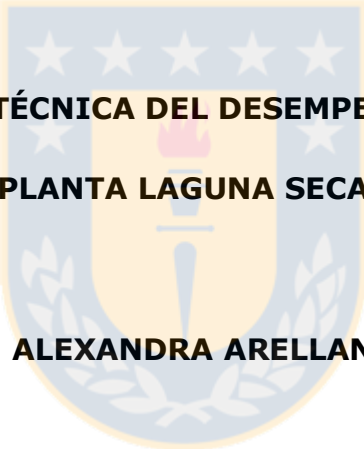


UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
Facultad de Ingeniería
Departamento de Ingeniería Metalúrgica

Profesor Patrocinante:
Dr. Fernando Betancourt

Ingeniero(s) Supervisor(es):
Pablo Espinoza F.
Jorge Sánchez E.



**EVALUACIÓN TÉCNICA DEL DESEMPEÑO DE PST EN
PLANTA LAGUNA SECA**

KATHERINE ALEXANDRA ARELLANO HECHTLE

Informe de Memoria de Título
para optar al Título de

Ingeniero Civil Metalúrgico

Julio 2017

Resumen

El presente trabajo consiste en la evaluación de un sensor de granulometría llamado Particle Size Tracking (PST). Para esto se establecieron 4 criterios de evaluación que incluyeron muestreos en la batería, comparación con el sensor previamente instalado en planta (PSI), análisis del sistema experto y evaluación de la lógica de control operando con el dato granulométrico otorgado por PST. Además se estudió el impacto que tiene en la producción un embancamiento masivo de hidrociclones.

Para el análisis se utilizaron datos obtenidos de planta mediante plataforma PHD, datos de muestreos en la batería de hidrociclón y se complementó con análisis estadístico de Minitab.

La evaluación arrojó que al contrastar los muestreos con los datos de granulometría de los sensores, el dato PST presenta una mayor confiabilidad con un 22% menos de error relativo que el PSI. Además de tener una señal disponible un 100% en la lógica en todo el período evaluado.

Del estudio de la lógica operando con PST se logró encontrar un error en el tiempo de respuesta de los ciclones, y se optimizó la lógica. Esto repercutió en la potencialidad de evitar un evento de acordonamiento masivo producto de la acción del sistema experto sobre los ciclones acordonados, reduciendo de 12 a 2 minutos promedio el tiempo de hidrociclones en sobretamaño.

Índice general

1. Introducción.....	1
1.1 Objetivo general.....	1
1.2 Objetivos específicos.....	1
2. Antecedentes	2
2.1 Descripción del circuito de molienda clasificación	2
2.2 Fundamentos de la clasificación	5
2.2.1 Aspectos generales	5
2.2.2 Acordonamiento.....	6
2.2.3 Dinámica al interior de un hidrociclón	7
2.3 Descripción de la lógica de control del circuito de molienda secundaria.	8
2.3.1 Lógica de protección.....	10
2.3.2 Lógicas de Estabilización	11
2.4 Descripción de la lógica de administración de ciclones	12
2.4.1 Balance geométrico de las baterías.....	12
2.4.2 Sobretamaño en overflow de ciclones individuales.	14
2.5 Tecnologías a evaluar.....	15
2.5.1 PSI	15
2.5.2 PST.....	17
3. Diseño experimental.....	23
3.1 Análisis de datos	23
3.2 Condiciones de muestreo.....	24
3.3 Procedimiento de muestreo.....	24
3.4 Procedimiento de análisis granulométrico.....	26
3.5 Plan de trabajo.....	26
4. Resultados y discusiones.....	28
4.1 Criterio I. Muestreos	28
4.1.1 Resultados por hidrociclón.....	29
4.2 Criterio II. Evaluación del desempeño del Sistema experto con la señal granulométrica de PST	35
4.3 Criterio III. Disponibilidad del PST en comparación a PSI	38
4.4 Criterio IV. Potencial Predictivo del PST	40
4.5 Optimización de la lógica de sobretamaño.....	44

4.6 Efectos económicos de un acordonamiento	49
5. Conclusiones	52
6. Recomendaciones	53
7. Bibliografía.....	54
Anexo A. Tablas de error y correlaciones	55



Índice de figuras

Figura 2.1 Liberación de mineral.....	2
Figura 2.2 Diagrama de proceso simplificado de Laguna Seca Línea 1.....	4
Figura 2.3 Diagrama de un hidrociclón.....	6
Figura 2.4 Tipos de descarga en hidrociclones.....	7
Figura 2.5 Fuerzas que actúan sobre una partícula al interior del hidrociclón.....	7
Figura 2.6 Distribución radial de batería de hidrociclones. Se muestra la división en 4 cuadrantes.....	13
Figura 2.7 Principio de operación.....	16
Figura 2.8 PSI en terreno.....	17
Figura 2.9 Representación del principio de operación.....	18
Figura 2.10 Sensor PST.....	19
Figura 2.11 Señal PST v/s Muestras de validación.....	20
Figura 2.12 Representación de la validación del PST en plata en un ciclón.....	21
Figura 2.13 Explicación esquemática del rango de calibración en Uniformance PHD.....	22
Figura 3.1. Visualización de PHD.....	23
Figura 3.2 Punto de muestreo.....	24
Figura 3.3 Batería de hidrociclones.....	24
Figura 3.4 Muestreador.....	25
Figura 3.5 Muestras para posterior análisis.....	25
Figura 3.6. Carta Gantt de las actividades.....	27
Figura 4.1. Comparación de señal PST v/s PSI respecto al muestreo.....	29
Figura 4.2 Señal granulométrica PST comparada con las muestras del hidrociclón 2.....	29
Figura 4.3 Señal granulométrica PST comparada con las muestras del hidrociclón 4.....	30
Figura 4.4 Señal granulométrica PST comparada con las muestras del hidrociclón 7.....	30
Figura 4.5 Señal granulométrica PST comparada con las muestras del hidrociclón 9.....	31

Figura 4.6 Señal granulométrica PST comparada con las muestras del hidrociclón 13.....	31
Figura 4.7 Señal granulométrica PST comparada con las muestras del hidrociclón 16.....	32
Figura 4.8 Señal granulométrica PST comparada con las muestras del hidrociclón 18.....	33
Figura 4.9 Histogramas superpuestos de potencia de molino de bolas con y sin señal PST.....	36
Figura 4.10 Histogramas superpuestos de presión de batería con y sin señal PST	36
Figura 4.11: Gráfico comparativo de disponibilidad PST v/s PSI.....	39
Figura 4.12. Gráfico de frecuencia de eventos durante el periodo evaluado.	41
Figura 4.13 Ciclón 11 en condiciones normales.....	42
Figura 4.14 Ciclón 13 en condiciones normales.....	42
Figura 4.15 Ciclón con ápex quebrado y resalte positivo.....	42
Figura 4.16 Ciclón con porta ápex desgastado.....	42
Figura 4.17 Visualización de un acordonamiento masivo mediante plataforma PHD	46
Figura 4.18 Visualización de la nueva lógica actuando sobre un evento.	46
Figura 4.19 Distribución del uso de batería de hidrociclones.....	48
Figura 4.20 Impacto en tratamiento y recuperación.....	50

Índice de tablas

Tabla 2.1 Lógica de protección, filosofía de control por potencia de molino de bolas.....	10
Tabla 2.2 Lógica de estabilización, filosofía de control por presión de batería de hidrociclones.....	11
Tabla 4.1 Comparación de errores relativos PST v/s PSI.....	28
Tabla 4.2 Tabla resumen de las variables evaluadas de circuito molienda clasificación.....	37
Tabla 4.3 Resumen disponibilidad del PST por ciclón y global.....	38
Tabla 4.4 Tiempo en sobretamaño con lógica antigua.....	45
Tabla 4.5 Tiempo en sobretamaño con lógica optimizada.....	47
Tabla 4.6 Cuadro resumen de las condiciones del embancamiento.....	50



Nomenclatura

PST: Particle Size Tracking/ Rastreo de tamaño de partículas

PSI: Particle Size Indicator/ Indicador de tamaño de partículas

BHC2: Batería hidrociclones número 2

SGS: Empresa encargada del muestreo en Escondida.

SE: Sistema experto

SAG: semiautógeno

MEL: Minera Escondida Limitada

μm :micrómetro

l/min: Litro por minuto

ton/día : tonelada por día

rpm: revoluciones por minuto

P80: 80% productos pasantes

%+#100Ty: Porcentaje en peso sobre malla 100 Tyler

Tph: Tonelada por hora

kW: kilowatt

kPa: kilo Pascal

min ('): minuto

s ("): segundo

μm : micrones

Flowsheet: diagrama de flujo

DCS: Sistema de control distribuido

tag: nombre específico de una variable en la data histórica.



1. Introducción

Una variable crítica para el circuito de molienda clasificación es el tamaño de partícula del producto. La práctica industrial vigente es medir el tamaño de partícula o p80 en línea, en el rebalse de hidrociclones, para así tomar una acción correctiva inmediata y evitar un posible acordonamiento de la batería, que aguas abajo puede producir un embancamiento de la línea de flotación.

Es por esto que surge la necesidad de evaluar las distintas tecnologías que ofrece el mercado. Para este análisis se evaluará dos tecnologías, una ya implementada en planta llamada PSI y una que está en evaluación comercial llamada PST.

1.1 Objetivo general

Evaluar la efectividad de la implementación del nuevo sensor granulométrico PST y contrastarlo con la operación de la tecnología ya implementada PSI.

1.2 Objetivos específicos

- Analizar el error relativo que presenta la señal de PST respecto a la del PSI con relación a un muestreo realizado por SGS.
- Evaluar el desempeño del sistema experto operando con la señal PST y sin señal PST.
- Estudiar la disponibilidad del PST respecto al PSI en la lógica de control del Sistema Experto.
- Determinar el nivel predictivo referido a la identificación de hidrociclones defectuosos de acuerdo a la mayor frecuencia de eventos sobre límite alto de calibración.

