores revisadas, la lógica de control buscará optimizar el porcentaje de sólidos a la descarga siempre dentro del rango permitido, ajustando el flujo de descarga o la dosis de floculante utilizada según corresponda. En el caso que el porcentaje de sólidos se encuentre por debajo de un 56% en el *underflow*, el sistema experto primero disminuirá paulatinamente la descarga, para evitar afectar las variables ya revisadas y al mismo tiempo mejorar la concentración de sólidos obtenida.

Del mismo modo, que cuando existe una baja presión de cama de lodos, si el recurso de flujo se encuentra agotado, se procederá a aumentar la dosis de floculante, para así favorecer la sedimentación de partículas en el equipo.

En caso contrario, si el porcentaje de sólidos se encuentra por sobre 60,8%, se aprovecha de disminuir el consumo de floculante, reduciendo su dosis. Si esta acción no es suficiente para detener un aumento de sólidos, se debe recordar que una regla anterior tomará acción sobre el flujo de descarga, cuando se alcance un 61% de concentración en el *underflow*.

5.4 Parámetros de Control

Cada una de las acciones que pueda ser ejecutada por el sistema de control experto, tendrá una magnitud determinada por las condiciones que hayan generado tal decisión. En este sentido, la lógica de control, luego de tomar conclusiones de acuerdo a la secuencia de reglas, clasificará sus respuestas según sea la urgencia de ajustar las variables de control.

En particular los análisis de porcentaje de torque y presión de la cama de lodos, incluyen respuestas asociadas a tendencias al alza o baja en las mediciones, en cuyo caso las respuestas del sistema serán directamente proporcionales a la magnitud de la desviación con respecto a los valores esperados.

De este modo, la Tabla 5.2 resume la magnitud de las acciones a seguir, pudiendo tratarse de un cambio fijo en el recurso de control o un valor calculado en función de la desviación de la variable a controlar. El detalle de cada una de las acciones se describe a continuación.

Tabla 5.2 Magnitudes de Acciones de Control

Aumentar Descarga Espesador	
Torque > 13%	+ 300 m ³ /h (- 1 g/ton Floc)
10 < Torque < 13 (Pend +)	+ [100 – 250] m ³ /h
P.Cama > 110 kPa	+ 300 m ³ /h (- 1 g/ton Floc)
107 kPa < P.Cama < 110 kPa (Pend +)	+ [100 – 250] m ³ /h
% Sólidos > 61%	+ 200 m ³ /h
Disminuir Descarga Espesador	
P.Cama < 98 kPa	- 300 m ³ /h (+ 1 g/ton Floc)
101 kPa > P.Cama > 98 kPa (Pend -)	- [100 – 250] m ³ /h
% Sólidos < 56%	- 200 m ³ /h
Aumentar Dosis de Floculante	+1 g/ton
Disminuir Dosis de Floculante	-1 g/ton

En el resumen anterior se puede observar que, tanto el aumento como la disminución en el flujo de descarga del espesador por parte del sistema, con una magnitud de 300 m³/h se realizan para las situaciones límites de torque y presión de la cama, las cuales se acompañan de un cambio en la dosis de floculante de ± 1 g/ton según corresponda. Este tipo de respuestas se ejecuta ante una necesidad urgente de recuperar las condiciones de equilibrio del equipo, ya que las mediciones disponibles indicarían un desbalance entre el flujo de sólidos que se alimenta al equipo y aquellos que se descargan en *underflow*; generando una situación de peligro por acumulación excesiva al interior del equipo o bien, una baja recuperación de agua con respecto a la disponible.

Un ejemplo del resultado de una modificación de estas características, se observa en la Figura 5.6, donde se realizó un cambio manual de *setpoint* en las líneas de descargas del equipo, reduciendo el flujo desde 4100 a 3800 m³/h, acompañado de un aumento de 1 g/ton en la dosis de floculante. El resultado muestra claramente el quiebre de una brusca tendencia a la baja en las variables de presión de la cama y porcentaje de torque, generadas como consecuencia de cambios en la alimentación al espesador, y que mediante la modificación permiten detener la caída y mantener las variables en un estado pseudo estacionario.

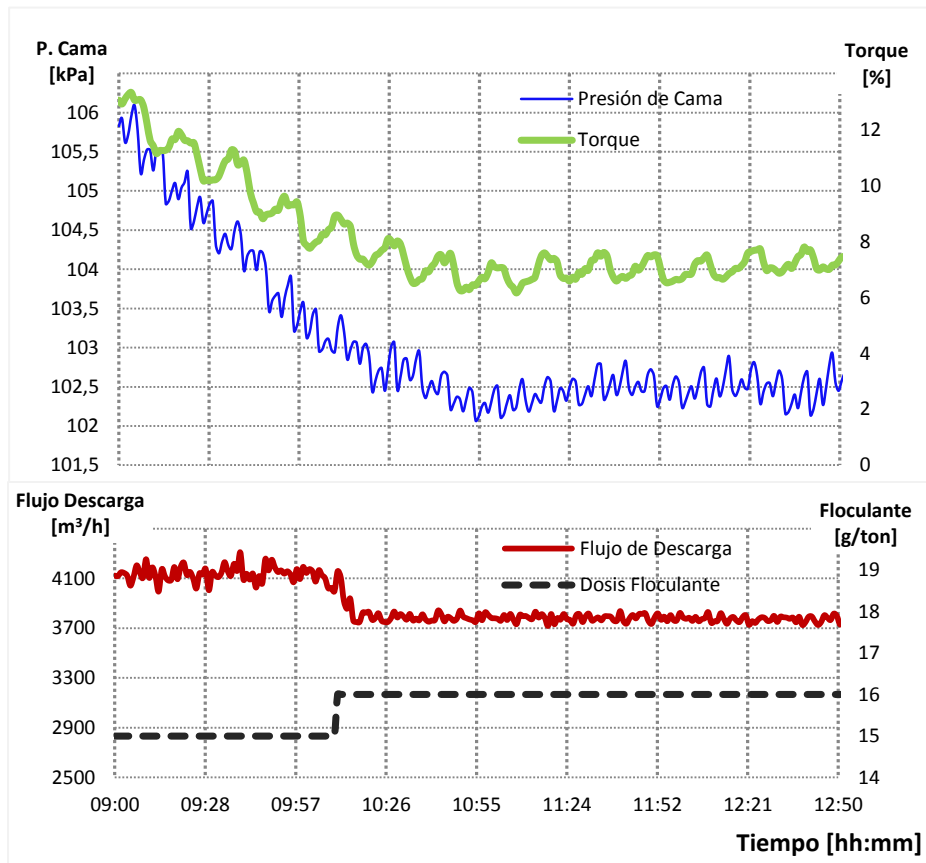


Figura 5.6 Cambio Disminución Descarga y Aumento Floculante

Por otra parte, como se muestra en la misma Tabla 5.2, para rangos donde las variables de control de torque y presión de la cama, presentan una tendencia ascendente o descendente, se realiza un cambio proporcional a la desviación con respecto a los valores recomendados, previo a alcanzar mediciones que escapen del rango deseable y requieran de una acción más fuerte en términos de magnitud.

El objetivo de estas acciones es eliminar esa tendencia y estabilizar nuevamente la operación, de modo de evitar la necesidad de cambios más bruscos, como el explicado anteriormente que requiere de combinar, la modificación del flujo de descarga y la dosis de floculante. De este modo, se presentan las siguientes situaciones:

- a) Si el porcentaje de torque se encuentra en el rango entre 10 y 13 %, con una pendiente positiva, entonces la respuesta del sistema (bajo el cumplimiento de las reglas lógicas necesarias), será incrementar el *setpoint* del flujo de descarga en un rango entre 100 y 250 m³/h, según se muestra en la Figura 5.7.

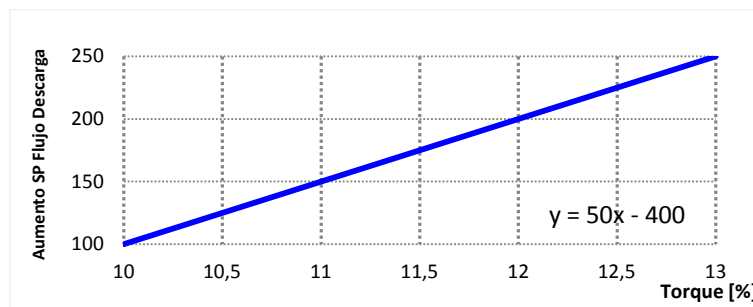


Figura 5.7 Aumento Flujo Descarga por Torque Alto

- b) Si la presión de la cama de lodos se encuentra en el rango entre 107 y 110 kPa, con una pendiente positiva, entonces la respuesta del sistema (bajo el cumplimiento de las reglas lógicas necesarias), será incrementar el *setpoint* del flujo de descarga en un rango entre 100 y 250 m³/h, según se muestra en la Figura 5.8.

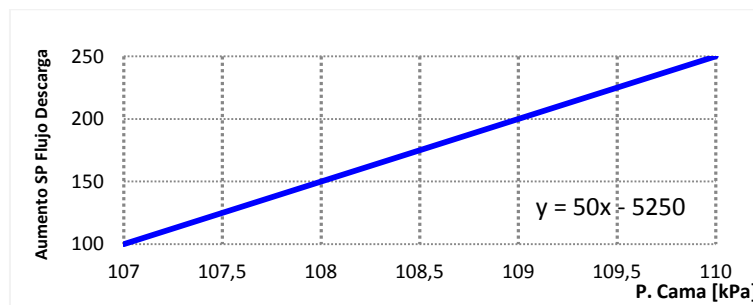


Figura 5.8 Aumento Flujo Descarga por P. Cama Alta

- c) Si la presión de la cama de lodos se encuentra en el rango entre 101 y 98 kPa, con una pendiente negativa, entonces la respuesta del sistema (bajo el cumplimiento de las reglas lógicas necesarias), será disminuir el *setpoint* del flujo de descarga en un rango entre 100 y 250 m³/h, según se muestra en la Figura 5.9.

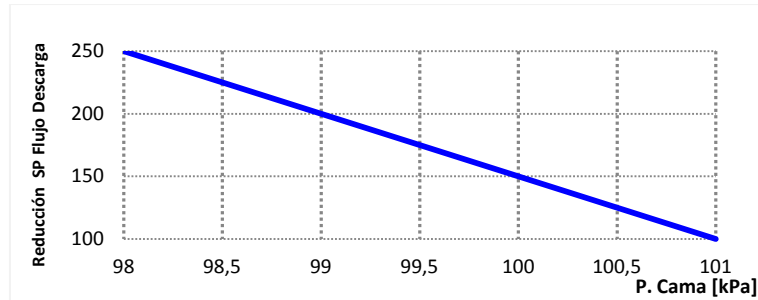


Figura 5.9 Reducción Flujo Descarga por P. Cama Baja

Adicionalmente, otra condición que requiere de una disminución en la descarga del espesador de acuerdo al método de razonamiento de la lógica, es que el porcentaje de sólidos se encuentre por debajo de un 56% luego de haber revisado todas las demás variables. Esto con el objetivo de aumentar el agua recuperada en la medida que las demás condiciones de operación en el espesador lo permitan.

Ante esta situación, el sistema realizará una disminución en la descarga de 200 m³/h, con el objetivo de minimizar el efecto sobre las variables ya revisadas. De modo análogo, cuando se produce una situación de alto porcentaje de sólidos (61%) y el sistema determina necesario aumentar la descarga, la magnitud de ese cambio será también de 200 m³/h.

Finalmente todas aquellas condiciones que de acuerdo a las reglas lógicas, requieran de un aumento o disminución en la dosis de floculante, se llevarán a cabo mediante saltos de 1 g/ton; magnitud de cambio recomendada por diseño y utilizada con éxito por parte de los operadores cuando se aplica control de tipo manual.

En base a toda la información anterior, las reglas lógicas propuestas y las condiciones de operación del espesador, se pueden definir los siguientes parámetros que serán necesarios para la implementación del sistema experto (véase Tabla 5.3). Estos están asociados a la definición de límites para cada variable y se presentan por pantalla, para su eventual modificación.

Tabla 5.3 Definición de Parámetros Límites Lógica de Control

Parámetro	Valor	Unidad
Torque Alto Alto	13	%
Torque Alto	10	%
P. Cama Alto Alto	110	kPa
P. Cama Alto	107	kPa
P. Cama Bajo Bajo	98	kPa
P. Cama Bajo	101	kPa
Interfase Bajo	3,8	m
Interfase Alto	4,3	m
Sólido Bajo	56	%
Sólido Alto	61	%
Flujo Desc Max	6000	m ³ /h
Flujo Desc Min	3600	m ³ /h
Floc Max	18	g/ton
Floc Min	12	g/ton
Aux Bajo Sol	45	%
Aux Alto Sol	54	%
Ton Alim Min	0	ton/h

5.5 Tiempos de Control

El concepto de tiempos de control en el sistema experto diseñado, dice relación con la necesidad de identificar los rangos temporales necesarios, que debe transcurrir entre una acción y otra. De este modo, bajo el cumplimiento de ciertas reglas y de acuerdo a las condiciones de proceso del espesador, el sistema de control determinará la necesidad de modificar alguno de los recursos disponibles. Luego de ejecutada la acción, el sistema deberá esperar el tiempo suficiente para poder analizar el real efecto que tuvo el cambio sobre las variables de proceso y recién después de ello, ejecutar una nueva acción en caso de ser necesario.

Por una parte, si el sistema no es capaz de esperar el tiempo suficiente entre una acción y otra, puede generarse un excesivo ajuste de los recursos, que se transformará en la pérdida de estabilidad de control y una oscilación constante de las variables de proceso. En el caso contrario, si el rango de tiempo asociado a una determinada acción es demasiado prolongado, pueden generarse situaciones de riesgo en la operación o la pérdida del control de las variables alcanzando valores fuera de sus rangos permitidos.

Los intervalos de tiempo en que el sistema experto tomará algunas de las acciones posibles, están determinados en función de los tiempos de respuesta de las variables frente a cada una de las acciones que el sistema pueda realizar, siendo independiente del tiempo de muestreo (lectura de datos) que se defina, considerando únicamente que la frecuencia de muestreo debe ser mayor.

En este sentido, la determinación del tiempo de muestreo debe ser capaz de complementar las necesidades de revisión por parte del sistema experto, con la capacidad de las herramientas disponibles para la programación. Como se detalla en el Capítulo 6 del presente documento, la implementación de la lógica de control sobre la operación del espesador de relaves, se llevará a cabo mediante dos estructuras de programación principales. Una de ellas ejecuta la revisión de variables y generación de alarmas frente a situaciones particulares, mientras que la segunda es la encargada de ejecutar acciones y por ende tendrá asociados los denominados tiempos de control. Por su parte, el tiempo de muestreo sólo se verá involucrado en la primera estructura de revisión de variables, la que se ejecutará cada 5 segundos, aprovechando la robustez del sistema disponible en la planta y con el objetivo de construir una sola estructura encargada del monitoreo de variables y al mismo tiempo la detección de situaciones que requieran activar alarmas para el operador.

De este modo, la estructura de revisión de variables y activación de alarmas, se ejecuta cada 5 segundos (tiempo de muestreo), mientras que las acciones del sistema experto se ejecutarán sólo cuando esta primera estructura se lo indique y si es que han transcurrido los tiempos de control asociados a cada tipo de modificación. El detalle de las conexiones entre ambas estructuras, se detalla más adelante en el Capítulo de Implementación y ajuste de la lógica de control.

Continuando con el análisis de los tiempos de control, como parte de la etapa de diseño de esta lógica, se llevaron a cabo pruebas mediante “saltos tipo escalón” en aquellas variables que serán utilizadas como recurso de control, es decir flujo de descarga y dosis de floculante. En ambas se llevaron a cabo modificaciones manuales, para cada magnitud involucrada en el sistema experto, manteniendo las demás variables sin modificar y analizando el tiempo que requiere cada acción para llevar las variables de control de un estado estacionario a otro.

Estas pruebas permiten determinar los tiempos aproximados de control para la implementación del sistema experto, cuya determinación final es parte del proceso de sintonización de parámetros, pudiendo ser ajustados a una fracción del tiempo de respuesta o un tiempo mayor según lo indiquen las pruebas de puesta en marcha del sistema.

Cuando se realice una modificación de $\pm 300 \text{ m}^3/\text{h}$ en el flujo de descarga del espesador, el sistema deberá esperar un tiempo de 1,5 horas desde que se realizó el cambio, para recién tomar cualquier otra acción en caso de ser necesario, excepto aquellas que implican una alerta por pantalla. Esto con el objetivo, de esperar el tiempo suficiente para que la modificación se vea reflejada en las variables a controlar.

A modo de ejemplo, como se muestra en la Figura 5.10 tras realizar un salto de *setpoint* de flujo desde 4400 a $4100 \text{ m}^3/\text{h}$, las variables de torque y presión de la cama comienzan a aumentar progresivamente, alcanzando una nueva condición estacionaria al cabo de aproximadamente 1,5 horas.