Adicionalmente, se estimó el costo que implica el acordonamiento y posterior embancamiento de una línea de flotación en términos económicos.

Como etapa final, se darán ciertas recomendaciones basadas en el estudio elaborado en los meses de realización de la memoria.

2. Antecedentes

2.1 Descripción del circuito de molienda clasificación

Minera Escondida actualmente procesa mineral de tipo primario y una proporción de secundario proveniente de dos sectores: Escondida y Escondida Norte. Predominan las especies sulfuradas como: calcopirita, covelina y calcosina.

El circuito está diseñado para procesar en promedio 142.500 ton/día durante los 365 días del año con una disponibilidad de planta proyectada de 96%.

Aproximadamente el 86% del cobre se recupera durante las operaciones de proceso del mineral. El cobre es recuperado en la forma de un concentrado producto de una flotación. El objetivo del circuito de molienda es moler las partículas de mineral a un tamaño suficientemente pequeño para liberar las partículas de cobre de la ganga (Figura 2.1). Una vez que los minerales están liberados, el proceso de flotación mediante fenómenos físico-químicos los separa de la ganga.

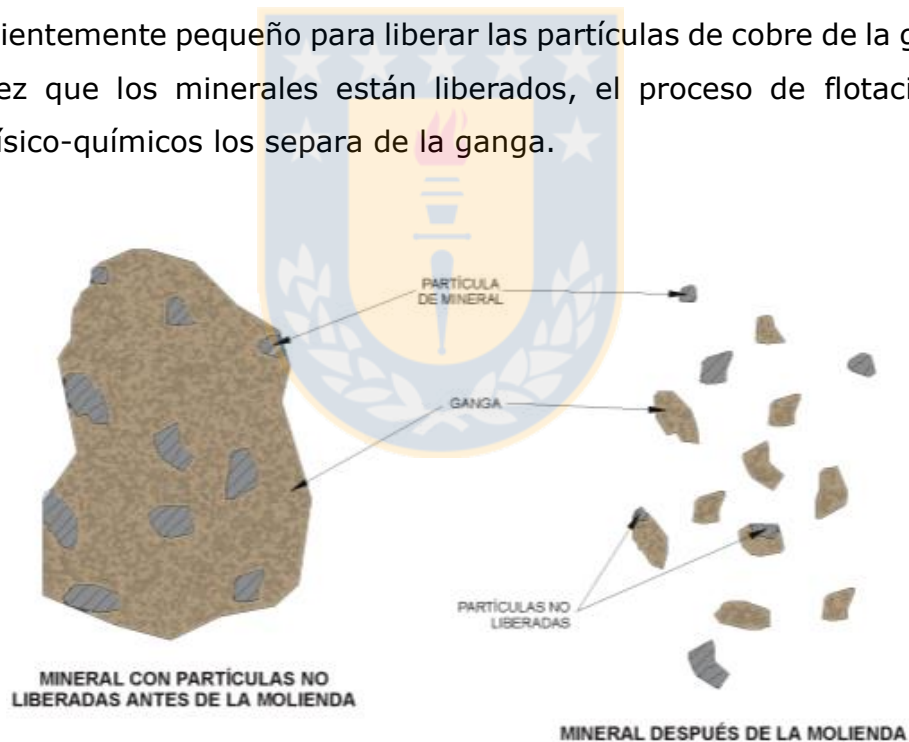


Figura 2.1 Liberación de mineral

El primer paso en el proceso de conminución es el chancado del mineral. El segundo paso en el proceso de conminución es la molienda del mineral. La línea de molienda de Laguna Seca Línea 1, está constituida por un molino SAG y cuatro molinos de bolas.

La configuración del circuito de molienda corresponde a un SABC-1, esto quiere decir que consta de una molienda en dos etapas con chancado de pebbles.

El mineral chancado es descargado mediante la correa de alimentación al molino SAG. Junto con el mineral se agrega un colector primario y una lechada de cal al chute de alimentación. El mineral se muele dentro del molino SAG hasta que se descarga dentro del trommel a través de parrillas. El sobretamaño del trommel cae a un harnero vibratorio para una separación posterior de partículas. El sobretamaño del harnero vibratorio es enviado al circuito de pebbles, mientras que el bajo tamaño se junta con su similar del trommel y es alimentado al sumidero del molino.

El sobre tamaño u oversize del harnero del molino SAG es enviado a un circuito de chancado de pebbles por 2 correas que transportan el material a un silo de almacenamiento de 2 secciones. Una correa electromagnética junto con un detector de metal ubicado al final de la descarga de la correa, son usados para remover el metal desde la correa de pebbles. Un chancador de cono se usa para chancar los pebbles a un tamaño aceptable antes de que el material chancado sea enviado de vuelta al molino SAG.

El flujo de descarga del molino SAG se une con la descarga de un molino de bolas. Los dos flujos se diluyen con agua en el sumidero y luego son bombeados a la batería de ciclones. La descarga (underflow) de los ciclones ingresa como carga circulante al molino de bolas. Cuatro molinos de bolas son usados en circuito cerrado para moler la descarga de los ciclones. La pulpa de rebose u overflow de los ciclones es muestreada y analizada antes de ser enviada al circuito de flotación.

El circuito de molienda reduce el mineral a un 80% menor a $145\ \mu\text{m}$. Esto significa que después de la molienda, el 80 por ciento del mineral es lo bastante pequeño como para atravesar una malla de $150\ \mu\text{m}$ de apertura (malla 100 Ty). Esto se conoce como P80 de $145\ \mu\text{m}$. La reducción del mineral a este tamaño de partícula proporciona el tamaño adecuado para lograr la recuperación de cobre de acuerdo al diseño en el circuito de flotación primaria. Los objetivos del sistema de molienda son procesar el máximo de toneladas por hora con la energía disponible, y un consumo mínimo de bolas de acero, y por otra parte obtener una distribución de tamaño de producto de un 80 por ciento menor que $145\ \mu\text{m}$ en el rebose del ciclón del molino de bolas

En la Figura 2.2 se muestra el diagrama simplificado del proceso de molienda de Concentradora Laguna Seca.

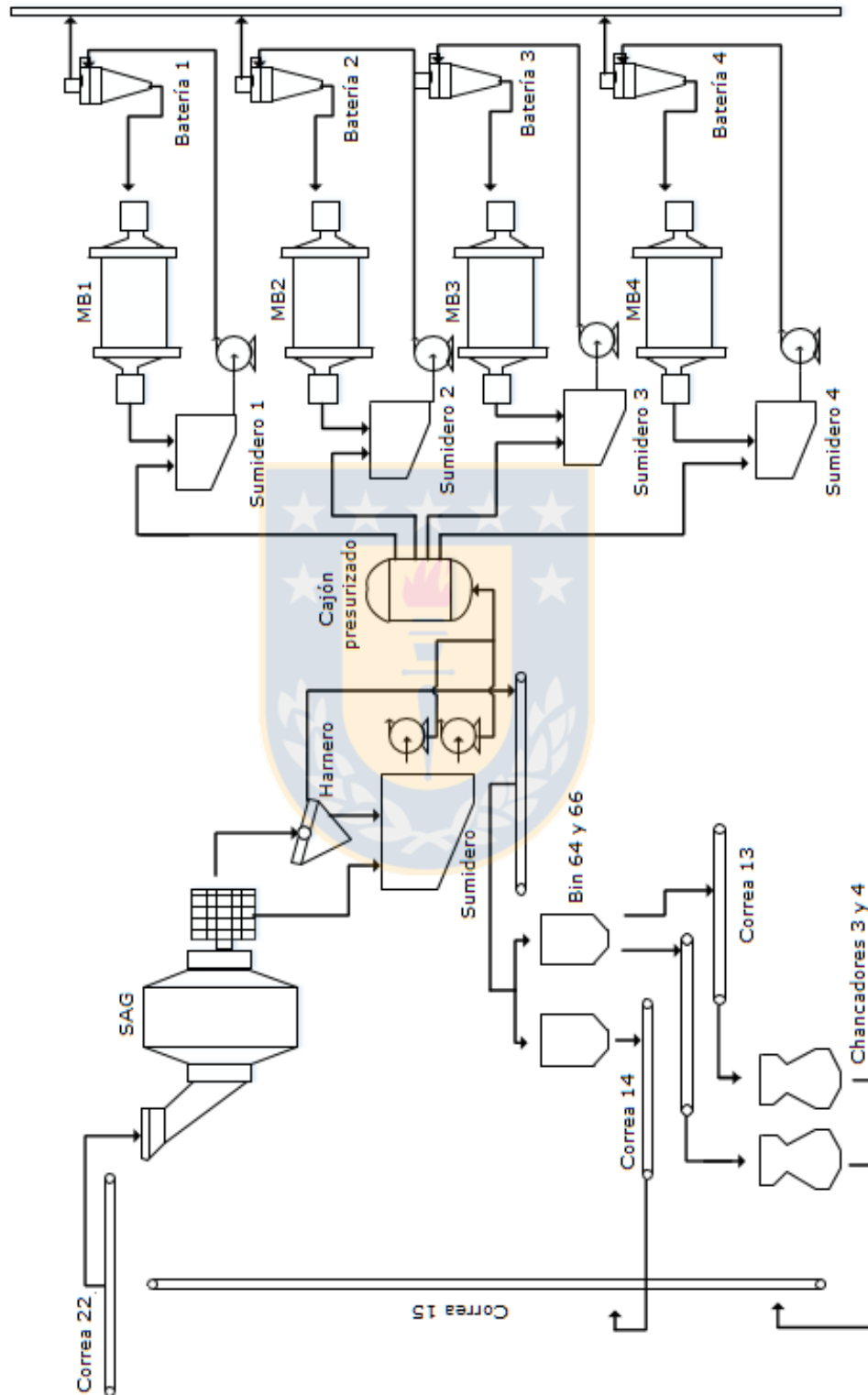


Figura 2.2 Diagrama de proceso simplificado de Laguna Seca Línea 1

2.2 Fundamentos de la clasificación

2.2.1 Aspectos generales

La clasificación corresponde a la operación de separación de los componentes de una mezcla de partículas en dos o más fracciones. Cada una de estas fracciones resulta ser más homogénea en tamaño que la mezcla original.