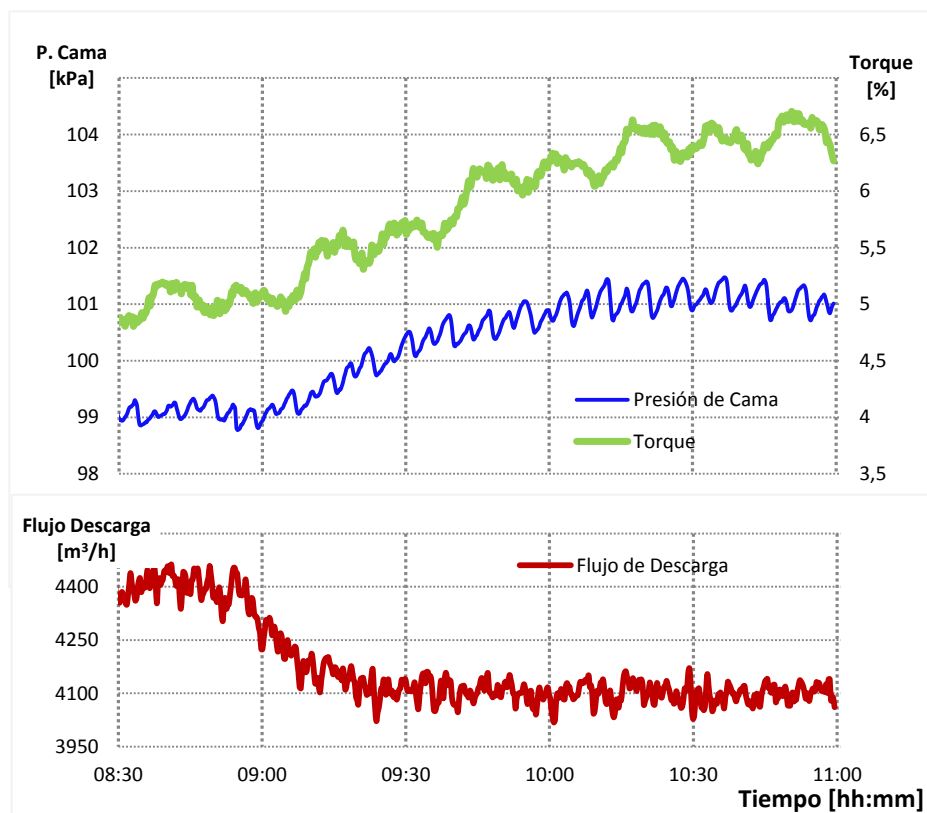


Figura 5.10 Salto Escalón $300 \text{ m}^3/\text{h}$ Flujo Descarga

Para un segundo caso, en aquellas acciones que requieran una modificación en el rango $\pm [100-250] \text{ m}^3/\text{h}$ en el flujo de descarga del espesador, el sistema deberá esperar un tiempo de 2 horas desde que realizó el cambio, para tomar cualquier otra acción en caso de ser necesario; excepto, aquellas situaciones que impliquen modificar la descarga en $\pm 300 \text{ m}^3/\text{h}$ o que muestren una alerta por pantalla, ya que se consideran situaciones de riesgo que deben ser corregidas.

A modo de ejemplo, como se muestra en la Figura 5.11, tras realizar un salto de *setpoint* de flujo desde 4580 a 4380 m³/h, las variables de torque y presión de cama comienzan a aumentar progresivamente, alcanzando una nueva condición estacionaria al cabo de aproximadamente 2 horas. Respecto a este nuevo análisis del mismo sistema para un salto escalón de distinta magnitud, la teoría explica que la constante de tiempo debe ser la misma pues describe la velocidad de respuesta del sistema. Sin embargo, las pruebas se llevan a cabo teniendo en cuenta, que el sistema no es ideal y pueden existir variaciones en términos prácticos, como por ejemplo, observando que el cambio en flujo de descarga no es un salto escalón perfecto, lo que puede generar diferencias en el tiempo de respuesta para cada caso.

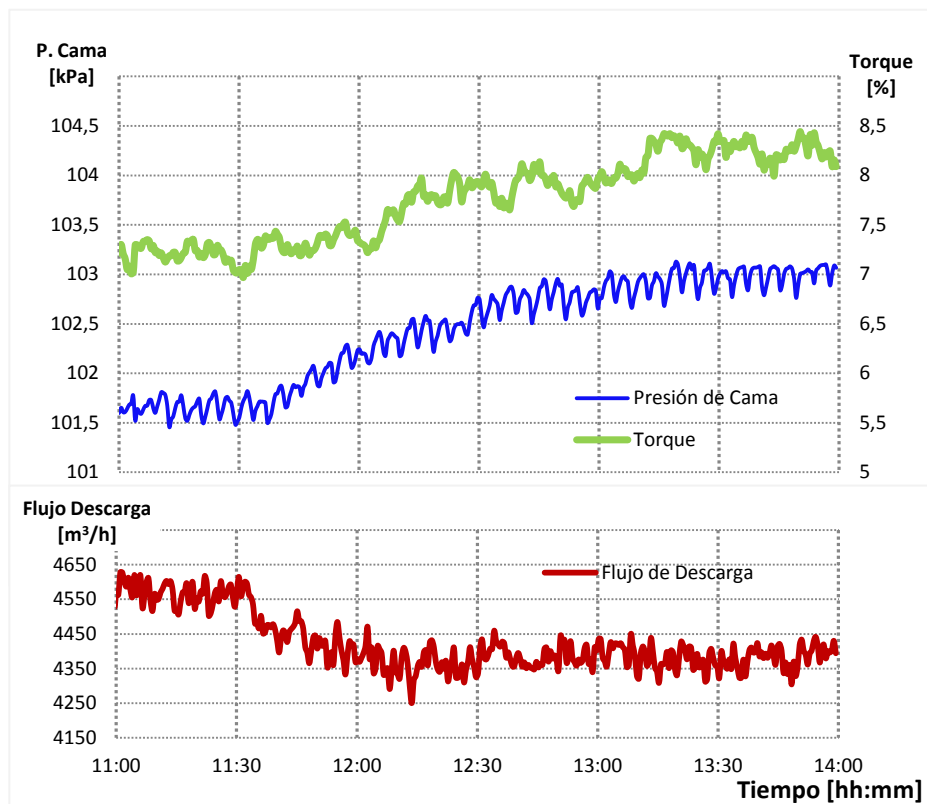


Figura 5.11 Salto Escalón 200 m³/h Flujo Descarga

Por último, aquellas condiciones donde el sistema experto considere necesario, aplicar un aumento o disminución en la dosis de floculante, deberá pasar un tiempo de 1,5 horas desde realizada la modificación, para tomar cualquier otra acción en caso de ser necesario; excepto, aquellas situaciones que impliquen modificar la descarga del espesador en ± 300 m³/h o bien, informar de alguna alerta por pantalla.

Este parámetro preliminar, está determinado en función del tiempo que requieren las variables de control en estabilizarse tras un cambio de ± 1 g/ton en la dosis de floculante, como se muestra en la Figura 5.12.

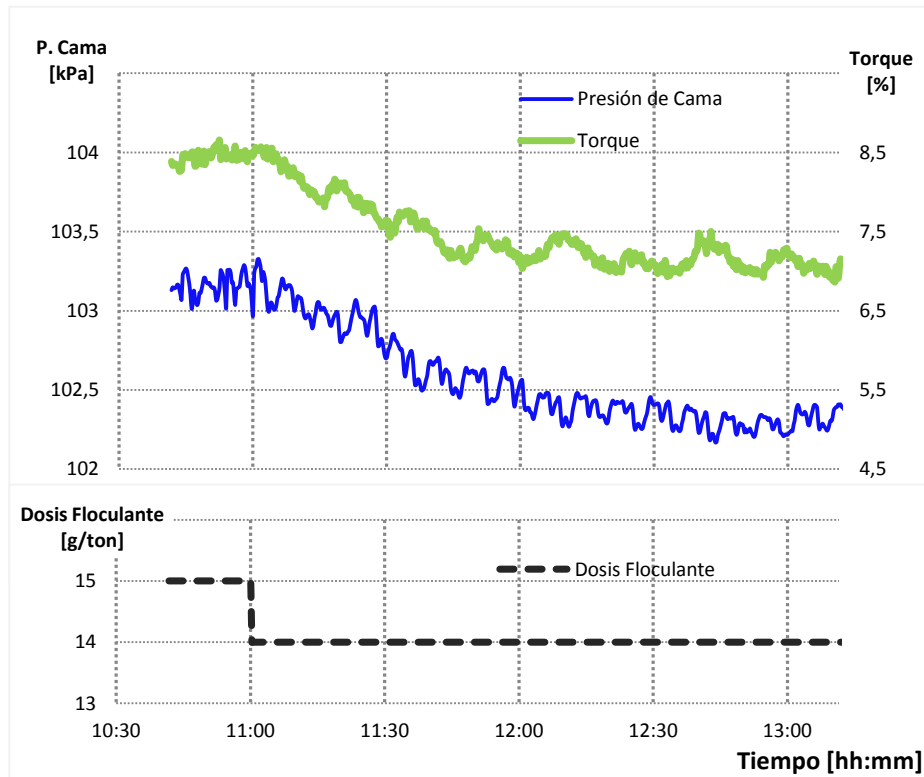


Figura 5.12 Salto Escalón 1 g/ton Dosis Floculante

Los análisis presentados anteriormente muestran como ejemplo, parte de las pruebas realizadas mediante salto escalón negativo de los recursos de control para determinar los tiempos de control del sistema experto. Experiencias análogas a partir de salto escalón positivo, entregaron respuestas similares en términos de velocidad de respuesta, por lo que no existe evidencia significativa que justifique una diferencia en el actuar para cada caso.

Como se mencionó anteriormente, los tiempos de control analizados buscan evitar, la toma de acciones por parte del sistema experto de forma muy acelerada o por el contrario, demasiado tardías. Sin embargo, desde otro punto de vista asociado a estos tiempos, se revisó preliminarmente el efecto que puede tener la ejecución de dos acciones del mismo tipo de forma consecutiva, con el cumplimiento de las reglas respectivas. Esto considerando por ejemplo, que una acción de aumento en la descarga de $300 \text{ m}^3/\text{h}$, seguida de una similar de magnitud $200 \text{ m}^3/\text{h}$, puede generar en conjunto una reacción excesiva si se ejecutan de forma consecutiva, pese a transcurrir el tiempo de control correspondiente. Sin embargo, la

experiencia en la operación y las pruebas preliminares indican que, considerando que este tipo de acción se asocia a modificaciones para introducir las variables dentro de una banda de seguridad, no existe evidencia suficiente que justifique la necesidad de incorporar un ajuste basado en las respuestas anteriores del sistema experto. No obstante, son parte de los análisis que se realizan a partir de los resultados obtenidos por la operación de la lógica de control.

Finalmente, considerando los tipos de respuestas por parte del sistema de control experto, y las características asociadas a su ejecución, se definen los parámetros de acción que se indican en la Tabla 5.4

Tabla 5.4 Definición de Parámetros de Acción Lógica de Control

Parámetro	Valor	Unidad
Aumento Dosis Floculante	1	g/ton
Disminución Dosis Floculante	1	g/ton
Aumento Descarga	300	m ³ /h
Disminución Descarga	300	m ³ /h
Mín Rango Aumento Descarga	100	m ³ /h
Máx Rango Aumento Descarga	250	m ³ /h
Mín Rango Disminución Descarga	100	m ³ /h
Máx Rango Disminución Descarga	250	m ³ /h
Disminución Descarga por Sólido	200	m ³ /h
Tiempo Aumento Descarga	2	h
Tiempo Disminución Descarga	2	h
Tiempo Rango Aum/Dis Descarga	3	h
Tiempo Aum/Dis Floculante	1,5	h
Tiempo de muestreo	5	seg

5.6 Activación de Alarmas

Como se mencionó anteriormente, el sistema de control experto considera la activación de alarmas por pantalla para el operador, en aquellas situaciones que escapan de la operación para la que fue diseñado el espesador de relaves. Estas requieren de la participación del operador, que debe ser capaz de determinar si es necesaria la detención del sistema o su continuidad de acuerdo a los siguientes lineamientos.

A continuación se señalan las alarmas que pudiese activar el sistema experto durante la presencia de eventualidades que requieran de acciones especiales por parte del operador. En cada una de ellas, se mencionan indicaciones generales que deberán seguir los operadores cuando se requiera de su participación, de acuerdo a los procedimientos operacionales según sea el caso. En este sentido, los procedimientos técnicos detallados para la revisión de

variables en casos particulares del Área de Espesamiento de Relaves de la planta, se encuentran actualmente en desarrollo por parte del personal de Operaciones de la División y no forman parte de los alcances de la presente tesis.

Alarma 1: Abrir Válvula Cajón Alimentación a Canaleta y Revisar Capacidad

Cuando se presenta un aumento de torque o presión de cama y además, el flujo de descarga ya alcanzó el valor máximo permitido, puede tratarse de una eventual sobrecarga del espesador, por sobre su capacidad de diseño. Ante esta alarma el operador deberá según los procedimientos establecidos, revisar eventuales fallas en las mediciones y al mismo tiempo desviar parcial o totalmente la alimentación, aliviando la carga del equipo mediante la modificación en las válvulas del cajón de alimentación.

Alarma 2: Revisar Sensor de Torque, Descarga y Levante de Rastras

En caso de presentarse un aumento en las mediciones de presión de cama en el espesador, que no esté acompañado de un alto valor en el porcentaje de sólidos de la descarga, puede ser un indicador de acumulación de mineral al interior del equipo. Para evitar un posible embancamiento, el operador deberá revisar las mediciones además de evaluar un posible levante de rastras, según los procedimientos operacionales del área.

Alarma 3: Alarma Sin Alimentación Planta

En los casos que por algún motivo, ingrese un “*batch*” de agua a la planta o simplemente se detenga la alimentación al espesador, el sistema experto alarmará al operador para que tome las medidas necesarias de acuerdo al entrenamiento para tales casos. Lo que puede significar el cierre de las válvulas de descarga del equipo en caso de requerir recuperar toda el agua del *batch* o una posible recirculación.

Alarma 4: Revisar Alimentación Planta, Dosificación de Floculante y Descarga del Espesador

Ante casos muy particulares, pudiesen generarse situaciones que escapen de las condiciones normales de operación para las cuales fue diseñado el equipo. Ante estos escenarios, el sistema experto alarmará al operador, para la identificación del motivo que impide controlar el equipo dentro de los rangos considerados normales. Esto significa que de acuerdo a los procedimientos, deberá revisar que los recursos de control se encuentren operando sin fallas; o bien que la alimentación al espesador sea la óptima para obtener una descarga con el porcentaje de sólidos deseada.

6 Implementación y Ajuste de la Lógica de Control

De acuerdo a la metodología para el desarrollo de este sistema experto, la última fase comprende la preparación y puesta en marcha del mecanismo computacional, que ejecutará la secuencia de reglas y las acciones diseñadas en la lógica de control. Esta etapa incluye la preparación del entorno de control manual ya existente en la planta, para cumplir con los requerimientos del sistema automático.

Una vez que se han diseñado todas las modificaciones sobre la plataforma DCS de Planta “Las Tórtolas”, se da inicio a un período de “marcha blanca”, en la cual se aseguran las correctas respuestas de la lógica, se sintonizan los parámetros de diseño y se llevan a cabo los ajustes necesarios para el funcionamiento definitivo del sistema de control experto. El detalle completo de esta fase se describe a continuación.

6.1 Ambiente de Control Espesador de Relaves

Como se explicó anteriormente, el espesador de relaves de la planta es monitoreado y controlado, desde la sala principal de control de la Planta 2. Para su manejo los operadores disponen de una interfaz de usuario conocida como HMI por su sigla en inglés, “*Human Machine Interface*”, que permite la observación de variables y la modificación de recursos, de una forma simple y fácil de comprender.

La interfaz con que se disponía hasta ese entonces, para el control del área de espesamiento de relaves, correspondía al diseño original entregado por la empresa proveedora durante la puesta en marcha de la planta. Si bien cumplía con los requerimientos mínimos para una operación de control manual, se realizaron algunas modificaciones enfocadas en la implementación del sistema experto y en robustecer su operación tanto bajo control automático como control manual. En este sentido, se elaboró un rediseño de la interfaz de usuario y se modificó el lazo de control con que se manejan las líneas del *underflow*.

6.1.1 Diseño Interfaz de Control

El diseño de la nueva interfaz de control para el operador, fue elaborado con el objetivo de reunir en una sola pantalla las principales variables involucradas en el proceso de espesamiento de relaves, durante la operación con el sistema experto o ante la necesidad de una operación manual. Para ello, se eliminaron algunos indicadores que no eran utilizados bajo ninguna circunstancia y al mismo tiempo, se incorporaron otros asociados al proceso que al no estar disponibles, forzaban al operador a cambiar de pantalla en busca de los datos necesarios.

Adicionalmente, la nueva interfaz que se muestra en la Figura 6.1, incorpora un *display* que permite conocer el estado de funcionamiento del sistema experto (operando o detenido), y que permitirá la conexión con otra interfaz asociada a los parámetros y condiciones de este control automático.