La clasificación significa una etapa primordial a la hora de alcanzar un tamaño de partícula objetivo, además cumple un rol subsidiario en la molienda. Esto debido a que dependiendo de la configuración del circuito ayuda a optimizar el consumo de energía específica del molino.

Es así entonces que existe la configuración del circuito cerrado, en donde el rol específico de los hidrociclones es permitir operar al molino con la menor cantidad de finos en su interior. Por otro lado el circuito abierto no recircula pulpa al molino, lo que resulta contraproducente a la hora de enfrentar cambios en el tamaño o dureza del mineral de alimentación.

En la unidad del hidrociclón se distinguen distintos flujos producto de la clasificación. La alimentación es un flujo que entra tangencial al hidrociclón, generando un efecto centrífugo. La fracción gruesa de partículas se denomina descarga y reporta en el ápex. Mientras que la fracción fina se denomina rebalse y reporta en el vortex, como muestra la figura 2.3. En una operación ideal todo el flujo de partículas sobre cierta malla, o tamaño de separación, quedaría en la descarga y todo el flujo de partículas bajo esa malla quedaría en el rebalse. Lamentablemente, el hidrociclón no es un equipo ideal, ya que ciertas fracciones de la alimentación reportan directamente en la descarga generándose un cortocircuito debido al efecto dispersivo del flujo.

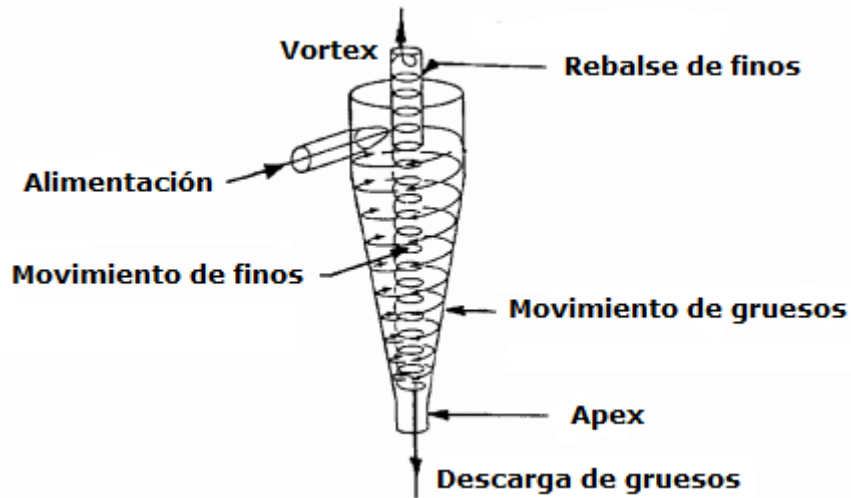


Figura 2.3 Diagrama de un hidrociclón

Para estudiar el efecto de la clasificación en una planta, es necesario conocer los parámetros de diseño, variables de operación y configuración de la planta.

En particular, la disposición de concentradora Laguna Seca es una batería de hidrociclón por cada molino de bolas. Cada batería consta de 19 hidrociclones con 8 ciclones en promedio operando en una condición normal. Cada unidad de clasificación es un hidrociclón *Kreb gMax33*, con ángulo de inclinación de 20-10°, diámetro de 33 in, con un vortex de 14 in y un ápex de 8.5 in. La presión de trabajo de diseño es de 11 psi, sin embargo se trabaja a menor presión por condiciones operacionales.

2.2.2 Acordonamiento

El acordonamiento es una condición operacional inestable que puede tener severos efectos en una planta. Su nombre se debe al tipo de descarga tipo "cuerda" o "rope" y se explica como aquella en la que la pulpa de la descarga cruza el ápex en dirección paralela al eje vertical del cono. La descarga normal es la tipo "spray" o "paraguas" en la cual el flujo atraviesa el ápex con un ángulo de 30-45° con respecto al mismo eje del cono, como se visualiza en la figura 2.4

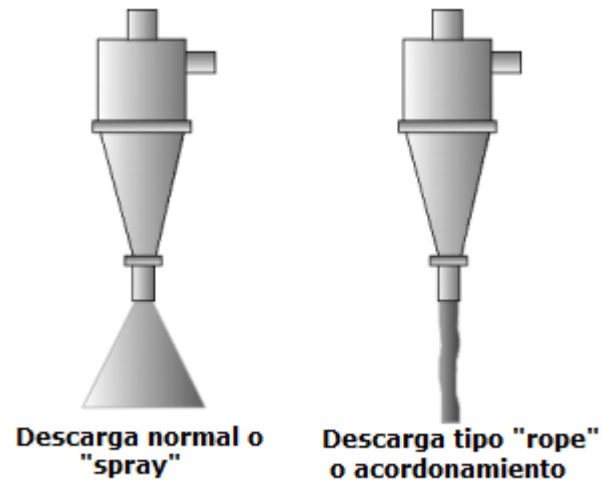


Figura 2.4 Tipos de descarga en hidrociclones

El acordonamiento se caracteriza por un alto porcentaje de sólidos en el underflow, un aumento notorio en el tamaño de separación de partícula y una disminución de la cantidad de finos en el underflow.

Esta condición es indeseable en la industria debido a que genera repercusiones aguas abajo, afectando equipos críticos en el proceso de flotación a mediano plazo y afectando la producción en el corto plazo.

2.2.3 Dinámica al interior de un hidrociclón

Las partículas al interior del hidrociclón están sometidas a dos fuerzas opuestas, la centrífuga y la de arrastre, como muestra la figura 2.5.



Figura 2.5 Fuerzas que actúan sobre una partícula al interior del hidrociclón.

La fuerza centrífuga es generada por la formación del vórtice, y su fórmula es:

$$F_C = (\rho_s - \rho_f) \frac{v_\theta^2}{r} \frac{4\pi r^3}{3} \quad (1)$$

Donde ρ_s y ρ_f , es la densidad del sólido y fluido respectivamente, r es el radio de partícula y v_θ es la velocidad tangencial.

La fuerza de arrastre ocurre por la existencia de una zona de baja presión a lo largo del eje vertical, y su fórmula es:

$$F_D = -6\pi\mu r(u_r - v_r) \quad (2)$$

Donde μ es la viscosidad del fluido, u_r es la componente axial de la velocidad y v_r la velocidad radial.

Realizando un balance de (1) y (2), se tiene:

$$r = -\frac{9}{2} \frac{\mu(u_r - v_r)}{(\rho_s - \rho_f)v_\theta^2} \quad (3)$$

De la acción resultante de dichas fuerzas, dependerá la trayectoria de la partícula hacia el rebalse o hacia la descarga. Las partículas con mayor velocidad de sedimentación se mueven hacia las paredes del hidrociclón donde la velocidad tangencial es más baja. Estas partículas salen por el ápex.

Aquellas partículas en las que por su diámetro pequeño, la fuerza centrífuga no posee prácticamente ningún efecto, quedan expuestas a la fuerza de arrastre. Debido a la acción de esta fuerza las partículas se mueven hacia la zona de baja presión a lo largo del eje del ciclón, reportando en el overflow.

2.3 Descripción de la lógica de control del circuito de molienda secundaria.

La filosofía de control del Sistema Experto de Molienda de concentradora Laguna Seca está diseñada e implementada para maximizar el tonelaje fresco tratado en el circuito de molienda y disminuir la variabilidad de la granulometría del producto de los hidrociclones hacia flotación en torno al valor objetivo.

En el caso de la molienda secundaria, o anterior se logra balanceando las cargas entre los molinos y disminuyendo la variabilidad de la presión de las baterías de hidrociclones.

Es importante mencionar que en cualquier lógica de control de un sistema experto, por sobre toda oportunidad de optimización que pretenda el sistema, primará la protección de los equipos para no forzarlos a condiciones que pondrían en peligro la continuidad operacional.

I) Variables Controladas

- Potencia del motor del molino de bolas
- Nivel del Cajón
- Presión de la batería de hidrociclones
- Tamaño de partícula del producto de la batería de hidrociclones

II) Variables Manipuladas

- Flujo de agua al cajón
- RPM de la bomba del cajón
- Abertura y cierre de hidrociclón



2.3.1 Lógica de protección

Tabla 2.1 Lógica de protección, filosofía de control por potencia de molino de bolas

Escenario	Condiciones operacionales	Acciones del Sistema Experto	Condiciones
Molino de bolas cargado	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Potencia Baja ✓ Porcentaje de abertura de dardo al mínimo 	Aumentar RPM del molino	-
		Disminuir agua al cajón	Si: <ul style="list-style-type: none"> ✓ RPM de molino al máximo ✓ Nivel de cajón alto o estable
		Disminuir velocidad de la bomba	Si: <ul style="list-style-type: none"> ✓ Nivel no alto
		Abrir ciclón	Si: <ul style="list-style-type: none"> ✓ Potencia muy baja ✓ Nivel de cajón no bajo ✓ Agua al cajón al mínimo
Molino de bolas descargado	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Potencia alta ✓ Porcentaje de abertura de dardo al máximo 	Disminuir RPM del molino	-

2.3.2 Lógicas de Estabilización

Tabla 2.2 Lógica de estabilización, filosofía de control por presión de batería de hidrociclones.