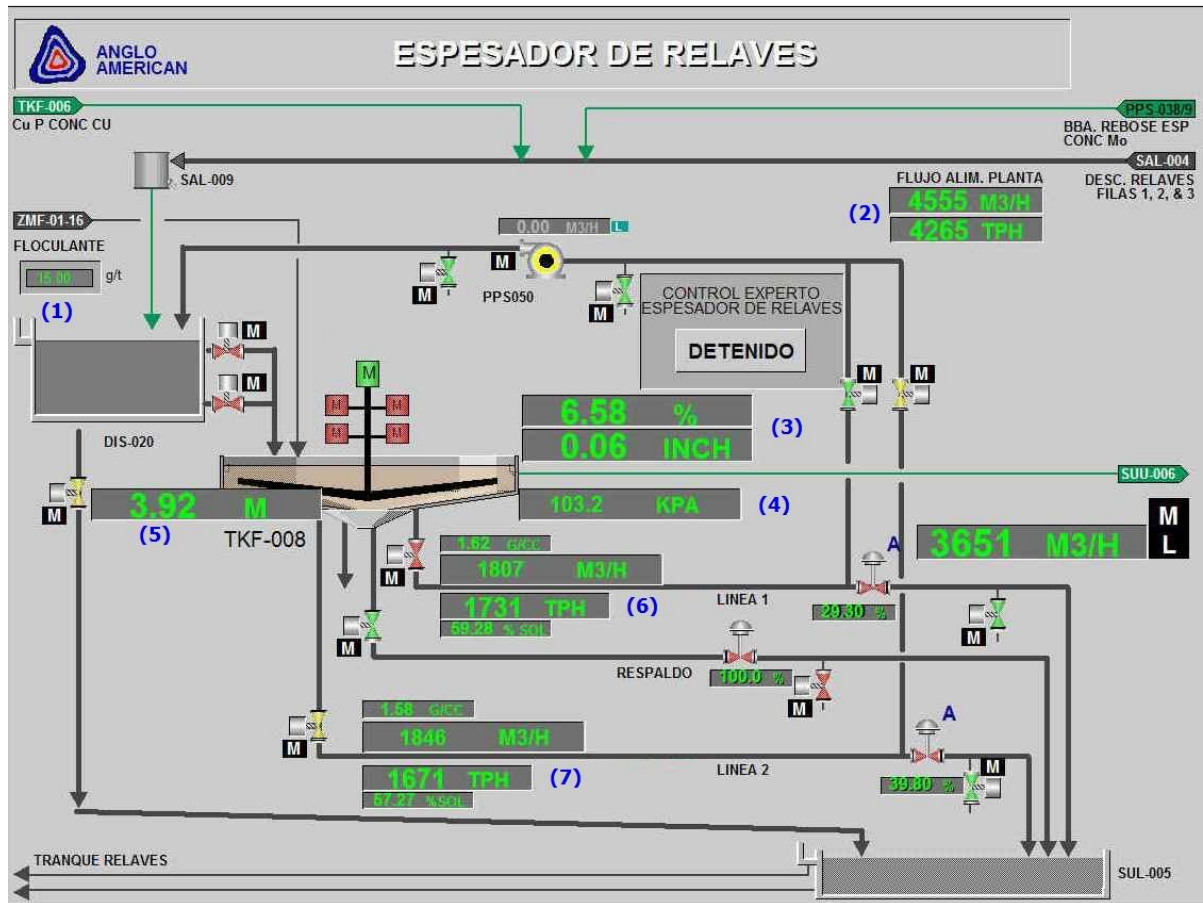


Figura 6.1 Interfaz de Usuario Espesador de Relaves

Como se puede observar, la nueva interfaz incluye mediciones asociadas a otras áreas pero de gran importancia para el control operacional del equipo, tales como la dosis de floculante que se adiciona al espesador (1) o mediciones en la alimentación de la planta de flotación (2) en términos de flujo volumétrico y flujo de sólidos.

Con respecto a aquellas variables de monitoreo que permiten conocer el estado de la operación en el equipo, se dispone de mediciones de torque y altura de rastras (3) vinculadas al accionamiento de este mecanismo, que se complementan con las lecturas de presión de cama de lodos (4) en el fondo del tanque y el nivel de interfase (5) en el interior del equipo.

Por su parte, en las dos líneas de descarga principales, se muestra un grupo de variables asociadas a cada una (6 y 7) que resultan de la medición directa o derivación de ellas, a partir de densímetros y flujómetros: densidad de pulpa, flujo volumétrico, flujo de sólidos y porcentaje de sólidos.

Conforme a otras áreas de operación de la planta, se mantienen los formatos para control operacional de las válvulas manuales y el monitoreo de tendencias por medio de gráficas de cada una de las variables de proceso. En la nueva interfaz es posible observar además, un tercer flujo volumétrico correspondiente a la suma de las dos líneas de descarga, cuya especificación se detalla en el siguiente ítem.

6.1.2 Lazo de Control de Flujo de Descarga

Los lazos de control originales para las líneas de descarga del espesador estaban conformados por dos controles PID (uno para cada línea), en los cuales se podía modificar el *setpoint* de flujo deseado, los que a su vez modificaban la abertura de la válvula en la línea correspondiente para cumplir el objetivo.

Con el fin de robustecer el lazo de control y junto con ello la operación del sistema experto, se incorporó un único control PID (en reemplazo de los dos existentes) para manejar ambas válvulas de descarga. Este lazo requiere del ingreso de un único valor de *setpoint* correspondiente al flujo total de descarga a través de ambas líneas, a partir del cual se envía a una salida en términos de porcentaje de abertura en las válvulas.

La principal ventaja de este nuevo lazo, radica en la entrega de mayor seguridad en el cumplimiento de alcanzar un flujo total de descarga con respecto a sus antecesores, puesto que, si por algún motivo una de las válvulas no logra modificar el flujo según lo requerido, la segunda válvula se ajustará para cumplir con el *setpoint* total, siempre dentro de los rangos de operación de las líneas. A modo de ejemplo, si el operador deseaba una descarga total de 5000 m³/h, debía ingresar un *setpoint* de 2500 en cada PID; a partir de ello, si una línea no cumplía a cabalidad el objetivo alcanzando sólo 2400 m³/h, entonces no se lograba el objetivo de descarga total pese a que la segunda línea pudiese tener la capacidad para lograrlo.

De este modo, el nuevo lazo de control soluciona este inconveniente, que en un caso ideal no debiese presentarse considerando que tanto la línea como la válvula tienen las mismas características, en términos de dimensión y funcionamiento. Sin embargo, la operación real demuestra que estas situaciones pueden ocurrir y podrían perjudicar el funcionamiento del sistema experto, por motivos de tipo mecánico tales como el ensuciamiento del actuador en las válvulas o por la presencia de fricción en el movimiento del vástago.

De acuerdo a lo anterior, el nuevo lazo de control PID puede ser manejado y monitoreado, mediante la aparición de ventanas emergentes que se activan desde la nueva interfaz de control para el espesamiento de relaves (véase Figura 6.2).

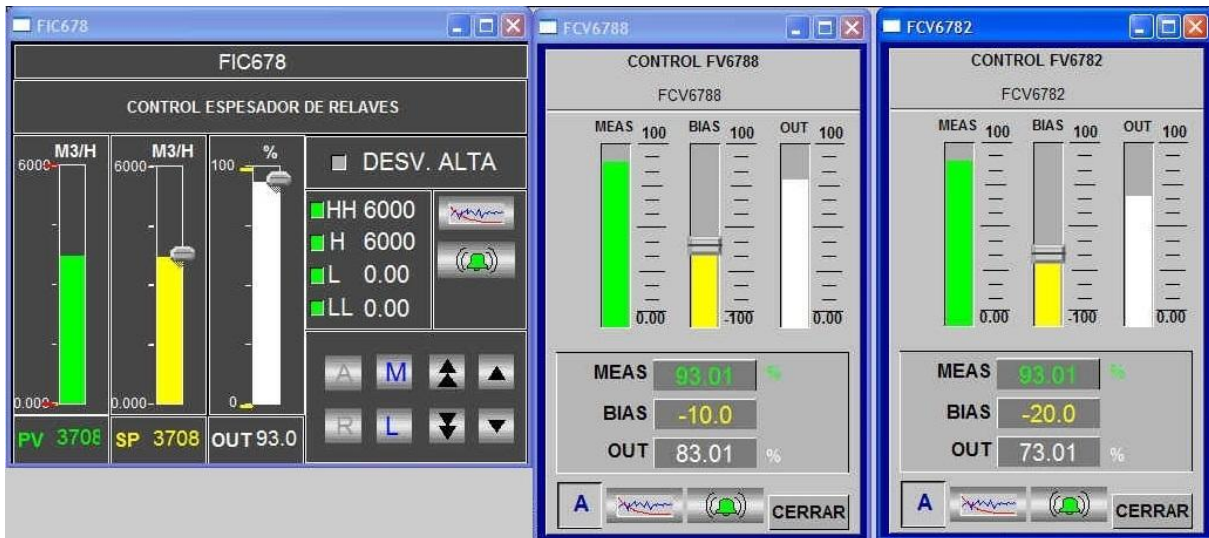


Figura 6.2 Ventanas Control Flujo de Descarga

Junto a la ventana principal, que permite observar el valor actual de la variable (PV), el valor de *setpoint* (SP) y el porcentaje de salida hacia las válvulas (OUT), se ha implementado una ventana adicional para cada válvula, con el objetivo de permitir un ajuste fino en cada una. Este ajuste responde a la observación, de distintos comportamientos en las válvulas, de modo tal que para un mismo porcentaje de abertura en ellas, no significa necesariamente la circulación del mismo flujo.

Esta situación ocurre principalmente por efecto del sistema de auto-calibración con que cuentan los actuadores, que establece de forma automática la posición máxima y mínima en el movimiento del vástago. Una pequeña variación en estos límites, puede generar este efecto, que se corrige mediante la aplicación de un ajuste (BIAS) que permite modificar en un cierto porcentaje la salida del control PID para cada válvula. La determinación de este parámetro se realiza una vez tras la calibración, permitiendo mantener flujos similares en ambas líneas, pudiendo ser reajustado en caso de ser necesario.

Estas mismas ventanas auxiliares, permiten habilitar de forma independiente el control manual de cada válvula en casos de mantenimiento de válvulas o instrumentación. Bajo esta situación, el lazo de control PID se ajustará automáticamente para seguir funcionando con la operación de una sola línea.

6.2 Implementación Sistema Experto

El sistema experto desarrollado para el espesador de relaves, se ha implementado directamente en el sistema DCS de la planta, sobre la creación de dos estructuras principales que operan interconectadas, denominadas CONTROL y EXPERTO.

La primera de ellas, corresponde a una réplica de la lógica presentada en el Capítulo 5 que fue programada en DCS y evalúa las condiciones actuales de operación del equipo, para elegir el tipo de respuesta que debe llevarse a cabo. Esta estructura funciona de forma continua, independiente del estado de activación del sistema experto.

Por su parte la estructura denominada EXPERTO, es la encargada de llevar a cabo las acciones necesarias para controlar de forma automática el espesador de relaves. En base a los resultados del CONTROL y su propia configuración de cálculo, determinará la magnitud de las respuestas necesarias y las ejecutará según corresponda.

Como se observa en la Figura 6.3, la interacción de estas estructuras, genera una compleja red de señales que alimentan e interactúan con el mecanismo, para razonar de acuerdo a la secuencia de reglas lógicas diseñadas. Cada estructura procesa estas señales, mediante la ejecución de *script* o ficheros de programación, que contienen paso a paso el razonamiento del sistema experto en lenguaje computacional y que por cuya extensión, forman parte de la documentación adjunta a este trabajo (Anexo B).

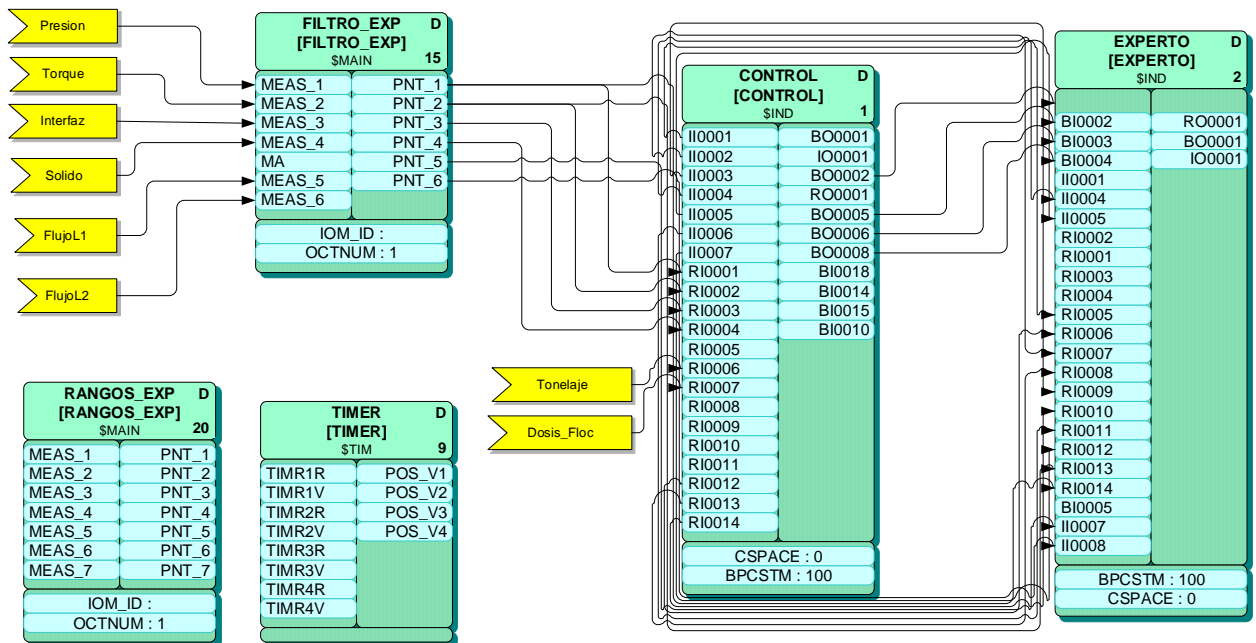


Figura 6.3 Red de Señales Sistema Experto

Es posible observar que junto a las dos estructuras principales, se encuentran operando otras estructuras de menor envergadura, encargadas de funciones que apoyan el trabajo de CONTROL y EXPERTO. Entre ellas cabe mencionar, la denominada FILTRO_EXP, la cual está pensada para procesar la lectura de señales desde los instrumentos, filtrándolas en caso de ser necesario para disminuir la presencia de ruido que pudiese afectar la toma de decisiones del sistema experto.

Estas herramientas ya se encuentran disponibles en el sistema DCS, y son aprovechadas para complementar la operación de la lógica. De este mismo modo, se dispone además de la estructura TIMER, que agrupa dispositivos de tiempo utilizados en el sistema, como por ejemplo para la ejecución de acciones o la determinación de pendientes en las variables de proceso.

Adicionalmente se puede observar la estructura denominada RANGOS_EXP, la cual se utiliza para el almacenamiento de parámetros límites, asociados a condiciones de operación que deben cumplirse para poder activar el sistema experto. En este sentido, el sistema puede ser activado o desactivado por parte del operador de la sala de control, cuando lo estime pertinente. En el primer caso deberán cumplirse algunas condiciones previas para que el sistema comience a operar, de lo contrario, el mismo sistema se desconectará de forma inmediata, informando el motivo a través de la pantalla.

Entre las condiciones necesarias para activar el sistema experto se tienen:

- El lazo de control de adición de floculante al espesador debe estar en modo automático, para transmitir la señal que reciba por parte del sistema experto.
- El PID de control de las válvulas de descarga del espesador debe estar en modo automático, para asegurar el control sobre las válvulas del *underflow*.
- No debe existir falla de comunicación en las mediciones de altura de rastras, torque, nivel de interfaz, presión de cama, flujómetros o densímetros en las descargas, asegurando así la lectura de variables involucradas en el control.
- Las mediciones de flujo en cada una de las líneas de descarga, no deben encontrarse fuera de los valores definidos como “rango permitido”.

En caso de no cumplirse las condiciones mencionadas, el sistema experto no podrá activarse, informando por pantalla el motivo y el operador deberá asegurar su corrección para activar nuevamente el sistema. Para ejecutar esta activación desde el punto de vista de la interfaz del operador, se elaboró un interruptor o *switch*, que está asociado a la operación de la estructura EXPERTO y que permite establecer el control automático o manual en el área de espesamiento de relaves (véase Figura 6.4).



Figura 6.4 Switch Activación Sistema Experto

Un dispositivo similar, se implementó asociado a la operación de la estructura CONTROL, respecto de la selección del densímetro a utilizar como referencia para el procesamiento en la lógica de control. Esto teniendo presente que existen dos mediciones, para determinar el flujo de sólidos en la descarga del espesador, por lo que el operador puede seleccionar uno de ellos en base a la confiabilidad de la medición. Pese a lo anterior, si en algún instante durante la operación con el sistema experto se presenta una falla en la señal de medición de un densímetro, el interruptor cambiará de forma automática a la segunda medición.



Figura 6.5 Switch Selector Densímetro

Reuniendo todos los elementos anteriores y sincronizándolos con el encadenamiento de reglas lógicas diseñadas, se creó una nueva pantalla de control en el sistema DCS que se suma a las ya existentes y se pone a disposición de los operadores en la sala principal. Esta pantalla que se muestra en la Figura 6.6, es una réplica exacta de la lógica de control en la cual se pueden ingresar y ajustar todos los parámetros asociados al sistema, y junto con ello, es la encargada de mostrar paso a paso cuál es el razonamiento detrás de cada decisión que se ejecute de forma automática. Conectada directamente con la pantalla de monitoreo del área de espesamiento de relaves, informa a los operadores ante la posibilidad de situaciones de emergencia u otros que deriven en la activación de alarmas.



Figura 6.6 Interfaz de Control Sistema Experto

En la figura anterior es posible observar el mismo encadenamiento de reglas diseñadas, siendo posible conocer cada uno de los parámetros, que determinan las acciones a seguir por parte del sistema experto. Eventualmente, estos parámetros pueden ser modificados si a futuro, cambian las condiciones de operación del equipo. En el borde derecho de la pantalla, se ubican todas las acciones y alarmas posibles para poder analizar el funcionamiento del sistema.

En la sección denominada "ingreso de variables" se ajustan aquellos límites de flujo que determinan la posibilidad de activar el sistema o desactivarlo cuando las líneas de descarga escapan de su operación normal, y cuyas alarmas se informan en la misma zona inferior.

Finalmente, es posible ajustar los tiempos asociados a las respuestas del sistema experto, y los ya mencionados interruptores para seleccionar el densímetro a utilizar y el activador del sistema de control automático. Otras representaciones gráficas de las pantallas desarrolladas para la implementación del sistema experto pueden ser revisadas en el Anexo F.

6.3 Sintonización de Parámetros y Ajustes

De acuerdo a lo planificado, se llevó a cabo una fase de calibración previa a la puesta en marcha definitiva del sistema experto, durante un período de 10 días. En este tiempo, se realizaron todas las pruebas para asegurar el correcto funcionamiento del sistema, analizando las respuestas de acuerdo a los parámetros asignados e identificando ajustes o mejoras que debiesen incorporarse a la lógica original.

Desde el punto de vista netamente visual, se realizaron pequeños ajustes en la interfaz de control, para favorecer la interacción con los operadores en función de aquellos comentarios realizados por ellos mismos. En este sentido, aquellas alarmas detalladas anteriormente, que requieren de la participación del operador ante situaciones particulares, se conectaron directamente a la pantalla del área de espesamiento de relaves, para así asegurar su atención cuando se requiera.

Con respecto a la propia sintonización de parámetros, se evaluaron progresivamente hasta alcanzar los valores propuestos por la lógica original. Este progresivo análisis, responde a la peligrosidad que puede significar alcanzar valores fuera del rango permitido en las variables de proceso. Para evitar estas situaciones durante la fase de calibración, se probaron rangos más acotados para cada una de las reglas lógicas, ampliándolos sistemáticamente hasta confirmar que los valores de diseño permitían obtener las respuestas deseadas en la operación automática del espesador de relaves.

Dos casos particulares, fueron analizados durante este periodo de implementación, para perfeccionar el funcionamiento del sistema. El primero de ellos, responde al ajuste de los denominados “tiempos de control”, asociado a los rangos temporales entre la ejecución de una acción y otra. Mientras que el segundo caso, se origina a partir de la relación entre consumo de floculante y capacidad de la planta de preparación del mismo reactivo.

6.3.1 Sintonización de Tiempos de Control

Para la sintonización final de los tiempos de control, se determinarán 3 tipos de períodos correspondientes a los tipos de respuesta que puede ejecutar el sistema experto. De acuerdo a ello y con el uso de la estructura TIMER, se asignó el TIEMPO1 a los tipos de cambio urgente con magnitud de 300 m³/h en el flujo de descarga; el TIEMPO2 a las modificaciones en el flujo de descarga en el rango 100 a 250 m³/h; y TIEMPO3 a todos aquellos cambios asociados a la dosis de floculante.

La sintonización de cada uno de ellos, se basó en el análisis original de las respuestas mostrado en la Sección 5.5 y adaptados según las pruebas de la fase de calibración. Los valores iniciales examinados para TIEMPO1, TIEMPO2 y TIEMPO3 de acuerdo al análisis, fueron de 1,5 h, 2 h y 1,5 h respectivamente, los que luego de las pruebas se definieron como 1 h, 1,5 h y 3 h.

El motivo detrás de los cambios para TIEMPO1 y TIEMPO2, los cuales se asocian a modificaciones en el flujo de descarga, están relacionados con mejorar la velocidad de respuesta del sistema frente a los distintos cambios que repercuten en las variables de proceso. Lo anterior teniendo presente, que tras los períodos de 1 y 1,5 h una vez ejecutada la acción, ya se ha logrado conseguir más del 75% de la respuesta en la variable de proceso, asociado al cambio de flujo, de acuerdo a lo mostrado en la Figura 5.10 para el primer caso y en la Figura 5.11 para el segundo. De este modo, se observó que si transcurrido este tiempo aún se mantiene la condición que originó el cambio en el flujo de descarga, entonces el sistema necesariamente requerirá de una nueva modificación para ajustar las condiciones de proceso del espesador.

Por su parte la modificación en el TIEMPO3, tiene exclusiva relación con el objetivo de reducir la utilización de la dosis de floculante como recurso de control, entendiendo la importancia económica que significa su consumo para la operación. En este sentido se busca apoyar la metodología de razonamiento de la lógica de control, utilizando los aumentos en la dosis de floculante como último recurso y sólo cuando sea estrictamente necesario.

Cada uno de estos tiempos, se activan junto con la ejecución de su respectiva acción, y posteriormente son reiniciados por el sistema experto, una vez que se ha cumplido el tiempo definido, para lo cual se utilizan declaraciones del siguiente tipo, por supuesto transformadas al lenguaje de programación correspondiente:

```
SI (TIEMPO1 ≥ 60 min) ENTONCES  
    TIEMPO1:= DETENIDO;  
    TIEMPO1:= 0;
```

A partir de lo anterior, cada vez que el sistema estime necesario realizar algún tipo de acción, revisará que haya transcurrido el tiempo suficiente desde la última modificación, es decir, cuando el mismo sistema haya reiniciado los tiempos y su contador se encuentre en el valor cero. En caso de cumplirse esta condición, entonces activará el contador de tiempo respectivo al mismo instante que ejecuta la acción.

De esta forma, en aquellos cambios de magnitud de $300 \text{ m}^3/\text{h}$ en el flujo de descarga que son considerados urgentes, se ha definido que sólo estarán limitados por el TIEMPO1, es decir, modificaciones del mismo tipo, obteniéndose declaraciones del siguiente tipo:

SI (TORQUE $\geq 13 \%$) Y (TIEMPO1 = 0) *ENTONCES*
TIEMPO1:= ACTIVADO;
...

Las acciones que implican cambios en el flujo de descarga en el rango $100\text{-}250 \text{ m}^3/\text{h}$, tienen una configuración especial. No sólo están limitados por su respectivo TIEMPO2, sino que también analizan las acciones asociadas al TIEMPO1, que se explicó anteriormente, dado que se trata de modificaciones en el mismo recurso y de mayor magnitud, que pudiesen ser suficientes para corregir alguna desviación de las variables. Ahora bien, considerando que ambos implican cambios en el flujo de descarga, este tipo de acciones activará el TIEMPO2 y el TIEMPO1 a una cierta proporción, para evitar acciones que sumadas provoquen poca precisión en el control. Las declaraciones, respecto a configuración de tiempo, se establecen de la siguiente forma:

SI ($107 \text{ kPa} \leq \text{P.CAMA} \leq 110 \text{ kPa (+)}$) Y (TIEMPO1 = 0) Y (TIEMPO2 = 0) *ENTONCES*
TIEMPO2:= ACTIVADO;
TIEMPO1:= (60 min) *0,5;
TIEMPO1:= ACTIVADO;
...

Finalmente, los cambios asociados a la dosis de floculante que se adiciona al espesador, están limitados por los tiempos de los tres tipos de acción y tras su ejecución activan el correspondiente TIEMPO3, por medio de declaraciones del siguiente tipo:

SI (INTERFASE $< 3,8$) Y (TIEMPO1 = 0) Y (TIEMPO2 = 0) Y (TIEMPO3 = 0) *ENTONCES*
TIEMPO3:= ACTIVADO;
...

Como se explicó en la Sección 5.5 del presente documento, la relación entre la aplicación de estos tiempos de control y los resultados obtenidos por parte del sistema experto, generan la oportunidad de estudiar situaciones específicas que pueden llevar a una reacción excesiva en términos de acciones ejecutadas por la lógica. Deberá analizarse, la presencia de estas situaciones, su frecuencia y la relevancia en los resultados, como por ejemplo, frente a la determinación por parte del sistema de llevar a cabo acciones consecutivas del mismo tipo.

6.3.2 Ajuste Dosis de Floculante

Según lo detallado anteriormente, la Planta de Floculante tiene una capacidad de 1,5 ton/día para este compuesto, lo que traducido en términos horarios, significa 62,5 kg/h.

Como la planta de floculante, lleva a cabo ciclos de preparación con una duración en torno a 2h, el compuesto se almacena en un estanque de mayor dimensión que el de mezclado, para entregar mayor autonomía a la planta. El nivel de este estanque de almacenamiento, oscila sistemáticamente dentro de un rango, conforme se realiza la transferencia del compuesto desde el estanque de mezcla, una vez terminado el ciclo.

Ahora bien, el hecho que la capacidad de la planta sea limitada, implica la necesidad de la constante observación en el nivel de este estanque de almacenamiento. Esto dado que, bajo ciertas condiciones de adición de floculante y alimentación de sólidos a la planta, puede generarse un progresivo descenso del nivel, independiente de los ciclos de llenado. A modo de ejemplo, la Figura 6.7 muestra que, a pesar que los ciclos de carga se realizan en forma periódica, en términos generales se observa un descenso progresivo del nivel en el estanque.

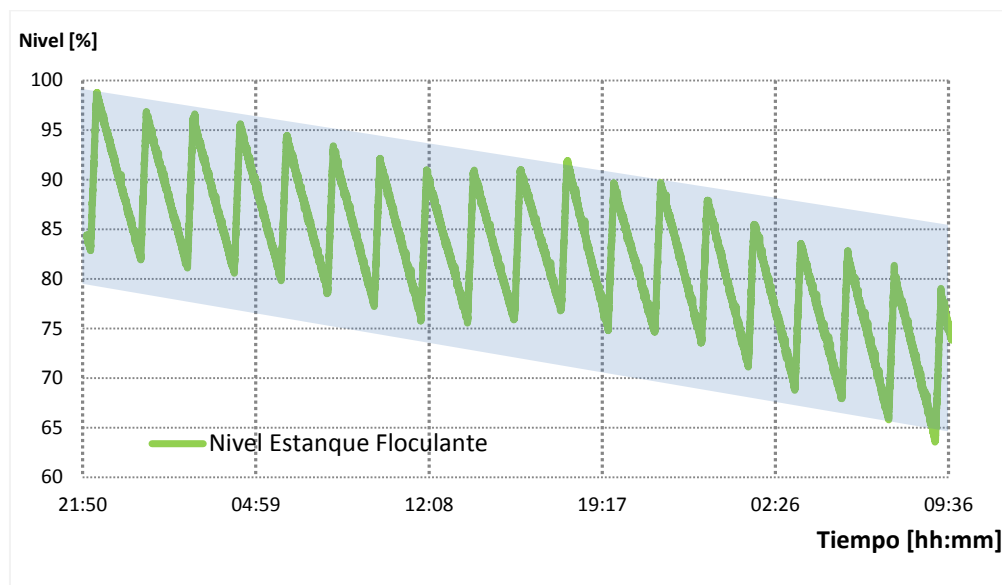


Figura 6.7 Descenso de Nivel Estanque Almacenamiento Floculante

Realizando un sencillo análisis, a partir de la capacidad de 62,5 kg/h en la planta de floculante, se puede determinar el tonelaje de alimentación máximo que impide un descenso en el nivel del estanque, en función de la dosis que se esté utilizando en ese instante. Para valores mayores a los indicados en la Tabla 6.1, se generará un fenómeno como el mostrado en el gráfico anterior, con el cual se puede seguir operando durante varias horas, pero debe tenerse particular cuidado de no agotar completamente el recurso.

Tabla 6.1 Relación Floculante-Alimentación según Capacidad de Planta

Dosis de Floculante [g/ton]	Alimentación límite de sólidos [ton/h]
18	3472
17	3676
16	3906
15	4167
14	4464
13	4808

Para evitar alcanzar estas posibles situaciones, y complementando el objetivo de la lógica de reducir el consumo de floculante, se adicionaron nuevas reglas independientes que funcionan considerando la capacidad de la planta.

Estas nuevas reglas, se encargan de ajustar la dosis máxima que puede utilizar el sistema experto para controlar la operación, en función del tonelaje de alimentación a la planta o el nivel del estanque de almacenamiento según corresponda (véase Tabla 6.2). Adicionalmente se incorpora una regla, que tiene relación con reducir el consumo de floculante, cuando la capacidad de la planta es muy baja, asumiendo que independiente del uso de recursos que se utilice, no es posible conseguir una descarga con el sólido deseado. Esta regla en particular, es solicitada por las autoridades del área de operaciones de la planta, y no responde a un análisis técnico asociado directamente a la lógica de control.

Tabla 6.2 Modificación Dosis Máxima de Floculante

Alimentación Planta	Dosis Floculante Máxima
Tonelaje Alimentación > 4300 ton/h	16 g/ton (REF - 1)
Tonelaje Alimentación < 3400 ton/h	15 g/ton (REF - 2)
3400 ton/h ≤ Tonelaje Alimentación ≤ 4300 ton/h	17 g/ton (REF)
Nivel Estanque < 60% / 50% / 30%	15 / 14 / 13 g/ton

Como se observa en la tabla, cada uno de los valores asignados, se determina a partir de un parámetro de referencia (REF), el que corresponde al valor ingresado como Dosis Máxima de Floculante, en los parámetros de la lógica de control y que pueden ser ajustados, de acuerdo a posteriores modificaciones en el compuesto utilizado o las condiciones de operación del espesador.

7 Análisis de Resultados y Oportunidades

Posterior al periodo de implementación y ajuste de la lógica, el sistema experto fue puesto en operación continua, tomando el control total del área de espesamiento de relaves de forma automática. De este modo se llevó un registro de cada una de las variables de interés en la operación y el tipo de respuestas ejecutadas por el sistema, dando lugar a una serie de resultados que se muestran en este capítulo.

Estos resultados se analizan en primer lugar, desde el punto de vista de la comparación entre la forma de actuar del sistema experto y el antiguo control de tipo manual, frente a distintas situaciones. Adicionalmente, se estudian los resultados globales para las variables de interés durante todo el periodo de operación, identificando la posibilidad de mejoras que pudiesen favorecer el funcionamiento del sistema experto. El registro completo del comportamiento de todas las variables de operación del equipo y el sistema experto se puede revisar en el Anexo A del presente documento.

7.1 Funcionamiento del Sistema Experto

Como se detalló en capítulos anteriores, el espesador de relaves cuenta con mediciones de porcentaje de torque, presión de cama de lodos, nivel de interfase y porcentaje de sólidos; las cuales representan las principales variables de monitoreo, que permiten analizar el comportamiento de un determinado tipo de control.

Para poder controlar estas variables de operación en general, se pueden manejar los recursos de flujo de descarga y dosificación de floculante en el equipo. Mientras que las principales perturbaciones del sistema, están asociadas a las características de la alimentación, por lo que se dispone como referencia, del flujo de sólidos que alimenta la planta de flotación.

En adelante, se analizan 4 casos característicos de la operación con el espesador de relaves, mostrando las acciones ejecutadas por el sistema experto y como afectaban éstas, a las variables de interés frente a situaciones similares durante la operación manual.

Las variables mostradas fueron escaladas de acuerdo a la Ecuación 7-1, donde Y_i representa la variable escalada, y_i la variable medida, e $y_{\max/\min}$ corresponden a los valores máximos/mínimos aceptables para la medición de y_i .

$$Y_i = \frac{y_i - y_{\min}}{y_{\max} - y_{\min}} \quad (7-1)$$

Los valores máximos y mínimos aceptables para la medición y_i han sido determinados a partir de los parámetros de diseño de la planta, y conforme a la experiencia en la operación de forma manual por parte de los expertos. De este modo la Tabla 7.1, muestra los valores máximos y mínimos para cada una de las variables que se analizan en adelante, de acuerdo al escalamiento indicado previamente.

Tabla 7.1 Definición de Límites Deseables en la Operación

Variable	y_{min}	y_{max}	Unidades
Torque	0	13	%
Porcentaje de Sólidos	50	62	%
Presión de Cama de Lodos	98	110	kPa
Nivel de Interfase	3,8	4,3	m
Flujo de Descarga	3600	6000	m ³ /h
Dosis de Floculante	12	18	g/ton
Tonelaje Sólidos de Alimentación	3500	4400	ton/h

Es importante tener presente, que para aquellas variables objetivo como el porcentaje de sólidos en la descarga del espesador, en la medida que la medición se acerque a valores de 1 de acuerdo al escalamiento, será un indicador de mejores resultados con respecto a valores menores.

Por otra parte, en el caso de los recursos de control como flujo de descarga y dosis de floculante, en la medida que las variables se acerquen a 0 y 1, representan la operación cerca de los límites permitidos y por ende la saturación del recurso.

Todas las variables graficadas en cada una de las situaciones, han sido clasificadas en la columna izquierda para mostrar el control automático del sistema experto, y en la columna derecha para los casos de operación manual.