Escenario	Acciones del Sistema Experto	Condiciones
Presión batería alta	Disminuir velocidad de bomba de cajón y aumentar agua al cajón	Si: ✓ Nivel bajo de cajón
	Disminuir lento velocidad de bomba de cajón y disminuir agua al cajón	Si: ✓ Nivel estable de cajón y no disminuyendo
	Disminuir velocidad de bomba de cajón y disminuir agua al cajón	Si: ✓ Nivel alto de cajón
	Abrir un hidrociclón	Si: ✓ Razón de cambio de la presión de BHC es mayor a 2 kPa/min por 90 segundos
	Aumentar rápidamente velocidad de la bomba de cajón	Si: ✓ Diferencia entre PV de presión de BHC y valor objetivo en el rango 3.5-4.5 kPa por 480 segundos
	Aumentar rápidamente velocidad de la bomba de cajón	Si: ✓ Diferencia entre PV de presión de BHC y valor objetivo en el rango 4.5-5.5 kPa por 90 segundos
	Aumentar velocidad de la bomba de cajón	Si: ✓ Diferencia entre PV de presión de BHC y valor objetivo es mayor en 5.5 kPa por 60 segundos
Presión batería baja	Aumentar lentamente velocidad de bomba de cajón y aumentar lentamente agua al cajón	Si: ✓ Nivel de cajón bajo y aumentando
	Aumentar lentamente velocidad de bomba de cajón y aumentar lentamente agua al cajón	Si: ✓ Nivel de cajón estable

	Aumentar lentamente velocidad de bomba de cajón y disminuir agua al cajón	Si: ✓ Nivel alto de cajón
	Cerrar un hidrociclón	Si: ✓ Diferencia entre PV de presión de BHC y valor objetivo en el rango – (4.5-3.5) kPa por 480 segundos
	Disminuir rápidamente velocidad de bomba de cajón	Si: ✓ Diferencia entre PV de presión de BHC y valor objetivo en el rango – (5.5-4.5) kPa por 90 segundos
	Disminuir velocidad de la bomba de cajón	Si: ✓ Diferencia entre PV de presión de BHC y valor objetivo es menor en -5.5 kPa por 60 segundos

2.4 Descripción de la lógica de administración de ciclones

La administración de los ciclones de cada batería se realiza considerando dos criterios: Balance geométrico y granulometría en el overflow.

2.4.1 Balance geométrico de las baterías

Si se asegura una distribución de carga balanceada en las baterías es posible mejorar el desempeño de la misma.

En base a lo anterior, esta estrategia tiene por objetivo lograr un balance geométrico de los ciclones en operación en cada una de las baterías.

Lo anterior se logra dividiendo en 4 cuadrantes cada una de las baterías, de acuerdo a lo mostrado en la figura 2.6. El objetivo es balancear la carga porcentual por cuadrante, la cual se calcula de acuerdo a lo siguiente:

$$Carga_i = \frac{Núm. \text{ hidrociclones operativos}_i}{Núm. \text{ total de hidrociclones}_i} \times 100$$

Donde:

$Carga_i$: Carga porcentual en el cuadrante i.

$Núm. \text{ hidrociclones operativos}_i$: Número de hidrociclones abiertos en el cuadrante i

$Núm. \text{ total de hidrociclones}_i$: Número total de hidrociclones en el cuadrante i.

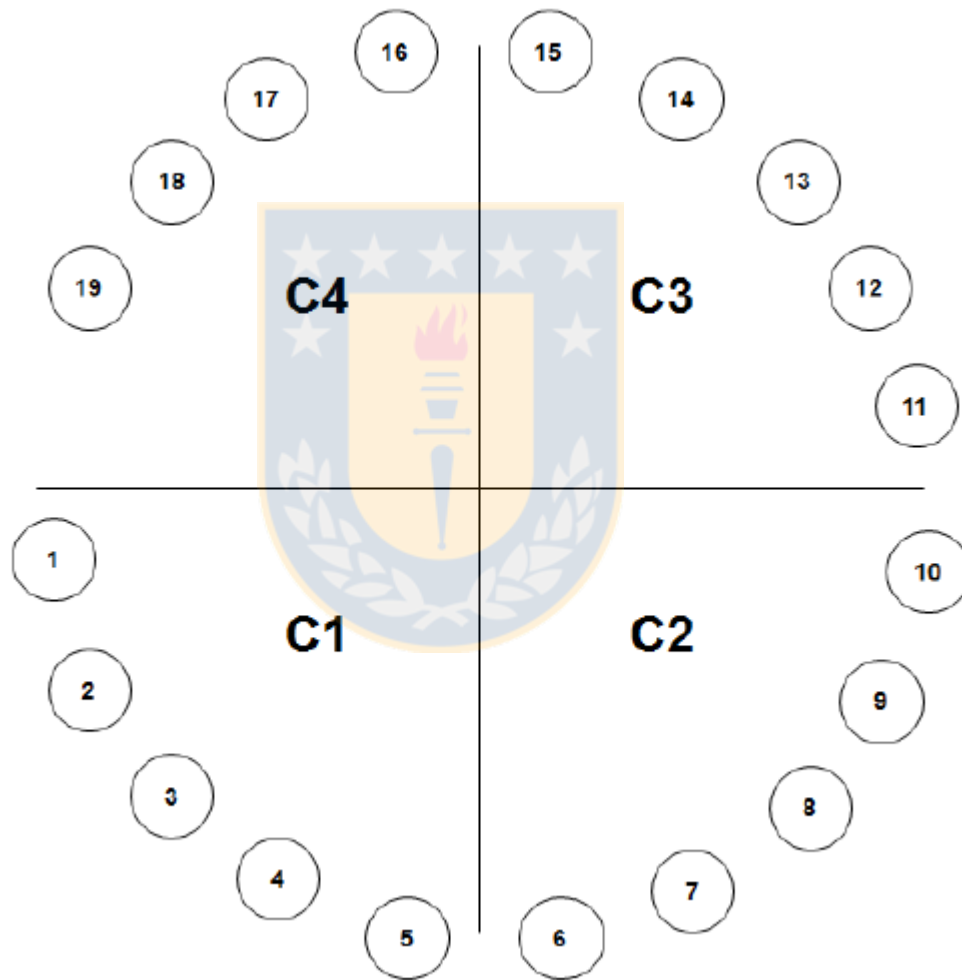


Figura 2.6 Distribución radial de batería de hidrociclones. Se muestra la división en 4 cuadrantes.

2.4.2 Sobretamaño en overflow de ciclones individuales.

Las lógicas de ciclones están asociadas actualmente a las señales de granulometría otorgadas por el PST. Dentro del análisis que realiza el Sistema Experto, uno de los primeros chequeos que hace es verificar si las señales de los sensores apertura y cierre (limit switch) son distintas entre sí. Si son iguales se excluye ese ciclón del análisis y de los posibles candidatos a abrir/cerrar. Para ello se han definido dos escenarios en donde debe actuar la lógica, de acuerdo a los límites de calibración del sensor.

a) Escenario 1:

Corresponde a un evento sobre límite alto de calibración y se activa si se verifica la siguiente condición:

- ✓ EL PV de granulometría mayor al límite de calibración, el cual actualmente corresponde $35\% + 100 \# \text{ Tyler}$.

Ante esta condición operacional la acción corresponde a cambiar el ciclón que presenta problemas por otro. La secuencia de acciones es la siguiente:

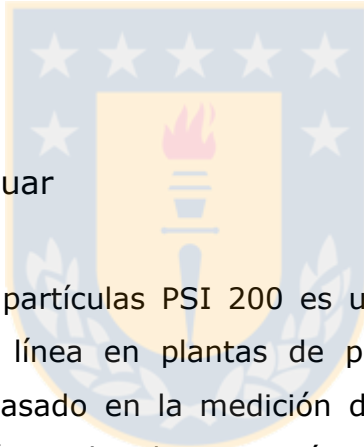
- I) Cada 10 segundos se ejecuta un código que calcula lo siguiente:
 - a. Ciclón que presenta la mayor granulometría.
 - b. Mediana de la granulometría de los ciclones que se encuentran en operación.
- II) En todo instante se está comparando el PV de granulometría de cada ciclón en operación con el límite de calibración, actualmente 35% sobre malla 100 Tyler.
- III) Si el ciclón con mayor granulometría habilitado para el Sistema Experto presenta una PV mayor al valor de calibración por al menos 30 segundos se ejecuta la siguiente secuencia de acciones:
 - a. Se envía el comando de abertura para un ciclón, basándose en criterios de balance geométrico.
 - b. Una vez que se verificó la respuesta del dardo del ciclón a abrir, se envía el comando de cierre al ciclón.
 - c. Se setea la espera entre acciones para la lógica de cambio de ciclón en 120 segundos, es decir, la lógica solo podrá ejecutarse nuevamente al cabo de 120 segundos.

- Escenario 2:

Corresponde a un evento sobre límite alto de granulometría y se activa si se verifican las siguientes condiciones:

- ✓ PV de granulometría menor al límite de calibración.
- ✓ Duración de 5 minutos de PV de granulometría del ciclón mayor al límite máximo operacional de granulometría, actualmente definido como 25%+100# Tyler.
- ✓ Mediana de granulometría menor al límite máximo operacional de granulometría.

Ante estas condiciones operacionales no se actuará "cambiando" inmediatamente el ciclón que presenta granulometría alta, sino que quedará seleccionado como primera prioridad para cerrar cuando se requiera por condiciones de presión, potencia o nivel de sump.



2.5 Tecnologías a evaluar

2.5.1 PSI

El analizador de tamaño de partículas PSI 200 es un instrumento diseñado para la medición granulométrica en línea en plantas de procesamiento de minerales. Su principio de medición está basado en la medición directa del tamaño de partículas mediante un sensor automático de alta precisión. Este instrumento requiere una muestra primaria de 70/170 l/min extraída a partir del flujo de la batería de hidrociclones. El resultado de la medición es desplegado localmente en una pantalla y enviada como señal análoga utilizando el protocolo Modbus RTU.