Caso 1: Variaciones constantes en la Alimentación

La primera comparación muestra dos períodos de tiempo superior a 15 hrs de operación continua, donde se observan constantes variaciones en el flujo de alimentación a la planta y por ende al espesador de relaves. La operación con el sistema experto (Figura 7.1), logra obtener un mejor rendimiento en la recuperación de agua, observándose niveles de porcentaje de sólidos en torno al 66% del rango permitido, con todas las demás variables dentro de valores aceptables.

Mientras que durante la operación manual (Figura 7.2), pese a mantener las variables en el rango óptimo, sólo se alcanza un porcentaje de sólidos en torno al 51% del rango óptimo, pese a tener mejores condiciones de sólidos durante el período, lo que facilita la obtención de sólidos más altos en la descarga del equipo. Una variabilidad mayor en la lectura de sólidos, sólo se debe a presencia de ruido en la medición. En ambos períodos, se utilizó la misma dosis de floculante, utilizándose como recurso de control el flujo de descarga del espesador.

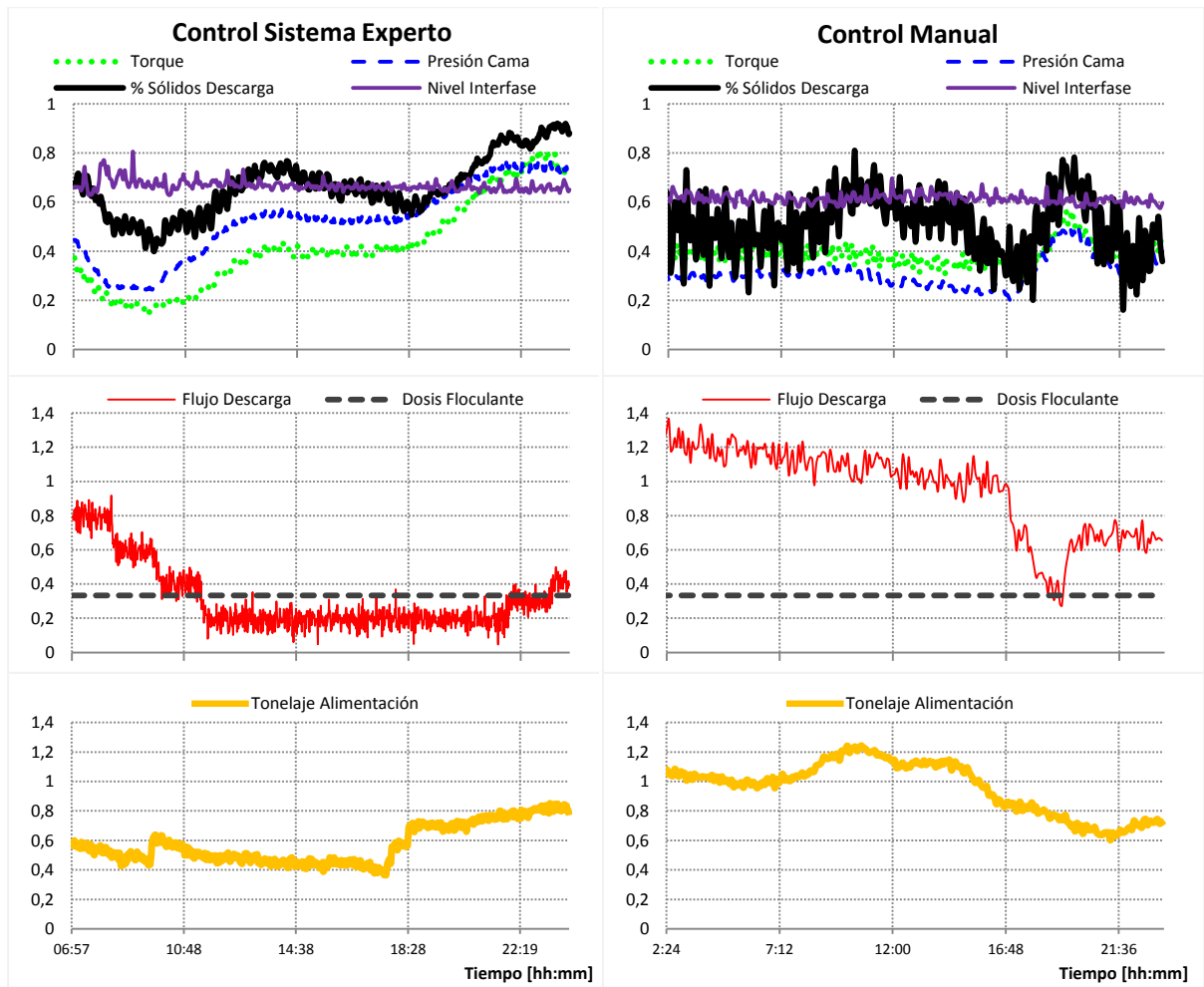


Figura 7.1 Operación Experto Caso 1

Figura 7.2 Operación Manual Caso 1

Caso 2: Alto tonelaje de alimentación

Este análisis muestra períodos de operación de más de 10 horas, donde se presentaron condiciones caracterizadas por un alto flujo de sólidos en la alimentación. La operación con el sistema experto activado (Figura 7.3), consiguió ajustar oportunamente el flujo de descarga del equipo, obteniendo porcentaje de sólidos en ella en torno al 77% del rango óptimo, mientras todas las demás variables de interés oscilaron alrededor del 66% de sus respectivos límites.

Por su parte la operación manual (Figura 7.4), sólo obtuvo porcentajes de sólidos en torno al 61% de sus niveles óptimos, existiendo la oportunidad de mejorarlo ya que las variables de interés sólo se ubicaban en torno al 41% de sus rangos. Aprovechando las condiciones mostradas, el sistema experto incluso reduce la dosis de floculante, disminuyendo así el consumo de este compuesto.

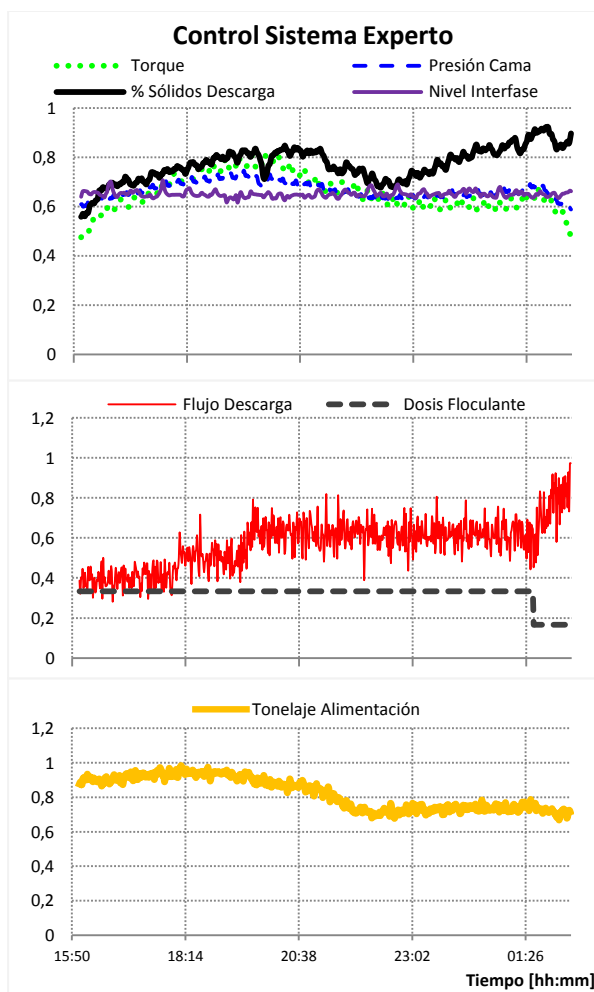


Figura 7.3 Operación Experto Caso 2

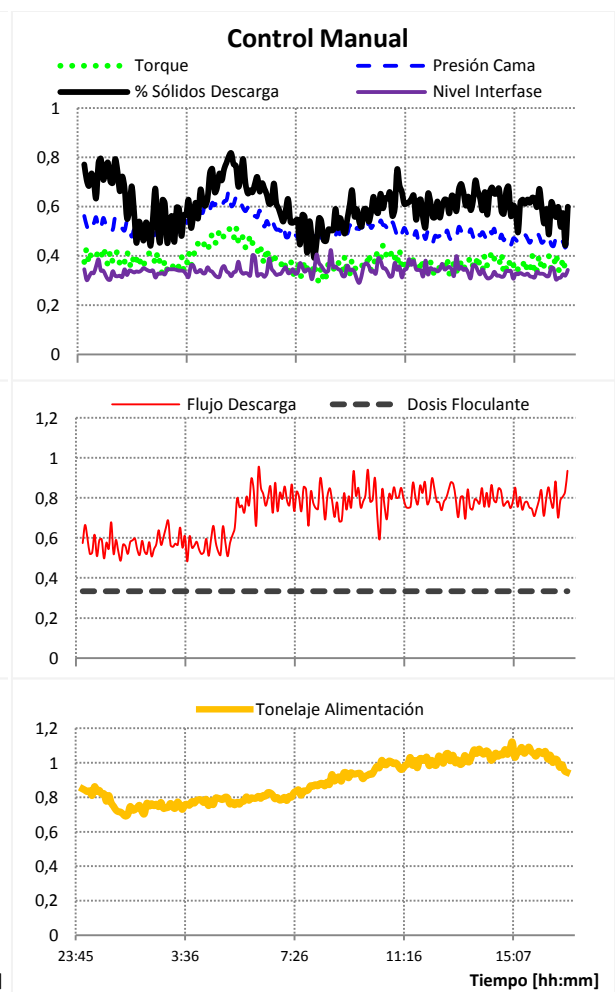


Figura 7.4 Operación Manual Caso 2

Caso 3: Bajo tonelaje de Alimentación

Esta tercera situación analizada, responde a períodos durante los cuales se reduce significativamente el flujo de sólidos que se alimenta al equipo, a causa de variaciones en el flujo recibido desde la planta de molienda. Bajo estas condiciones, el sistema experto (Figura 7.5) reduce el flujo de descarga al mínimo, de acuerdo a las restricciones del sistema, logrando mantener las variables dependientes dentro del rango permitido durante todo momento.

En caso contrario, durante la operación manual (Figura 7.6) no se lleva a cabo un ajuste correcto del flujo de descarga, generando que la variable de porcentaje de sólidos escape por debajo del rango esperado, lo que implica una importante disminución en la recuperación de agua, pese a que la reducción de tonelaje no fue tan significativa, como en la operación automática.

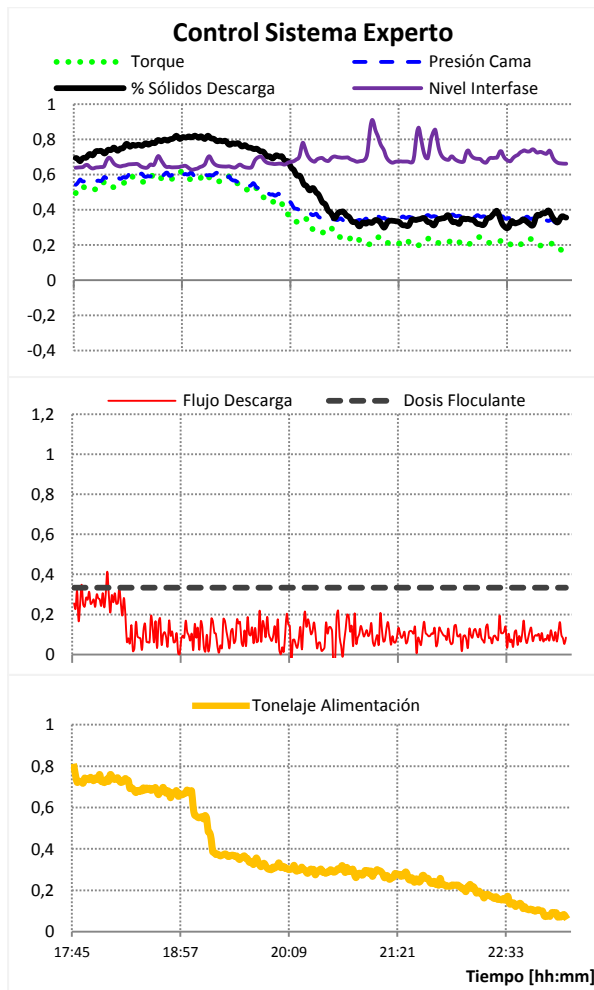


Figura 7.5 Operación Experto Caso 3

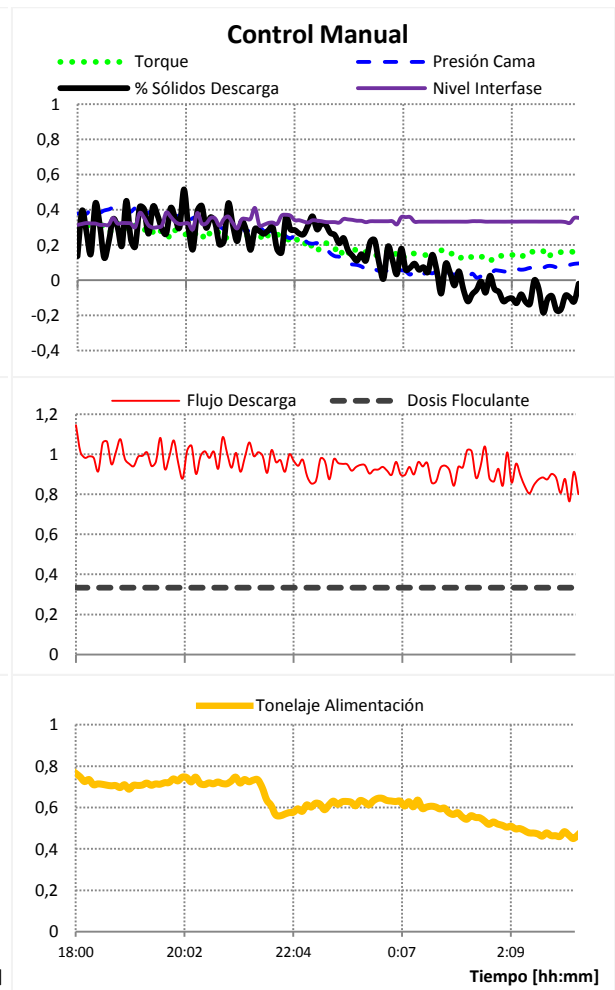


Figura 7.6 Operación Manual Caso 3

Caso 4: Condiciones óptimas de operación

El cuarto análisis muestra situaciones de operación durante las cuales, la planta recibió un flujo de alimentación óptimo y donde ambos tipos de control, hicieron manejo de ambos recursos para el ajuste de las variables. En el caso de la operación con el sistema experto activado (Figura 7.7), muestra la obtención de sólidos de descarga en torno al 83% del rango óptimo, mediante el ajuste en el flujo descarga y la reducción en el consumo de floculante, asegurando además el control de las demás variables dentro de los valores permitidos.

Mientras tanto, para una situación similar de flujo de alimentación, el control de tipo manual (Figura 7.8) genera situaciones de riesgo en el equipo asociadas a un alto torque, obligando a un posterior ajuste, que perjudica el rendimiento del equipo alcanzando un bajo porcentaje de sólidos, alrededor del 54% de su rango esperado. Respecto al consumo de floculante, se distingue un mayor consumo en el caso manual, frente a la operación con el sistema experto.

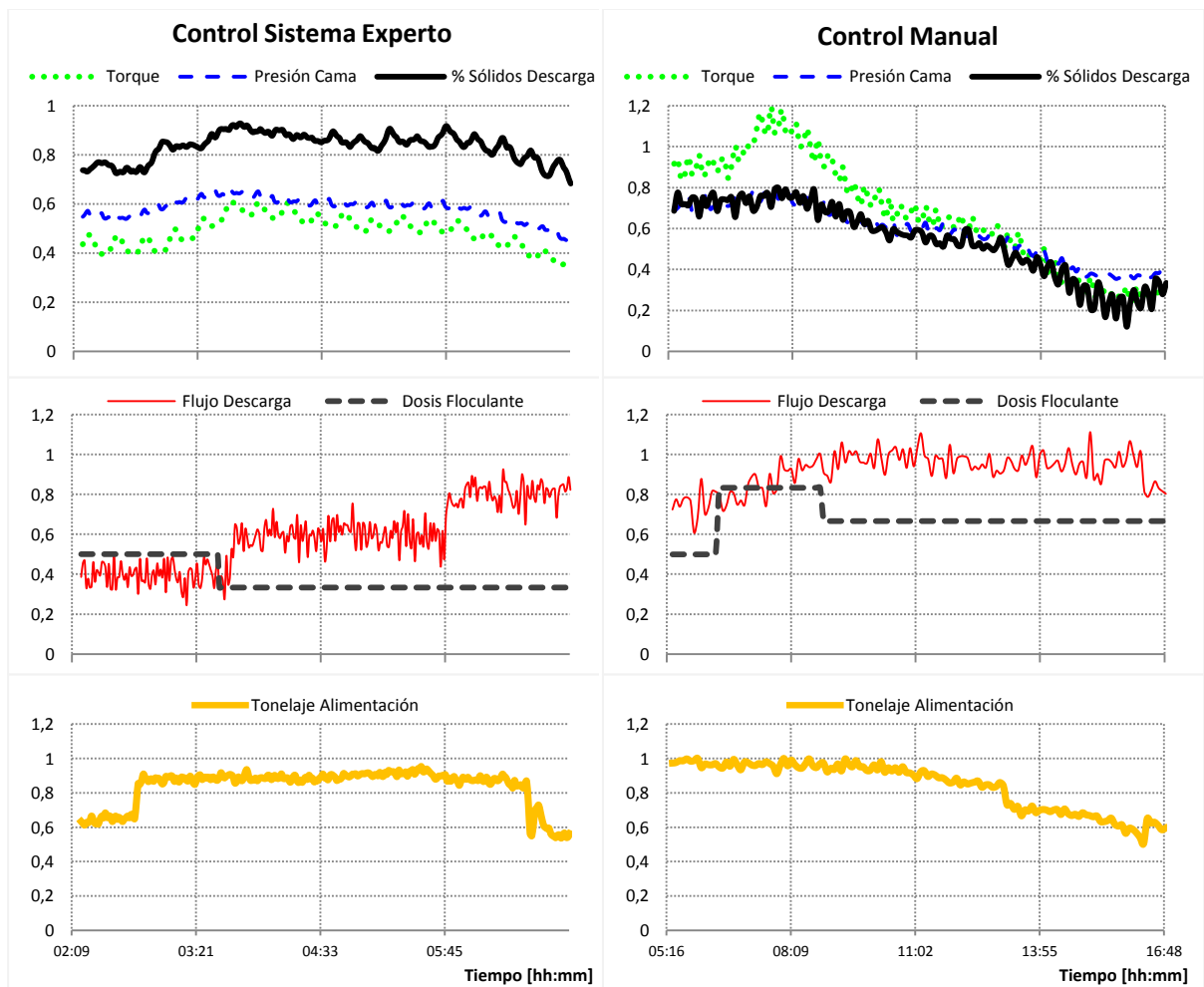


Figura 7.7 Operación Experto Caso 4

Figura 7.8 Operación Manual Caso 4

7.2 Resultados Globales

Los resultados que se muestran en este capítulo, corresponden al comportamiento de las variables de interés, durante el período de operación automática del sistema experto entre el 9 de Diciembre de 2013 y el 6 de Enero de 2014, en el espesador de relaves de Planta “Las Tórtolas”.

Durante todo este período el sistema experto permaneció activado el 85,4% del tiempo, independiente de las condiciones de operación. Considerando que la planta recibió alimentación por parte de molienda un 95,7% del período, el resultado real de tiempo de operación del sistema experto corresponde a un 89,2%.

Durante esta operación, se analizan la distribución de sólidos en la descarga del equipo, las principales variables de operación y los antecedentes con respecto al consumo de floculante en el espesador. Cada uno de los resultados del sistema experto, es comparado con otro período de tiempo de la misma duración, bajo operación manual previa a la implementación del sistema automático. La comparación se lleva a cabo considerando los resultados obtenidos bajo operación normal de la planta en ambos casos, pues como se analizará en el ítem de oportunidades, para bajo tonelaje de alimentación no es posible obtener condiciones de operación según lo deseado, debido principalmente a la limitante en el flujo mínimo de pulpa en la descarga del equipo.

Las gráficas de distribución que se muestran para cada variable analizada en el espesador, consideran una base de cálculo temporal de 1 minuto, correspondiente a la frecuencia con que se almacenaron los datos para análisis durante el período de operación mencionado.

7.2.1 Distribución de Sólidos de Descarga

Tal como se señaló anteriormente, el porcentaje de sólidos en la descarga del espesador es un indicador del rendimiento en la recuperación de agua en el *overflow*. En la medida que se maximiza el porcentaje de sólidos en el *underflow*, mayor es la cantidad de agua recuperada en el equipo. En la medida que un tipo de control no es capaz de mantener el porcentaje de sólido dentro de valores aceptables, se pierde la posibilidad de recuperar una importante cantidad de agua que finalmente desemboca en el tranque de relaves junto con los sólidos depositados, desde donde es posible recuperarla pero por supuesto, implica un costo mayor en términos de energía consumida para trasladarla.

De este modo la lógica de control diseñada, fue pensada en lograr mantener el porcentaje de sólidos del *underflow*, dentro de los márgenes esperados y optimizando su valor junto con

asegurar el control operacional de las variables del espesador y en lo posible, minimizar el consumo de floculante que se adiciona al equipo.

Como se observa en la Figura 7.9, la operación con el sistema experto logró desplazar la distribución de porcentaje de sólidos hacia valores más altos y con una menor variabilidad con respecto al conseguido por la operación manual.

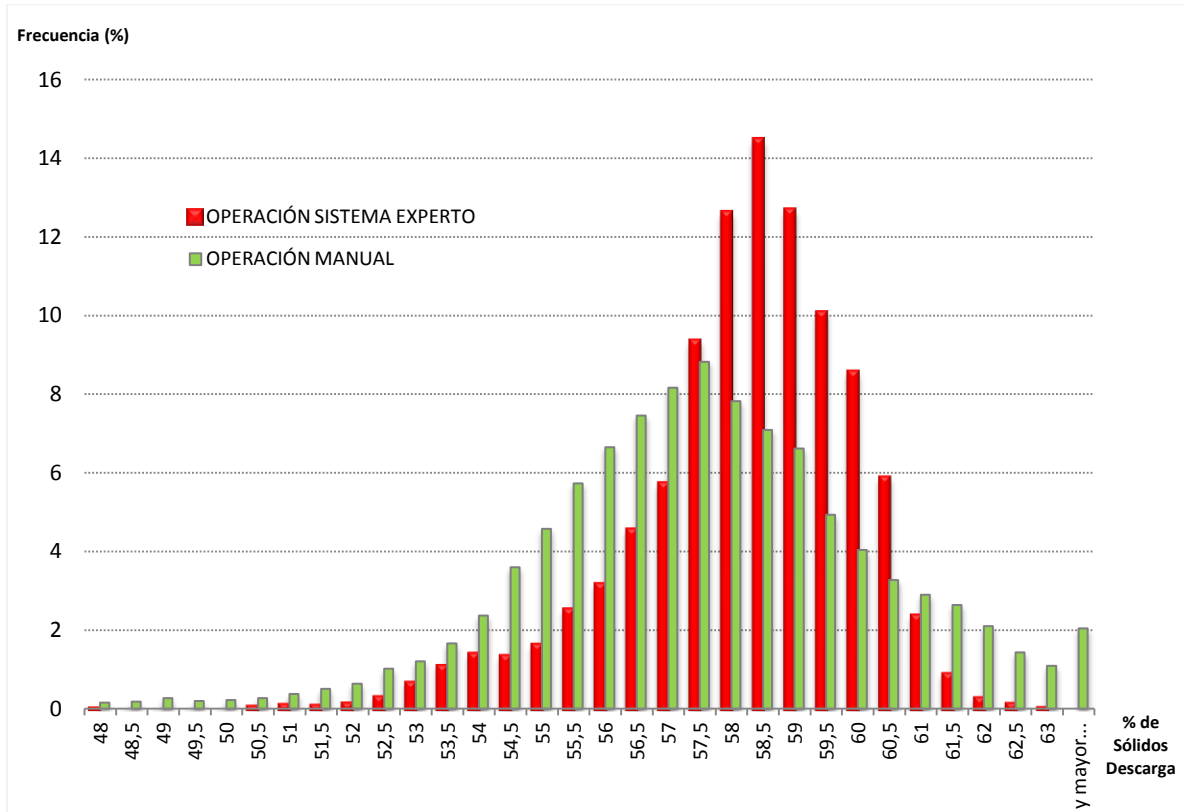


Figura 7.9 Distribución de Sólidos Sistema Experto

Es posible observar, que la media en el porcentaje de sólidos de descarga se ve incrementada, mientras que la varianza disminuye durante la operación del sistema experto. De esta forma, la operación automática logró incrementar de forma significativa los periodos durante los cuales el porcentaje de sólidos alcanzó valores entre 58 y 60%, lo que implica un importante aumento en la recuperación de agua.

En este sentido, el aumento alcanzado corresponde a un 3% con respecto a la concentración de sólidos lograda por la operación manual, una diferencia que en términos de agua recuperada significa alrededor de 6000 m³/día adicionales.

Es importante analizar además, que en la distribución de sólidos mostrada el sistema experto fue capaz de evitar situaciones en que el sólido alcanzara un 63% o incluso valores

superiores, a diferencia de la operación manual donde estos eventos si fueron significativos en términos de frecuencia, con el inminente riesgo de embancamiento por acumulación de sólidos. De esta forma, la lógica de control demostró poder optimizar el rango de operación en términos de porcentaje de sólido obtenidos, sin poner en riesgo el equipo o la misma operación.

Desde otro punto de vista, disminuyó significativamente la frecuencia en la obtención de bajos porcentajes de sólidos, con respecto a la obtenida por medio de la operación manual. Ahora bien, la presencia de este tipo de resultados, aunque sean menos frecuentes representan una oportunidad de mejora, asociada principalmente a dos restricciones presentes en la operación. La primera de ellas, dice relación con una temática que se abordó anteriormente, con respecto a la limitante en la capacidad de preparación en la planta de floculante, lo que obliga a restringir su utilización bajo ciertas condiciones en la alimentación e impide aprovechar el recurso en todo su rango, en busca de optimizar los sólidos en la descarga del espesador. La segunda restricción, se relaciona con la limitante de flujo mínimo de descarga en el underflow, que para bajos tonelajes en la alimentación impide obtener porcentajes de sólidos en un rango óptimo.

Finalmente, otro fenómeno que será analizado en el ítem de oportunidades, corresponde a la dependencia del porcentaje de sólidos con respecto a las variaciones en el flujo de alimentación a la planta y por ende al equipo. Las perturbaciones bruscas en la corriente de alimentación, representan una parte de las razones que explican la presencia de situaciones, con un porcentaje de sólidos fuera del rango óptimo.

7.2.2 Otras Variables de Operación

Otro de los indicadores importantes para evaluar el desempeño del sistema experto, corresponde al consumo de floculante asociado a su operación. Para ello se utilizan herramientas de totalización, que permiten determinar de forma equivalente entre dos periodos, la dosificación utilizada con respecto a las toneladas de sólido procesado.

De este modo, durante el período previo a la puesta en servicio del sistema experto, la operación alcanzó un consumo de floculante ponderado de 16,19 g/ton de mineral sólido alimentado. Durante las primeras semanas de pruebas del sistema automático, la dosificación de floculante alcanzó el valor de 15,55 g/ton, lo que representa una reducción en el consumo de un 3,95%. Posteriormente, cuando al sistema se incorporaron las reglas lógicas asociadas a la restricción en la planta de floculante, el sistema ponderó una dosificación de 15,27 g/ton, lo que representa una reducción de un 5,71% en el consumo del compuesto, asumiendo las implicancias que esto generó en términos de resultado en el porcentaje de sólidos obtenido.

De cualquier forma, en ambos casos se observa una reducción en el consumo de floculante, lo que a largo plazo puede implicar una reducción en los costos operacionales de la planta, obteniendo al mismo tiempo una mejor distribución de sólidos en la descarga del equipo y asegurando una correcta operación sin situaciones de riesgo, a través de la implementación de este sistema experto.

Precisamente con respecto a asegurar una operación correcta en el espesador de relaves, es que resulta importante analizar el comportamiento de otras variables de operación en el equipo, tales como porcentaje de torque y presión de cama de lodos.

En el caso del torque asociado al movimiento del sistema de rastras, la Figura 7.10 muestra la distribución de esta variable durante la operación con el sistema experto, frente a períodos anteriores sin su implementación. En ella se observa, como el sistema experto fue capaz de mejorar el aprovechamiento del rango disponible, en el sentido de favorecer una operación con porcentajes de torque entre 8 y 10%, lo que implica una mayor compactación de la cama de lodos favoreciendo así la obtención de sólidos de descarga más altos.

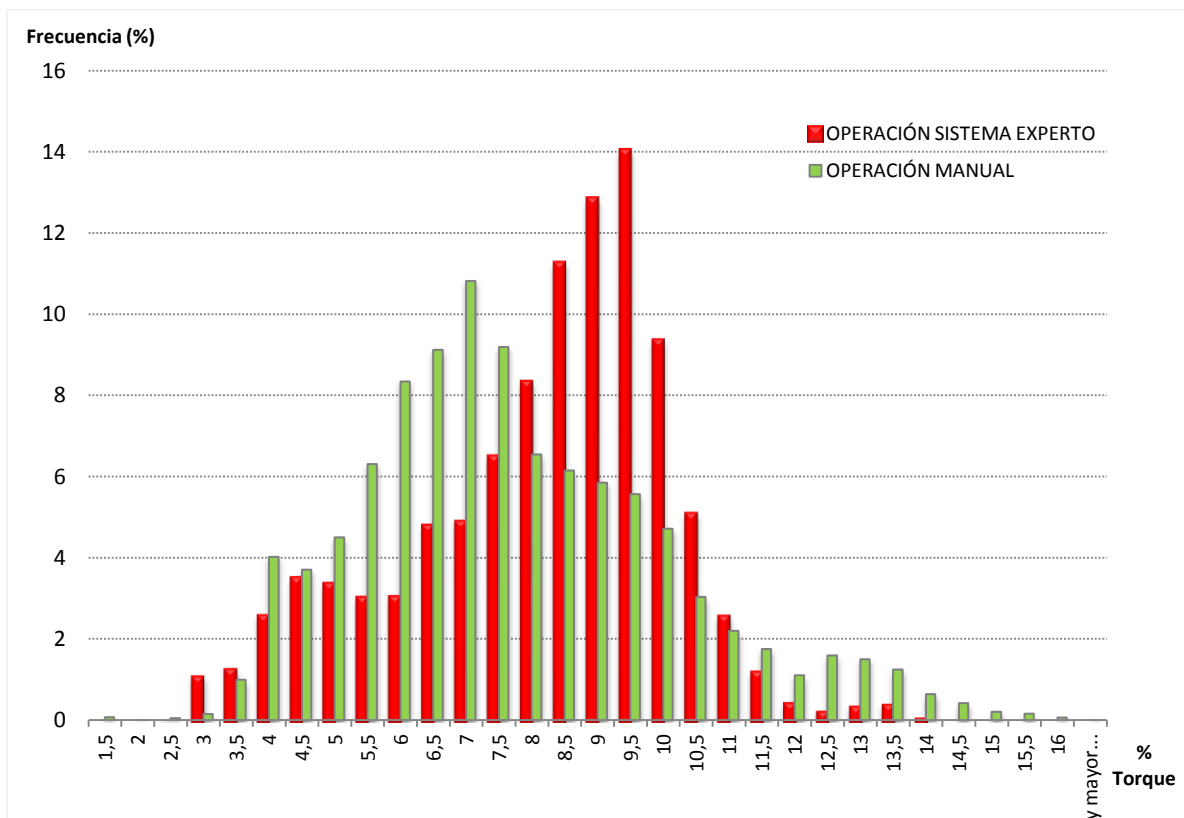


Figura 7.10 Distribución de Torque Sistema Experto

De un modo similar al observado en la distribución de porcentaje de sólidos, el sistema experto logró reducir de forma importante, todas aquellas situaciones que pudiesen desencadenar un riesgo para el equipo, asociado a valores de torque por sobre un 13%. Por su parte la variabilidad que explica la obtención de valores más bajos en esta variable, están asociadas a características mineralógicas de la alimentación y los fenómenos detallados anteriormente, que implican además una reducción en el porcentaje de sólidos del *underflow*.

Otra variable de interés, para evaluar el desempeño del sistema experto corresponde al comportamiento de la presión de cama de lodos al interior del equipo y que está directamente relacionada con el porcentaje de sólidos que se obtiene en la descarga. Esto debido a que la acumulación de sólidos en el fondo del tanque es un indicador del fenómeno de sedimentación que ocurre al interior del equipo y que se traduce finalmente en la concentración de sólidos que se alcanza en el *underflow*.

En este sentido la Figura 7.11 muestra que al igual que en la distribución de sólidos, el sistema experto logra aumentar la media y reducir la varianza de los datos de esta variable.