- Principio de operación

El analizador usa un sensor cerámico de alta precisión que realiza una medición del tamaño de partículas de una muestra representativa del flujo total. El sensor envía la información a un panel integral PC, el cual la convierte en lecturas de porcentaje sobre malla 100 Tyler.

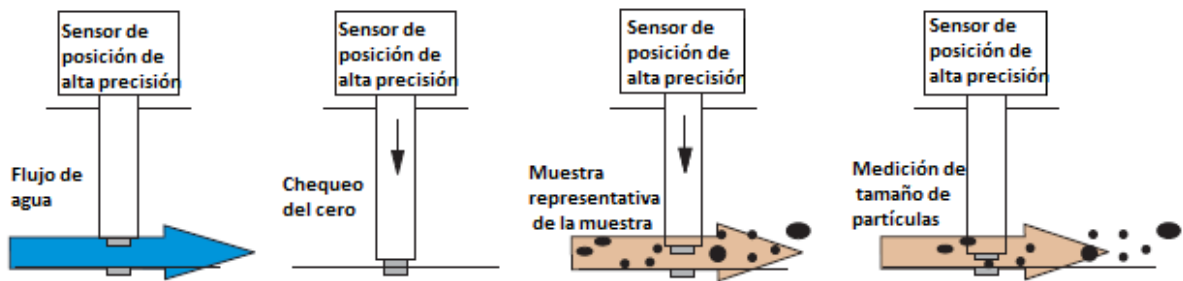


Figura 2.7. Principio de operación

- Muestreo

Pueden medirse partículas dentro de un rango de tamaño de 25 a 500 μm . Un flujo de muestra primaria de 70-170 l/min es reducida a un flujo estable de 10 l/min. La pulpa seleccionada desde los muestreadores primarios es controlada por un estanque estabilizador de flujo, que mantiene un control de nivel además de evitar sobretamaños y burbujas de aire. Este estanque mantiene un flujo continuo a través del cabezal del transmisor de tamaño de partícula. Éste hace mediciones del tamaño de partícula en el flujo de la pulpa con un cabezal de tipo micrómetro. El transmisor envía la información a una unidad PLC, donde es convertida en lecturas porcentuales de malla o de micrones. Las fórmulas usadas para el cálculo de las fracciones resultan del procedimiento de calibración. El resultado es actualizado una vez por segundo en base a 120 mediciones efectuadas durante los 60 segundos precedentes.



Figura 2.8. PSI en terreno.

2.5.2 PST

- Principio de operación

Esta tecnología consiste en una sonda que está inserta en sentido perpendicular a la dirección del flujo de la pulpa como lo indica la Figura 2.9. Las partículas impactan la superficie del sensor, generando ondas que viajan a través de éste. El sensor convierte esta propagación de ondas en señales eléctricas y en un post-procesamiento mediante un modelo empírico se traducen estas señales en mediciones de granulometría cada 4 segundos.

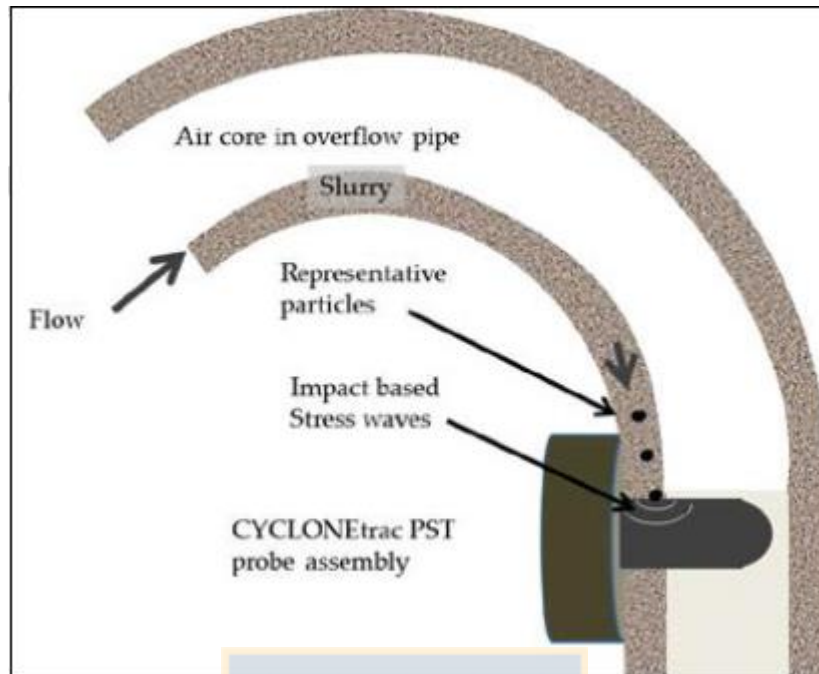


Figura 2.9 Representación del principio de operación

Todo tipo de medición en línea del tamaño de partículas, requiere calibración mediante la correlación de las señales con un muestreo y posterior análisis granulométrico. Para asegurar una buena calibración de todos los ciclones de la batería, las muestras deben ser tomadas en el overflow de cada hidrociclón. Además deben ser muestreadas fuera del rango habitual, para asegurar una medición precisa cuando el ciclón esté operando fuera de los rangos de operación.

Una vez realizada la calibración del sensor, no es necesario volver a repetirla incluso si el sensor es cambiado.



Figura 2.10 Sensor PST

- Muestreo para calibración

El procedimiento de calibración es netamente empírico. Se inicia con un procedimiento de calibración base asociado a un algoritmo que tiene 10 coeficientes de calibración diferentes, que se ajustan en función de la medición empírica que se hace en terreno v/s la medición que está haciendo el equipo en forma virtual.

Este procedimiento de calibración consta de dos etapas. La primera es en donde se define el parámetro que se quiere medir, en este caso en particular, el parámetro corresponde al % en peso sobre 100 mallas Tyler (tamaño de partícula 150 μm).

En la segunda etapa se define el rango de operación y calibración para el parámetro determinado.

Una vez que se define el rango de calibración, éste se divide en 5 subrangos: <15%, 15-20%, 20-25%, 25-30% y <30% en peso sobre #100 Ty.

Por cada subrango se requieren 3 muestras por cada ciclón, para el caso de Laguna Seca 285 muestras.

Cada muestra en terreno se registra con la hora exacta (hora, minutos y segundos) sincronizados con el computador que mide la señal del PST, mientras más detalles menos errores se inducen en la medición.

La validación en tiempo real se produce al enviar la data sin procesar del PST a la central de CIDRA y se correlaciona con las muestras que se tienen en terreno del tamizaje en húmedo. Luego ellos hacen un ajuste de la curva de calibración para obtener los coeficientes ajustados.

La figura 2.11 grafica las 285 muestras de validación comparando el % $+150\ \mu\text{m}$ con las lecturas PST. Durante el periodo de validación la variabilidad del muestreo se determinó de $\pm 2\%$ de desviación estándar. Esta variabilidad se indica en la figura 2.11 con las bandas de error. La campaña de validación de CIDRA arrojó que la señal PST es capaz de otorgar el dato de granulometría con un error de $\pm 5.4\%$ además de tener un coeficiente de correlación de 0.86.

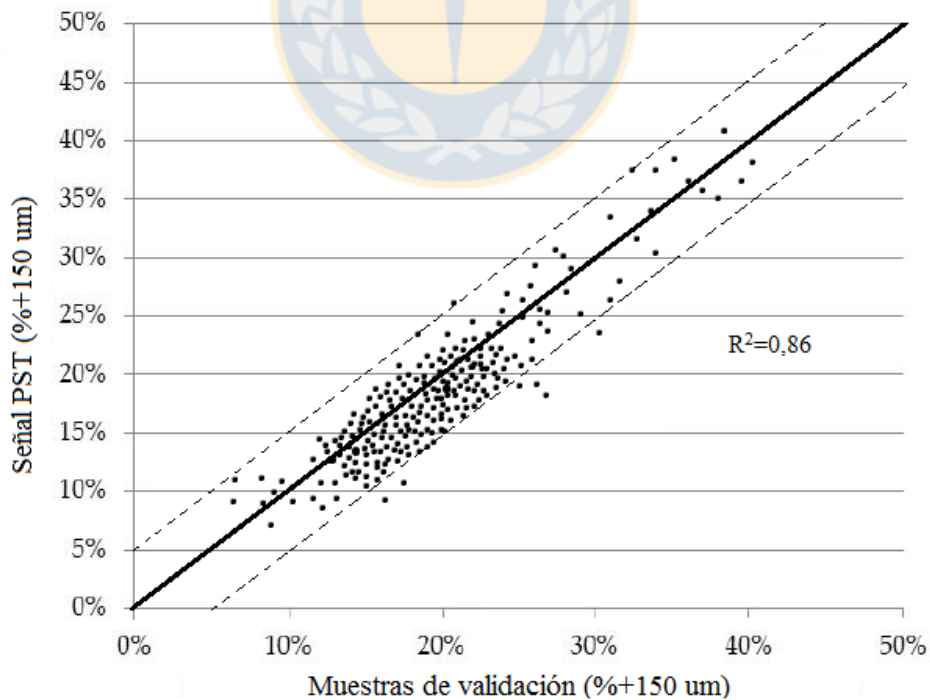


Figura 2.11. Señal PST v/s Muestras de validación.

La figura 2.12, muestra la señal en tiempo real recibida del sistema PST con las muestras de validación superpuestas.