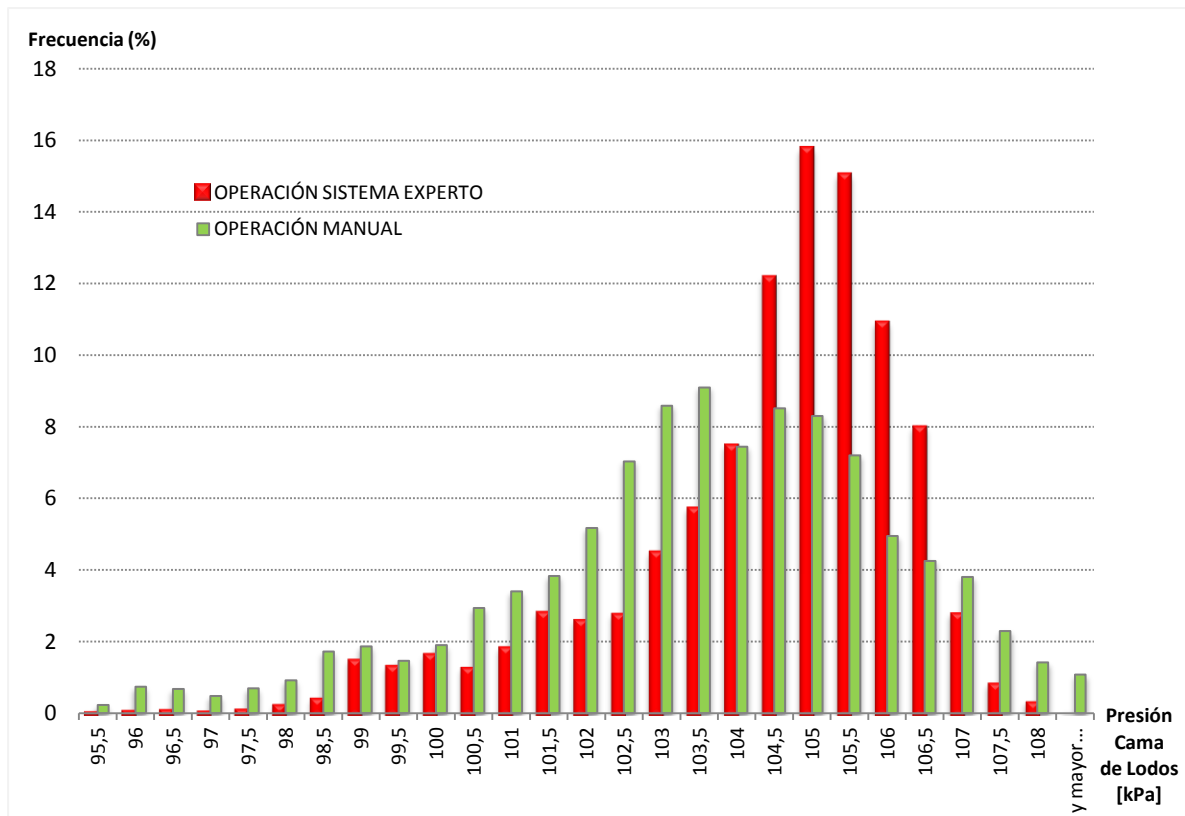


Figura 7.11 Distribución de Presión de la Cama Sistema Experto

Consecuentemente con los análisis anteriores, durante la operación con el sistema experto se reduce al mínimo la presencia de riesgo para el equipo asociado a acumulación excesiva de partículas sólidas en el fondo del tanque. Asimismo, las situaciones de baja presión de la cama de lodos representan una oportunidad de mejora para la optimización en el proceso de recuperación de agua.

7.3 Identificación de Oportunidades

El reconocimiento de situaciones que pueden dar lugar a una mejora o beneficio en la operación de espesamiento de relaves, se origina a partir del análisis de resultados y las observaciones durante el funcionamiento del sistema experto. Las oportunidades pueden estar asociadas directamente con el diseño de la lógica de control o indirectamente a través de condiciones del sistema, que pudiesen favorecer los resultados obtenidos por parte de la operación automática.

De acuerdo a lo anterior, esta sección se ha clasificado en tres temáticas, que bajo el actual sistema de operación del área de espesamiento de relaves, representan una importante oportunidad de optimización.

7.3.1 Recuperación de Agua

Como se indicó en el Capítulo 4, el agua clara que se recupera por el *overflow* del espesador de relaves se recibe en una piscina de agua recuperada, desde la cual se bombea hasta los estanques de agua de proceso de la planta para su reutilización. Esta piscina cuenta con un lazo independiente para controlar el nivel a través del bombeo y la recirculación de parte del flujo, que no se encuentra en operación debido precisamente a problemas con la estructura de recirculación.

Estos inconvenientes, hacen que el operador de sala de control deba manejar el nivel a través de la continua partida y detención de alguna bomba del sistema. En caso de rebalse en la piscina, esta agua se conecta con la misma descarga del espesador, dirigiéndose finalmente al tranque de la planta con el resto de la pulpa.

Debido a que las bombas son de velocidad fija y de acuerdo a su capacidad, con el funcionamiento de una sola bomba el nivel de agua en la piscina típicamente aumenta de forma progresiva, mientras que con el funcionamiento de dos bombas, el nivel comienza a descender rápidamente. Con este funcionamiento el operador debe controlar de forma manual el nivel de la piscina de agua recuperada, por medio de la activación de una o dos bombas.

Bajo estas condiciones y en función de la recuperación de agua en el *overflow* del espesador de relaves, ocurren constantes fenómenos como el que se muestra en la Figura 7.12, en desmedro de las mejoras logradas por la operación del sistema experto. A modo de ejemplo, en la gráfica se observa que durante más de 4 horas, la piscina se encontraba llena hasta su nivel de rebalse y por ende, perdiendo parte importante del agua que se había recuperado en el espesador. Entiéndase que según la calibración del sensor de nivel, el 100% representa el valor máximo esperado, mientras el rebalse de la piscina se ubica en torno a un 115%.

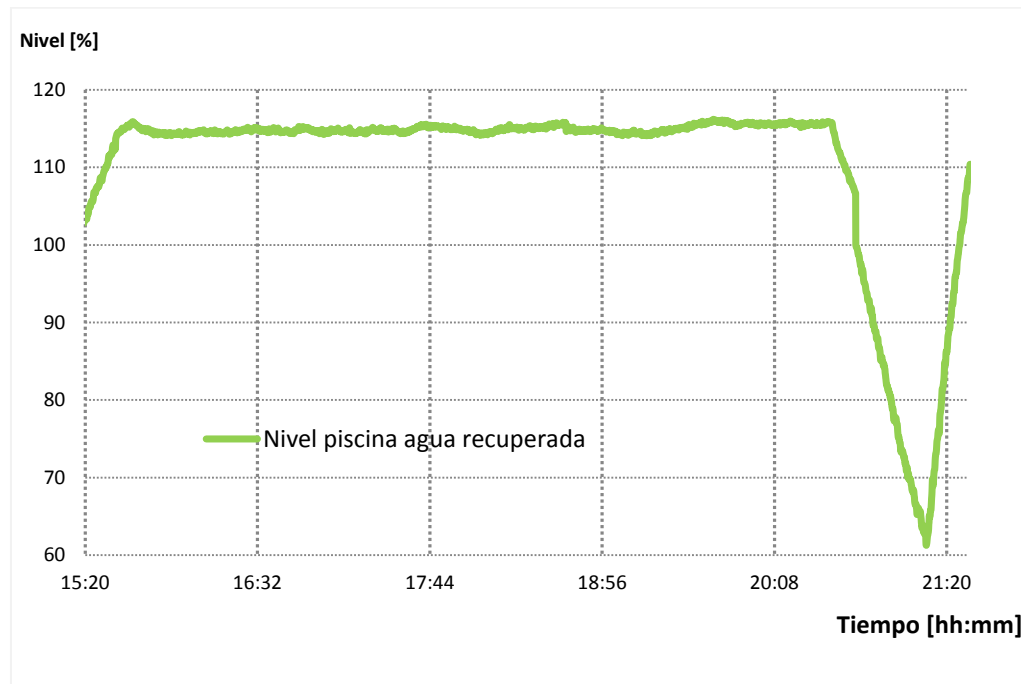


Figura 7.12 Recuperación de Agua desde el Overflow

Adicionalmente es posible observar, que tras el largo período de pérdida de agua, se da partida a una bomba adicional disminuyendo el nivel acumulado, mientras que al detenerla se reactiva el acelerado aumento de nivel en la piscina. Cabe mencionar, que la situación observada de rebalse en la piscina de agua recuperada, es frecuente en la operación por la imposibilidad de uso en el sistema de control de nivel y dado que no representa un riesgo desde el punto de vista operacional o ambiental.

Por supuesto, aunque no existe un riesgo asociado a estas situaciones, la oportunidad responde a la continua pérdida de agua que previamente ha sido recuperada en la operación del espesador de relaves. De este modo, se pierde una parte significativa de las mejoras que se logran con el sistema experto, mediante el aumento de porcentaje de sólidos en la descarga, que responde precisamente a una mayor recuperación de agua en el *overflow*.

Reconociendo la importancia del agua en las plantas de procesamiento minero, es necesario buscar una solución a estas situaciones, ya que en caso contrario cualquier optimización en el espesamiento de relaves pierde sentido práctico. La primera alternativa, apunta a solucionar la falla estructural en la descarga de la línea de recirculación, que impide la utilización del control de nivel.

Una segunda propuesta que permitiría recuperar el sistema de control de nivel y así evitar situaciones de rebalse en la piscina, corresponde a unir la descarga de la línea de recirculación con la línea que alimenta la piscina desde el espesador de relaves, como se muestra en la Figura 7.13. Unir estas dos líneas bajo el funcionamiento del sistema de control de nivel, implica estabilizar el flujo total ingresado a la piscina, siendo equivalente al flujo que sea bombeado por una o dos bombas según sea necesario.

En ambos casos, el flujo no excede de un 17% adicional con respecto al promedio de agua recuperada que se ingresa, siendo significativamente menor a los máximos valores que se han alimentado a la piscina y más aún a los valores de diseño, ratificando así la factibilidad técnica de la conexión propuesta.

De este modo, se aprovecha el lazo de control ya existente que permite regular el flujo recirculado, igualando el flujo de entrada y salida de la piscina, controlando así el nivel de la misma.

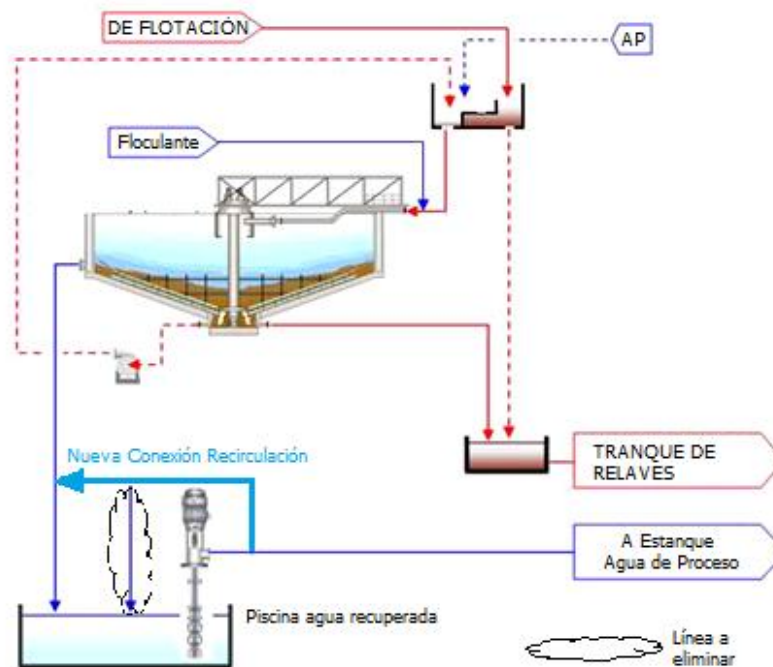


Figura 7.13 Oportunidad Piscina Agua Recuperada

7.3.2 Situaciones de Bajo Tonelaje en la Alimentación

Tanto en la operación manual como en el funcionamiento del sistema experto, fue posible observar que la recomendación de diseño de mantener el flujo de descarga por sobre los 3600 m³/h, representa una fuerte restricción de optimizar el porcentaje de sólidos en la descarga del espesador bajo ciertas condiciones en la alimentación.

En particular, cuando el flujo de sólidos que alimenta la planta se encuentre en torno a las 3000 ton/h o bajo este valor, es imposible lograr porcentajes de sólidos en la descarga dentro de la especificación deseada. En otras palabras, estas condiciones generadas como efecto de las variaciones en la operación de molienda, generan la obtención de descargas en el espesador con concentraciones de sólido bajo un 54%, debido a la restricción en el flujo mínimo de pulpa que se descarga del equipo. Al no poder reducir el flujo de descarga, e independiente de la dosis de floculante que se utilice, se pierde la posibilidad de recuperar parte del agua desde la pulpa, tal como se observa en la Figura 7.14.

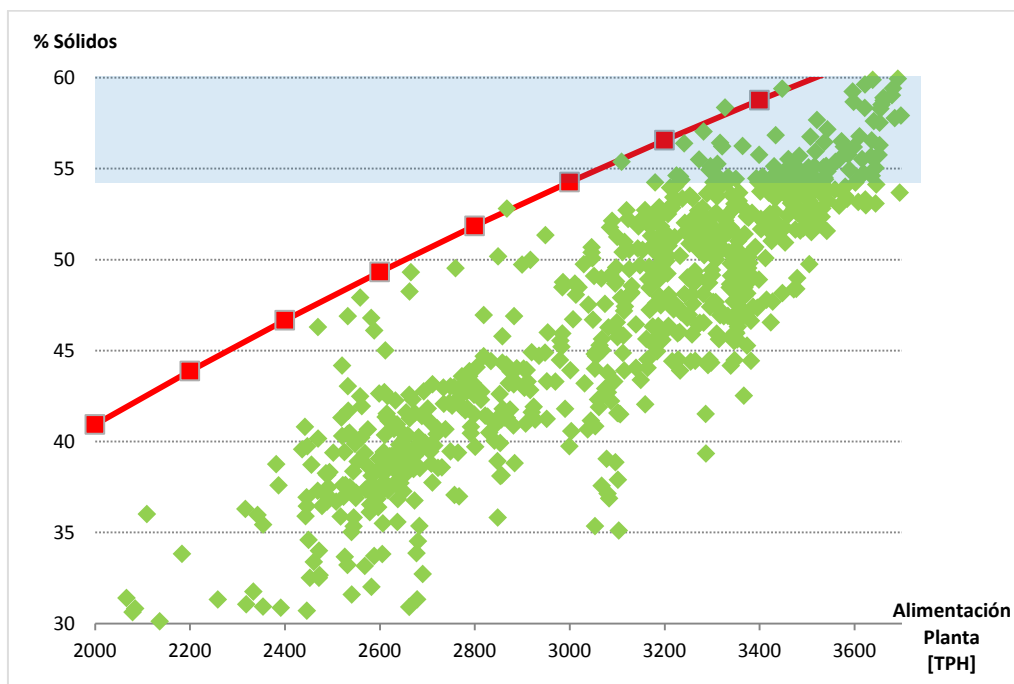


Figura 7.14 Oportunidad para Bajo Tonelaje de Alimentación

En la misma gráfica, se observa que a medida que disminuye el tonelaje de alimentación en la planta, se reduce proporcionalmente el porcentaje de sólidos obtenido, con resultados distantes de la especificación deseada (área azulada). Por su parte la curva de color rojo, representa la máxima concentración de sólidos que se puede obtener debido a la restricción

de mínimo flujo de descarga para evitar el embancamiento, generada por balance de materia en el espesador. De este modo, el área que se ubica por sobre esta curva representa una oportunidad importante de mejora en la operación del espesador de relaves, optimizando así la recuperación de agua durante estos períodos.

Una alternativa es habilitar la línea de recirculación, para disponer de ellas frente a situaciones de bajo tonelaje de alimentación permitiendo de este modo una mayor acumulación de sólidos hasta alcanzar valores óptimos en la descarga. Una segunda posibilidad, exige la realización de un análisis técnico – metalúrgico, que estudie la factibilidad de reducir el flujo hasta alcanzar un determinado valor de sólidos, o bien operar bajo ciertas condiciones con una sola línea en la descarga del espesador.

7.3.3 Optimización del Sistema Experto

En lo que respecta a líneas de investigación a futuro directamente asociadas al sistema experto elaborado, se han recogido tres puntos que permitirían una optimización del mecanismo, de acuerdo a las observaciones durante el período de análisis.

La primera línea de investigación posible, es la incorporación del flujo de alimentación a la planta, como parámetro de decisión en el motor de razonamiento del sistema. Esto implica que las reglas lógicas diseñadas, puedan sumar un factor adicional en términos de las respuestas ejecutadas, de acuerdo a las variaciones en el flujo de sólidos que ingresa al espesador.

La razón detrás de esta posibilidad de optimización, se explica por la importancia en los efectos que tienen las perturbaciones del flujo alimentado con los resultados obtenidos en la operación del equipo. En otras palabras, las perturbaciones de gran magnitud en los sólidos alimentados generan rápidas variaciones en las variables de control del espesador. Aprovechando esta situación, resultará interesante utilizar este indicador como elemento predictivo y de apoyo a la lógica, para determinar las respuestas necesarias para el sistema experto, mejorando así los resultados obtenidos.

En este mismo sentido, se pueden agregar estudios metalúrgicos respecto a la caracterización granulométrica del mineral que alimenta la planta, mediante el análisis histórico de parámetros característicos del proceso de molienda tales como las mediciones de p_{80} . De este modo, estudiar la correlación que puede existir entre las tendencias de p_{80} y la carga de sólidos en el espesador, permitiría incorporar un nuevo indicador como elemento predictivo que apoye las decisiones del sistema experto, a partir de las mediciones que se llevan a cabo en el producto de molienda.

Con la incorporación de estos elementos predictivos, sería posible que la lógica de control ejecute acciones que prevengan una variación significativa de las variables de control del espesador y con ello, reducir la varianza en la distribución de cada una.

Una segunda medida de mejora, tiene relación con aumentar las exigencias de puesta en marcha del sistema, en busca de asegurar con mayor certeza el correcto funcionamiento de las respuestas. En este sentido, es factible agregar a las condiciones requeridas, revisiones que permitan conocer el estado de los lazos de control de dosis de floculante y el PID creado para manejar la descarga del espesador.

En la actualidad, las condiciones para la puesta en marcha del sistema, aseguran que los lazos estén en modo automático, pero no aseguran que las mediciones respondan realmente a los valores de *setpoint* fijados para cada uno. Para corregir esta situación y evitar que se base en el criterio del operador, se puede incorporar algún tipo de análisis numérico, tales como error cuadrado medio (MSE) u otro similar, que permita establecer un criterio cuantitativo para comprobar el correcto desempeño de los lazos de control mencionados.

Un tercer análisis importante para futuros trabajos, dice relación con los análisis de turbidez en el agua que se recupera en el overflow del espesador, pruebas que en la actualidad se realizan sólo tres veces al día. La importancia de contar con otro tipo de análisis, ya sea mediciones más frecuentes o dispositivos de medición en línea conocidos como turbidímetros, radica en el apoyo que brindarían en la toma de decisiones por parte del operador o la lógica de razonamiento del sistema experto.

Esta medición en particular, puede ser prescindible para el control operacional, contando con los demás instrumentos que forman parte del sistema de espesamiento de relaves en la planta. Sin embargo, la oportunidad que motiva esta recomendación, está directamente relacionada con disminuir el consumo de floculante en el equipo y mejorar los tiempos de operación del sistema experto.

La optimización de ambos indicadores se explica, ya que una de las principales razones para detener el sistema experto durante algunos períodos de su operación, correspondía a observaciones visuales por parte de los operadores de terreno que estimaban necesario el aumento en la dosificación de floculante, aunque las demás variable de proceso no indicaran lo mismo.

Los análisis visuales apuntaban a la observación de turbidez en el *overflow*, o en otras palabras la supuesta visualización de sólidos en el agua recuperada. Sin embargo, las posteriores revisiones de los análisis de turbidez más cercanos a la hora en que el sistema

experto fue detenido por esta razón, no muestran ninguna alteración que pudiese ratificar la posible presencia de sólidos en el rebalse.

Ahora bien, dado los tiempos de muestreo y el envío de los análisis, el operador no contaba en ese momento con la información necesaria para comprobar o refutar su hipótesis. Por otra parte, es interesante analizar el efecto visual, que pudiese provocar en el espesador de relaves, la presencia de espumante a causa del aumento en su adición en la etapa de flotación.

Entonces, una medición en línea o un procedimiento de muestreo rápido que permita al operador, comprobar analíticamente la presencia de sólidos, seguramente reduciría las intervenciones que aumentan el consumo de floculante, obligando además a detener por momentos el control automático por parte del sistema experto.

8 Conclusiones y Recomendaciones

8.1 Conclusiones

- Reconociendo la importancia en el manejo y recuperación de agua en los procesos mineros, la operación del espesamiento de relaves en la planta de concentración “Las Tórtolas”, representa una oportunidad de optimización en la medida de aprovechar al máximo el agua contenida en la pulpa, pudiendo ser retirada antes de su envío al tranque de relaves.
- Tras su implementación el sistema experto demostró ser una potente herramienta, para controlar de forma automática el espesador de relaves, mejorando con ello el desempeño del equipo en términos de seguridad en la operación y de resultados en los indicadores más importantes.
- El sistema experto diseñado en base al encadenamiento de reglas lógicas, demostró ser un mecanismo suficientemente robusto para mantener el control operacional del equipo, prescindiendo de la necesidad de contar con un modelo confiable que describa la fenomenología de un espesador.
- Tras su implementación, el sistema experto se mantuvo en operación durante un periodo de 4 semanas, durante el cual su tiempo efectivo de activación alcanzó un total del 89,2%, lapso en cual controló sin inconvenientes la operación de espesamiento de relaves de forma completamente automática, sin requerir la participación de los operadores.
- El sistema demostró que es posible mantener las variables de proceso del equipo dentro de márgenes establecidos, basándose en las señales disponibles y pese a los constantes cambios en las características del flujo alimentado, evitando de este modo, la presencia de situaciones de riesgo para el equipo o la operación.
- Los tipos de respuestas ejecutados por el sistema experto, demostraron la factibilidad de controlar la operación a través de la utilización del flujo de descarga del espesador como recurso principal y manejar la dosificación de floculante sólo cuando sea estrictamente necesario, con el objetivo de reducir su consumo, logrando una disminución en torno al 4% con respecto a la operación manual.
- Las limitaciones en la capacidad de la planta de floculante, no representan un efecto significativo para mantener el control operacional del equipo, pero si pueden restringir la obtención de mejores resultados en la operación, en particular cuando se producen tonelajes de procesamiento más altos que el promedio.

- Los resultados mostrados indican que con la implementación del sistema experto se obtiene un control operacional de mayor estabilidad en las variables de proceso con respecto al control de tipo manual, reaccionando de forma oportuna frente a los cambios en el flujo de alimentación al espesador.
- El análisis histórico de sólidos muestra que el sistema permite obtener un significativo aumento en el porcentaje de sólidos en la descarga del espesador en torno a un 3%, lo que implica además un aumento importante del agua recuperada por el overflow, de alrededor de 6000 m³/día adicionales de este recurso.
- Las principales variables de proceso que se miden en el espesador de relaves, fueron controladas por el sistema experto manteniéndolas dentro del rango permitido para cada una y con una menor varianza en su distribución, en comparación a la operación manual.
- El sistema logra responder dentro de rangos de tiempo óptimos para mantener el control operacional del espesador, frente a los constantes cambios en el flujo de alimentación, observándose que esta variable es la principal perturbación del sistema.
- Bajo el sistema de espesamiento actual y con la operación del sistema experto, se determina la importancia de contar con flujos de alimentación dentro de un rango acotado, para poder obtener una descarga de sólidos según especificación. Sumado a ello, se observa que tanto la operación automática como manual, se ven limitadas debido a la restricción de mínimo flujo de pulpa en el *underflow*.
- Parte importante de las pautas de mantención actuales en la planta, no aseguran la calidad de las mediciones obtenidas por los instrumentos, lo que pudiese perjudicar la operación de cualquier tipo, ya sea manual o automática.
- Los resultados permiten asegurar además, la factibilidad de replicar la lógica de control para otros espesadores de la planta, adaptando las reglas lógicas en función de la instrumentación disponible y las condiciones propias de operación del nuevo equipo, manteniendo la estructura de razonamiento de la lógica diseñada.
- La aceptación de la tecnología por parte de los operadores fue muy satisfactoria, considerando que este tipo de sistemas tiende a generar cierto grado de rechazo, debido a la sensación de pérdida de control humano sobre el proceso u otras variables de índole subjetiva. Para obtener estos resultados, se requiere de una amplia incorporación por parte de los operadores, en la medida que se sientan partícipes de las mejoras y correcciones que se puedan desarrollar sobre el sistema.

8.2 Recomendaciones

- Uno de los principales motivos que desencadenó por instantes la necesidad de detener el sistema experto, era un análisis visual de los operadores de terreno que determinaban una supuesta presencia de sólidos en el overflow del espesador, sin que existieran otros indicadores que lo mostraran. En base al criterio anterior, detenían el sistema experto, con el objetivo de aumentar la dosificación de floculante de forma manual y generando un aumento en el consumo de este compuesto. En este sentido sería importante, contar con un procedimiento que permita la comprobación de esta observación, que pese a ser poco frecuente interfiere en el normal funcionamiento del sistema, incrementando además el consumo de floculante en la operación. Estos procedimientos pueden tratarse de la instalación de turbidímetros en línea o la exigencia de muestreos que certifiquen la real necesidad de una modificación de estas características.

- De modo similar, es importante contar con procedimientos establecidos para la revisión de variables e instrumentos de medición por parte de los operadores, durante la operación manual o cuando el sistema experto lo indique. Es por ello, que se recomienda incorporar a las pautas operacionales y de mantenimiento, procedimientos detallados de las acciones a seguir en estos casos, asociados a la operación automática o manual, además de generar un registro histórico de cualquier modificación de parámetros que se lleve a cabo, previa revisión y aprobación por parte del personal autorizado.

- Con respecto a los resultados de distribución de sólidos obtenida durante la operación del sistema, es importante analizar la importancia de las condiciones de bajo tonelaje de sólidos en la alimentación a la planta en conjunto a la restricción de mínimo flujo de descarga en el espesador, como las causas principales de aumento en la varianza de resultados y la obtención de porcentajes de sólidos bajo un rango óptimo. A partir de ello, se recomienda estudiar la habilitación de la línea de recirculación en el espesador frente a estas situaciones, o analizar la factibilidad de reducción en el límite de flujo de descarga del equipo.

- Dado que los resultados en la operación del espesador, mostraron que es posible mejorar la concentración de sólidos en la descarga y por ende la recuperación de agua en el equipo, se recomienda aplicar esfuerzos en mejorar el sistema de control de nivel en la piscina que recibe el agua desde el overflow. Esto con el objetivo, de evitar la actual pérdida de agua recuperada a causa del rebalse de la piscina, perdiendo así parte importante de las mejoras obtenidas por una buena operación.

- De acuerdo a los resultados obtenidos durante la operación del sistema experto, la influencia en las perturbaciones en el flujo que alimenta al espesador de relaves, da lugar a la posibilidad de realizar estudios futuros para incorporar a la lógica, elementos predictivos asociados a esta variable. De este modo, se plantea analizar el efecto de variaciones bruscas en el flujo de sólidos alimentados y la correlación que puede existir entre las características granulométricas del mineral y la carga en el equipo, de modo de adelantar las acciones para disminuir la varianza en las variables de operación del espesador.
- La posible presencia de situaciones en la que el sistema experto ejecute dos acciones consecutivas del mismo tipo, representan una oportunidad de analizar una eventual reacción excesiva del sistema, junto con estudiar su frecuencia y su efecto sobre las variables de operación del espesador. En caso de ser necesario, es posible incorporar un parámetro de ajuste en las respuestas, basado en la magnitud de la acción anterior ejecutada por la lógica de control.
- Las restricciones en la capacidad de la planta de floculante, motivan a realizar análisis con respecto a las proyecciones de flujo a procesar en el futuro, y pensar en modificaciones que permitan aumentar la disponibilidad del recurso preparado, aumentando la autonomía de la planta. Será necesario analizar la capacidad del estanque de almacenamiento de floculante preparado y revisar la suficiencia de la preparación del compuesto en función de los tiempos de hidratación y los flujos requeridos por la operación.
- Según los resultados obtenidos, se recomienda además evaluar la implementación en otros espesadores de la planta como forma de estandarización, replicando la estructura de razonamiento mediante el ajuste de las reglas lógicas según las condiciones de operación en cada uno, siendo posible además la incorporación de mejoras asociadas por ejemplo, a la influencia en las perturbaciones de flujo de sólidos que se alimentan a la planta.

9 Referencias

AngloAmerican. *Reporte Desarrollo Sustentable*. Santiago, AngloAmerican, 2012. 79 p.

AngloAmerican. *Gerencia Plantas LB - Programa OnBoarding*. [Presentación]. Santiago, AngloAmerican, 2013.a. 103 diapositivas, col.

AngloAmerican. *AngloAmerican: Inducción Copper*. [Presentación]. Santiago, AngloAmerican, 2013.b. 27 diapositivas, col.

APA AWWA. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 19^a ed. America Public Health Association, AWWA, Water Environment Federation. Baltimore, Amer Public Health Assn, 1995. 1325 p.

Barr, A., & Feigenbaum, E. *The Handbook of Artificial Intelligende. Volumen 1*. California, William Kaufmann, Inc., 1981. 409 p.

Bechtel Chile. *Desing Criteria For Process SAG Grinding & Bulk Flotation - Proyecto Desarrollo Los Bronces*. Santiago, Bechtel, 2007. 39 p.

Bechtel Chile. *Filosofía de Operación - Proyecto Desarrollo Los Bronces*. Santiago, Bechtel, 2008. 43 p.

Bergh, L., & Yianatos, J. *The long way toward multivariate predictive control of flotation processes*. En: *Journal of Process Control*, Volumen 2, Issue 2, 2011, pp. 226-234.

Betancourt, F., Bürger, R., Diehl, S. & Farås, S. *Modeling and controlling clarifier-thickeners fed by suspensions with time-dependent properties*. [En línea] <<http://dx.doi.org/10.1016/j.mineng.2013.12.011>> [Consulta: 20 Abril 2014]

Betancourt, F. & Concha, F. *Unveiling the myth of High Capacity Thickeners*. [Presentación] En: *International Mineral Processing Seminar (8^o, 2011, Santiago)*. Concepción, Dpto. Ingeniería Metalúrgica UDEC, 2011. 22 diapositivas, col.

Betancourt, F., Concha, F. & Sbárbaro, D. *Simple mass balance controllers for continuous sedimentation*. En: *Computers & Chemical Engineering*, Volumen 54, 2013, pp. 34-43.

Bürger, R., Bustos, M. & Concha, F. *Settling velocities of particulate systems: 9. Phenomenological theory of sedimentation processes: numerical simulation of the transient behaviour of flocculated suspensions in an ideal batch or continuous thickener*. En: International Journal Mineral Processing, Volumen 55, 1999, pp. 267-282.

Bürguer, R., Evje, S., Karlsen, K. & Lie, K. *Numerical methods for the simulation of the settling of flocculated suspensions*. En: Chemical Engineering Journal 80, 2000, pp. 91-104.

Castillo, E., Gutiérrez, J. M., & Hadi, A. *Sistemas Expertos y Modelos de Redes Probabilísticas*. Santander, Academia Española de Ingeniería, 1997. 627 p.

Delkor. *Filosofía de Control - Delkor 260 - Planta Floculante*. Santiago, Tenova Delkor, 2009. 11 p.

Dorr, J. *Cyanidation and Concentration of Gold and Silver Ores*. New York, McGraw-Hill Book Company, Inc., 1936. 485 p.

FLSmith. *Thickener Mechanism Data Sheet*. Santiago, FLSmith Inc, 2007. 3 p.

Gladman, B., Usher, S. & Scales, P. *Understanding the thickening process*. En: Proceedings of Paste, Limerick, Ireland, Editores: Jewel, R., Lawson S., Newman P., Australian Centre for Geomechanics, 2006, pp. 5-12.

Great Lakes Instruments Inc. *Turbidity Measurement: Technical Bulletin Number T1 rev 2-193*. Milwaukee, GLI Inc., 1992. 7 p.

Gupta, A., & Yan, D. *Mineral Processing Design and Operation: An Introduction*. Amsterdam, Elsevier, 2006. 718 p.

Hewitt, P. *Conceptual Physics*, 9ª ed. México, Pearson Educación, 2004. 816 p.

Karageorgos, J., Davies, S., Broers, E., & Goh, J. *Current Trends in Countercurrent Decantation and Thickener Circuit Operability and Control*. En: Mill Operators Conference (10º, 2009, Adelaide). Grange, Manta Controls Pty Ltd., 1999, pp. 255-260.

McKetta, J. *Unit Operations Handbook: Volume 2: Mechanical separations and materials handling*. New York, CRC Press, 1992. 742 p.

Metso Corporation. *Technical Specification Thickeners & Clarifiers*. Estocolmo, Suecia, 2013. [En línea] <http://www.metso.com/miningandconstruction/mm_sepa.nsf/WebWID/WTB-041103-2256F-A1C3C> [Consulta: 20 Febrero 2014]

Ohmath Vega. *Radiation-based Density Measurement*. Ohio, Vega America Inc, 2011. 13 p.

Schoenbrunn, F., & Toronto, T. *Advanced Thickener Control*. En: *Advanced Process Control Applications for Industry Workshop* (1999, Vancouver). Vancouver, IEEE Industry Applications Society, 1999, pp. 83-86.

Schoenbrunn, F., Hales, L., & Bedell, D. *Strategies for Instrumentation and Control of Thickeners and other solid-liquid Separation Circuits*. En: *Mineral Processing Plant Design, Control and Practice Conference* (2002, Vancouver). Vancouver, Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, 2002, pp. 2164-2173.

Setiawan, R., Keong Tan, C., Bao, J., & Bickert, G. *Model Predictive Control of a Paste Thickener in Coal Handling and Preparation Plants*. En: *IFAC International Symposium on Dynamics and Control of Process Systems* (10°, 2013, Mumbai). Sydney, University of New South Wales, 2013.

Shammas, N. K., Wang, L. K., & Hung, Y. *Handbook of Environmental Engineering, Volume 6: Biosolids Treatment Processes*. New York, Humana Press Inc., 2007. 820 p.

Siemens Milltronics Process Instruments Inc. *Siemens Milltronics InterRanger DPS300 Instruction Manual*. Canadá, Technical Publications, 2001. 117 p.

Stelios Project Management. *Thickening Resource Book*. Laverton, Western Australia, 2010. [En línea] <<http://www.stelios.co.za/stelios-project-management-spm.html>> [Consulta: 10 Febrero 2014]

Svarovsky, L. *Solid-Liquid Separation*, 4ª ed. Oxford, Butterworth-Heinemann, 2000. 554 p.

Usher, S. & Scales, P. *Steady state thickener modelling from the compressive yield stress and hindered settling function*. En: *Chemical Engineering Journal*, Volumen 111, Issues 2-3, 2005, pp. 253-261.

Yianatos, J. *Flotación de minerales*. Valparaíso, UTFSM, 2005. 125 p.