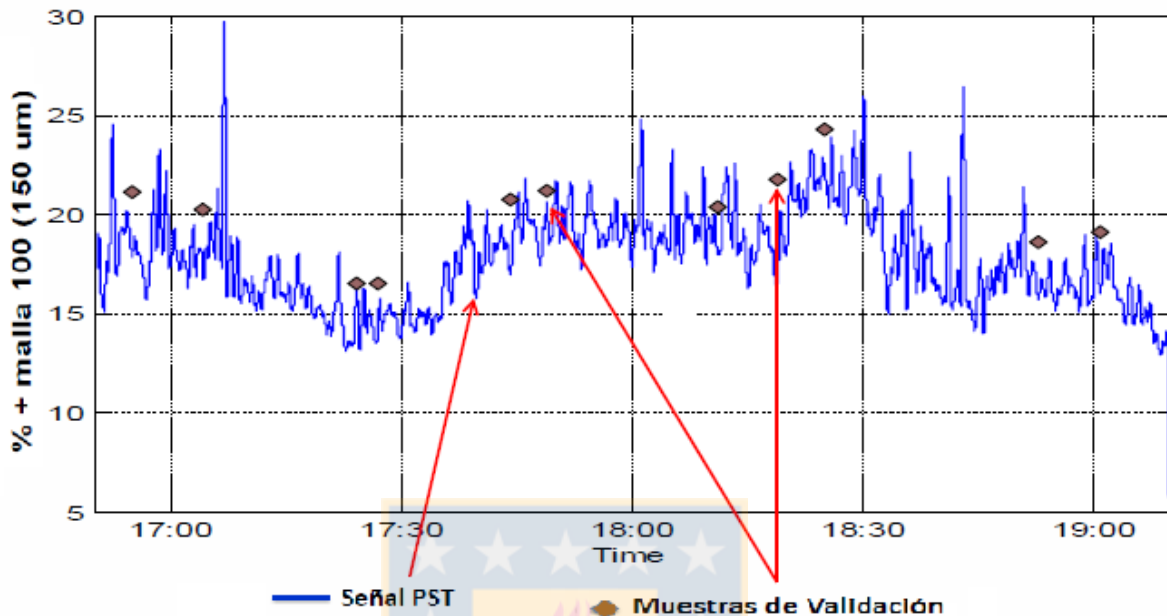


Figura 2.12. Representación de la validación del PST en planta en un ciclón.

La campaña de calibración se realiza para una batería si es que las otras baterías son idénticas, esto debido a que el modelo ha demostrado que el mismo modelamiento o algoritmo sirve para todas las baterías siempre y cuando sean simétricas.

El mayor desafío de la etapa de calibración es generar las condiciones operacionales para barrer todo el espectro operacional que se requiere del parámetro que se va a medir. Para el caso de Laguna Seca, la calibración se realizó considerando el rango de operaciones entre 10% a 35% sobre malla 100Ty.

Cabe destacar que en este rango de calibración la medición es precisa, es decir, si en la gráfica se visualiza una señal sobre el límite superior de 35% quiere decir que efectivamente el hidrociclón está clasificando más grueso, pero no asegura que la señal que muestra sea la exacta. Lo mismo sucede con el límite bajo de granulometría de 10%. Lo anterior se ilustra en la siguiente figura.

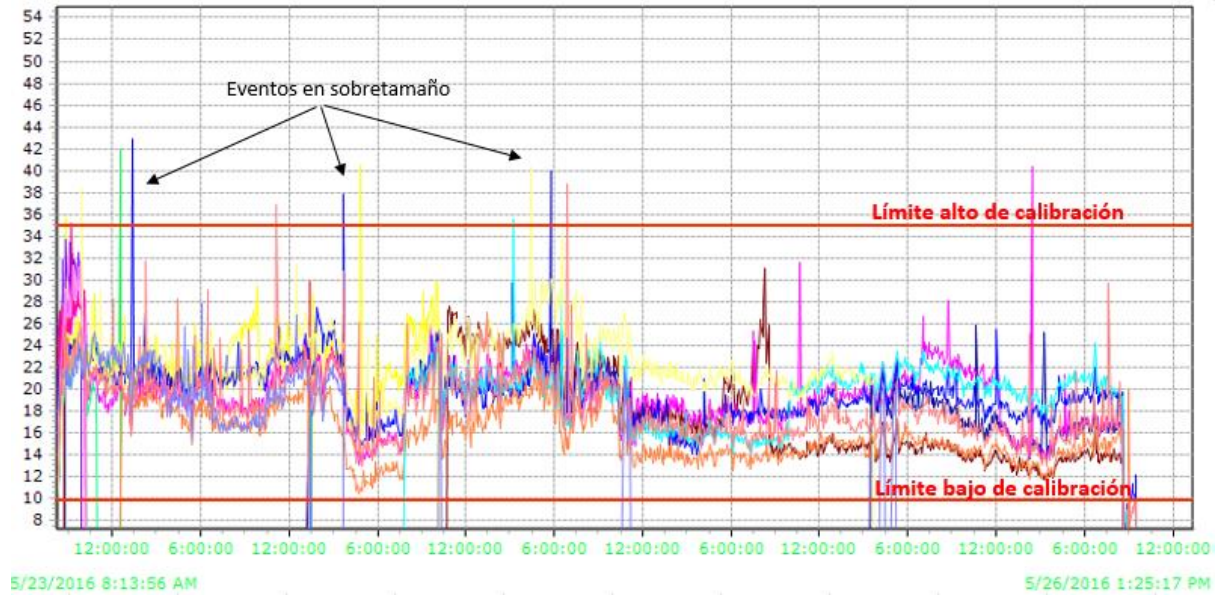


Figura 2.13. Explicación esquemática del rango de calibración en Uniformance PHD.



3. Diseño experimental

3.1 Análisis de datos

Para poder obtener información de los parámetros a evaluar, se utilizó una licencia de Honeywell cuyo convenio con la empresa permite obtener información en línea utilizando el complemento Uniformance PHD en Excel. Este complemento permite acceder a la base de datos histórica del proceso continuo de la planta.

Cada variable operacional tiene asociado una etiqueta o tag. Este tag se debe ingresar en la planilla desplegada en Excel como se visualiza en figura 3.1. Una vez seleccionada la variable a analizar, se debe ingresar la forma en la que se desea mostrar la data. Por ejemplo data sin procesar, promedio o bien la data instantánea. Posteriormente se selecciona el intervalo de tiempo a analizar y el intervalo de frecuencia. Como resultado se despliegan los datos directamente en una hoja de cálculo.

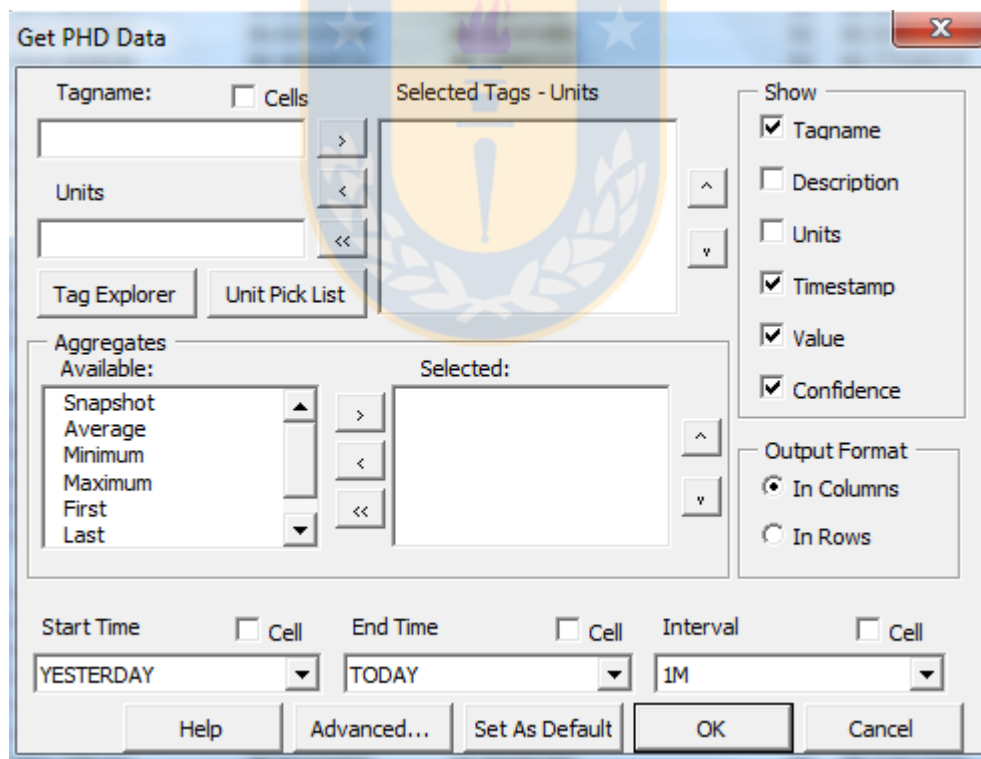


Figura 3.1. Visualización de PHD.

3.2 Condiciones de muestreo

Para evaluar el desempeño del PST hay dos líneas de estudio. El primero se relaciona con la comparación de las dos tecnologías, por lo tanto el muestreo que se requiere es un muestreo global de la batería en la forma de un compuesto de los overflow de los hidrociclones operativos. La segunda línea de estudio se relaciona con la representatividad de la señal otorgada por PST en línea, por lo tanto se requiere un muestreo individual de cada hidrociclón.

A lo largo del estudio, se efectuaron 217 muestreos de los cuales 199 corresponden a muestreos individuales y 18 muestreos globales. Estos muestreos fueron realizados en el overflow del hidrociclón como indica la figura 3.2.

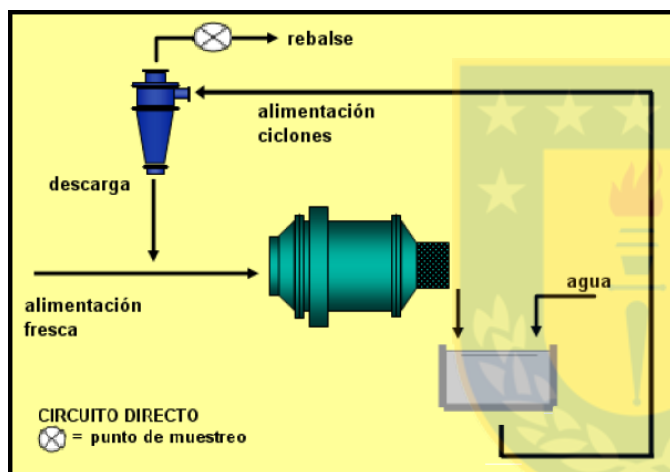


Figura 3.2 Punto de muestreo



Figura 3.3 Batería de hidrociclones

3.3 Procedimiento de muestreo

En concordancia con el valor primordial de la empresa, el muestreo se realizó con todas los protocolos de seguridad de MEL. Además se tuvo una comunicación permanente con sala de control asegurando que las condiciones operacionales de la batería estuviesen lo más estables posibles para que no incidiera en la toma de muestra.

El muestreo se realizó en la salida superior de los hidrociclones que estaban en operación, utilizando un cortador como el de la figura 3.4. En total hubo 29 campañas de muestreo, en donde el número de muestras por cada campaña dependía de la cantidad de hidrociclones operativos durante el día de muestreo. Es por esto las campañas o fechas de muestreo no tienen la misma cantidad de hidrociclones

muestreados, variando desde 9 a 5 muestreos relacionados a los que se encontraban operativos. Cada muestra se rotulaba con el tiempo exacto de extracción, para así poder comparar el periodo de tiempo correspondiente a la señal en el sistema.

Para el muestreo global, se utilizó un compuesto de la mezcla de las muestras de los hidrociclones operativos. Para este caso, se procedió a muestrear los ciclones durante un limitado periodo de tiempo, de manera tal que la toma fuese representativa del flujo global en una hora determinada. Luego se mezclaron las muestras formando el compuesto.

Cada muestra de flujo, se rotuló con el número de ciclón al que correspondía y la hora exacta de muestreo. Posteriormente se llevaron a análisis en el laboratorio metalúrgico, con el fin de obtener el perfil granulométrico de cada uno de los flujos.



Figura 3.4 Muestreador



Figura 3.5 Muestras para posterior análisis

3.4 Procedimiento de análisis granulométrico

El siguiente paso consistió en filtrar las muestras, previamente pesadas para poder llevarlas a secado en horno de laboratorio.

Una vez secas se pesaron nuevamente. Luego cada muestra se disgregó y homogenizó. Posteriormente se deslamaron las muestras para eliminar el fino (-325#Ty). Con el fin de tener una muestra óptima para análisis, se debe asegurar que esté seca, es por esto que fue necesario llevarla nuevamente al horno.

Como este análisis corresponde a un tamizaje de una malla determinada, se procedió a tamizar en un tamiz de 100#Ty, y el material que quedó sobre la malla se pesó obteniendo así el % en peso sobre malla 100.

3.5 Plan de trabajo

La instalación de una nueva instrumentación requiere de una puesta en marcha del producto y una posterior evaluación comercial. La puesta en marcha involucró el muestreo, instalación y calibración del sensor, generación de la interfaz PST en DCS, la generación de tags asociados y el desarrollo del sistema de control asociado a la señal PST.

El periodo de evaluación comercial, es la fase en la que se basa el presente trabajo. En esta etapa se realizaron distintos estudios y análisis con el objetivo de evaluar en operación el sensor. Éstos involucraron muestreos para validar la calibración realizada por la empresa colaboradora (CIDRA), evaluación de la disponibilidad de la señal PST, y el estudio de la incidencia en el sistema experto. En este último se realizó una optimización de la lógica con el fin de mejorar el desempeño del SE sobre la operación. Los periodos de estudio se visualizan en la figura 3.6.

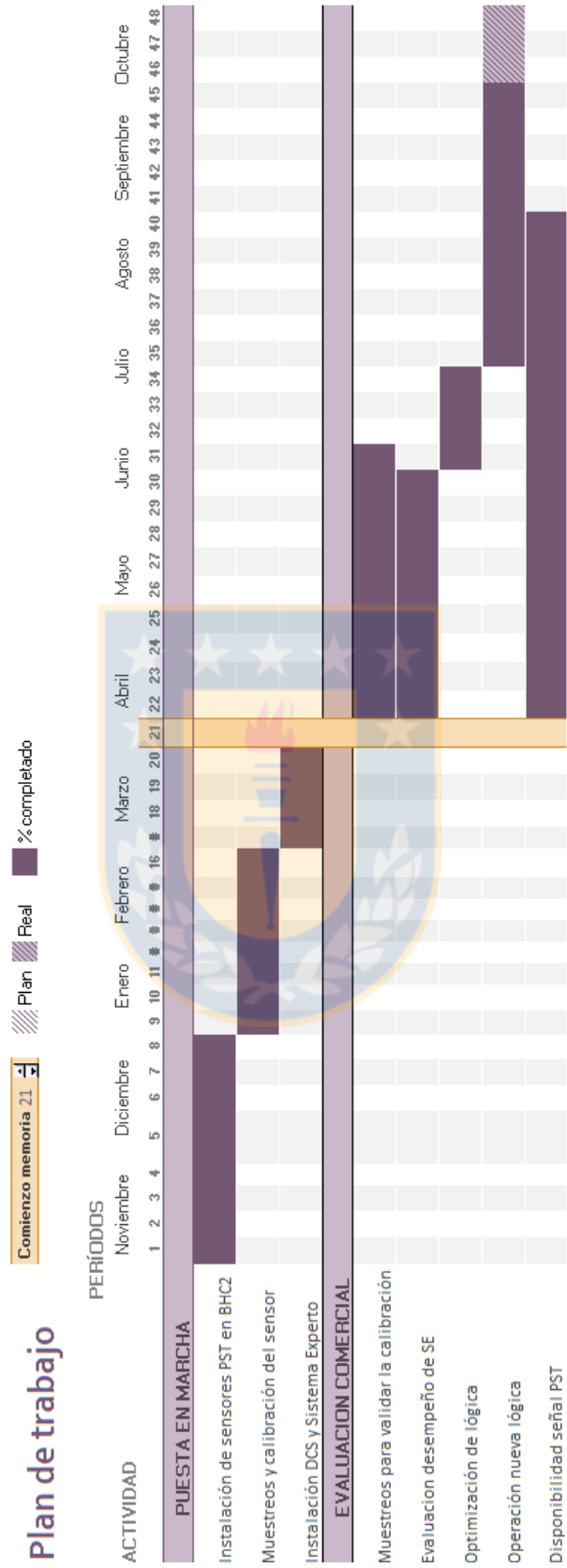


Figura 3.6. Carta Gantt de las actividades

4. Resultados y discusiones

4.1 Criterio I. Muestreos

Para realizar una comparación entre el desempeño del PST con respecto al PSI, se debe considerar que el PSI es un analizador de partículas que toma una muestra representativa de la batería, constituyendo una muestra global. Por lo tanto, para compararlo con la señal del PST se debe considerar la mediana de la señal de los hidrociclones que estén operativos y con el sensor PST ON.

Para analizar los datos, se sometió a un filtro basado en el límite bajo de calibración del PSI correspondiente a 18% en peso sobre malla 100 Tyler. Además hubo 3 datos que no se pudieron considerar debido a la no disponibilidad de la señal de PSI para someterla a comparación.

Tabla 4.1: Comparación de errores relativos PST v/s PSI

Fecha/hora	Tamizaje %+100#	PST %+100#	PSI %+100#	Err. Relativo PST	Err. Relativo PSI
7-04-2016/ 11:37	27.9	25.6	26.3	8.4%	6.2%
7-04-2016/ 17:53	17.2	17.9	21.2	4.4%	23.6%
9-04-2016 / 9:58	18.3	22.4	27.9	22.9%	52.9%
15-04-2016/ 19:03	14.1	14.4	18.2	1.6%	28.7%
16-04-2016/ 10:52	12.8	11.1	18.1	13.8%	41.0%
22-04-2016/ 16:41	11.8	7.4	19.2	36.8%	63.3%
23-04-2016/ 11:29	12.7	8.1	20.4	36.3%	61.1%
15-06-2016/18:50	9.4	14.5	18.6	53.3%	97.6%
16-06-2016/19:00	18.1	17.8	18.4	1.6%	1.7%
Promedio error relativo				19.0%	41.0%

De la tabla anterior se concluye que el dato del PST presenta aproximadamente un 22% menos de error relativo respecto al dato del PSI. Esto implica que el PST es más certero en el dato granulométrico.

A continuación, se presenta la correlación entre el muestreo y el dato que se obtiene de la mediana del PST y se compara con la correlación entre el muestreo y la señal PSI.

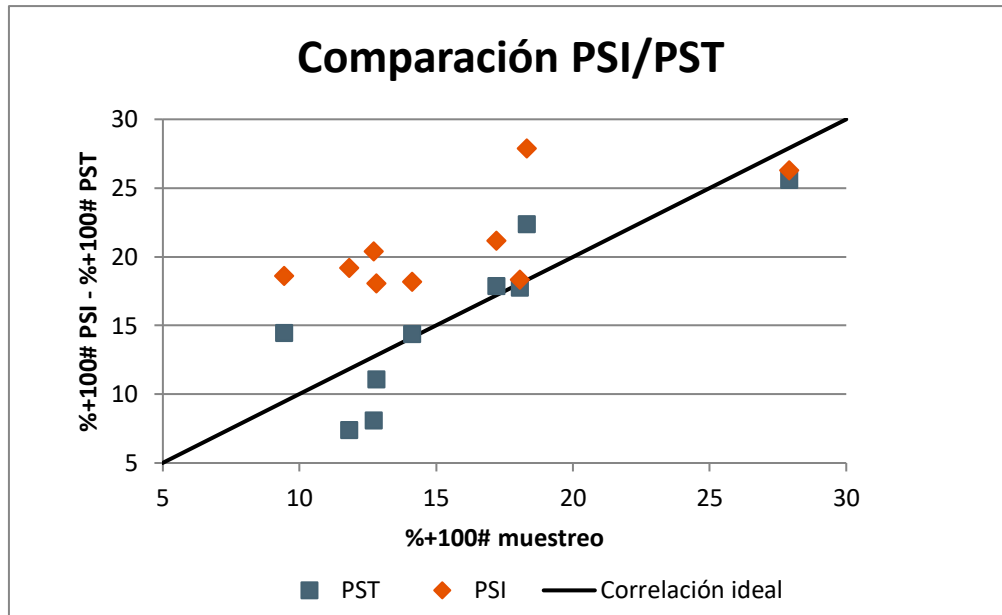


Figura 4.1. Comparación de señal PST v/s PSI respecto al muestreo

Con respecto a la correlación se observa que el dato global del PST tiene una mejor correlación que el PSI. El coeficiente de correlación de Pearson obtenido para el PST fue de 0.7 respecto al del PSI que fue de 0.5.

4.1.1 Resultados por hidrociclón.

Ahora bien analizando solamente la señal individual de cada hidrociclón de PST, se obtuvo lo siguiente.

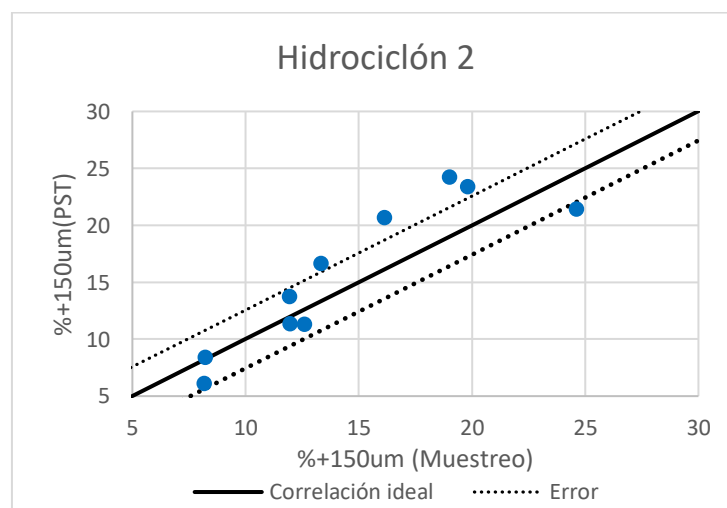


Figura 4.2 Señal granulométrica PST comparada con las muestras del hidrociclón 2

Para el caso del muestreo en el hidrociclón 2 se obtuvo un coeficiente de correlación de 0.79, lo que indica que la señal PST tiene una correlación fuertemente positiva con el muestreo. Para este caso se determinó un error promedio de ± 2.6 representado en el gráfico con las bandas de error.

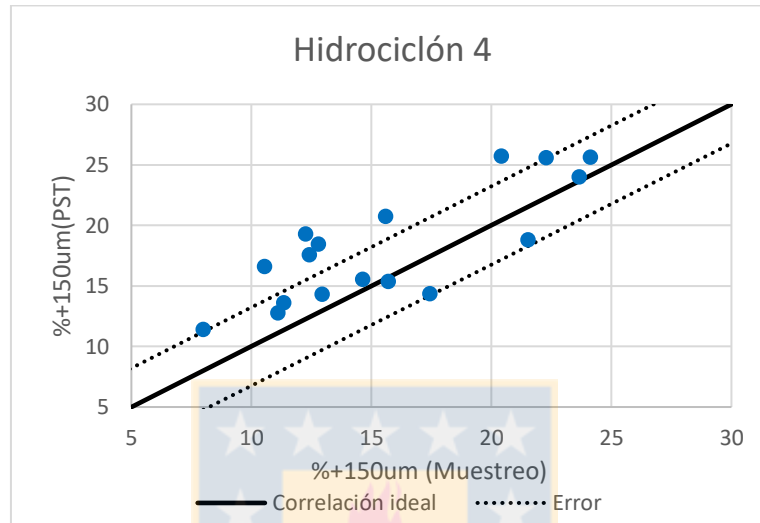


Figura 4.3 Señal granulométrica PST comparada con las muestras del hidrociclón 4

Para el caso del muestreo en el hidrociclón 4 se obtuvo un coeficiente de correlación de 0.66, lo que indica que la señal PST tiene una correlación moderadamente positiva con el muestreo. Para este caso se determinó un error promedio de ± 3.2 representado en el gráfico con las bandas de error.

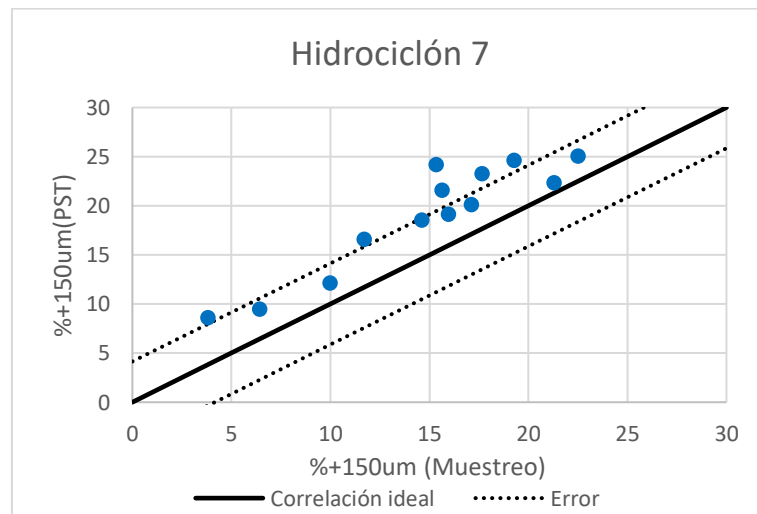


Figura 4.4 Señal granulométrica PST comparada con las muestras del hidrociclón 7

Para el caso del muestreo en el hidrociclón 7 se obtuvo un coeficiente de correlación de 0.87, lo que indica que la señal PST tiene una correlación fuertemente positiva con el muestreo. Para este caso se determinó un error promedio de ± 4.1 representado en el gráfico con las bandas de error.

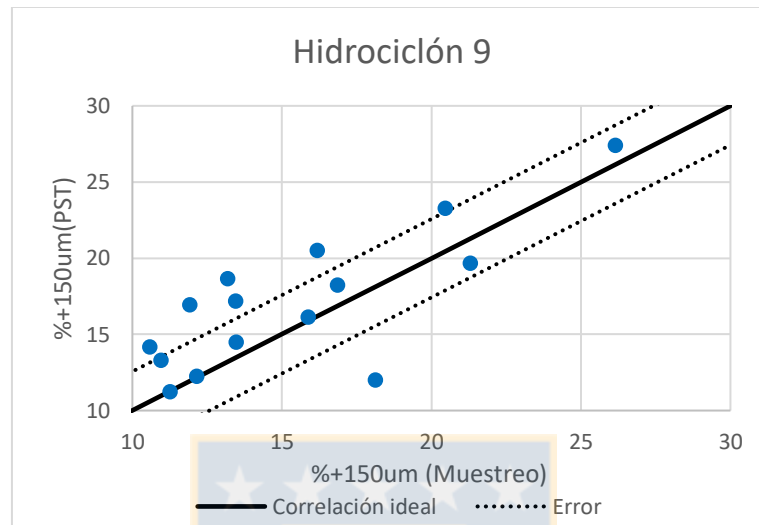


Figura 4.5 Señal granulométrica PST comparada con las muestras del hidrociclón 9

Para el caso del muestreo en el hidrociclón 9 se obtuvo un coeficiente de correlación de 0.62, lo que indica que la señal PST tiene una correlación medianamente positiva con el muestreo. Para este caso se determinó un error promedio de ± 2.6 representado en el gráfico con las bandas de error.

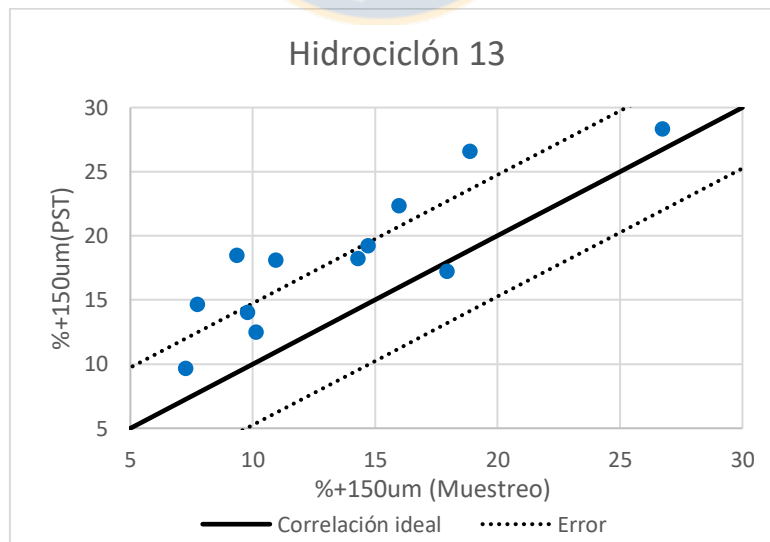


Figura 4.6 Señal granulométrica PST comparada con las muestras del hidrociclón 13

Para el caso del muestreo en el hidrociclón 13 se obtuvo un coeficiente de correlación de 0.75, lo que indica que la señal PST tiene una correlación fuertemente positiva con el muestreo. Para este caso se determinó un error promedio de ± 4.7 representado en el gráfico con las bandas de error.

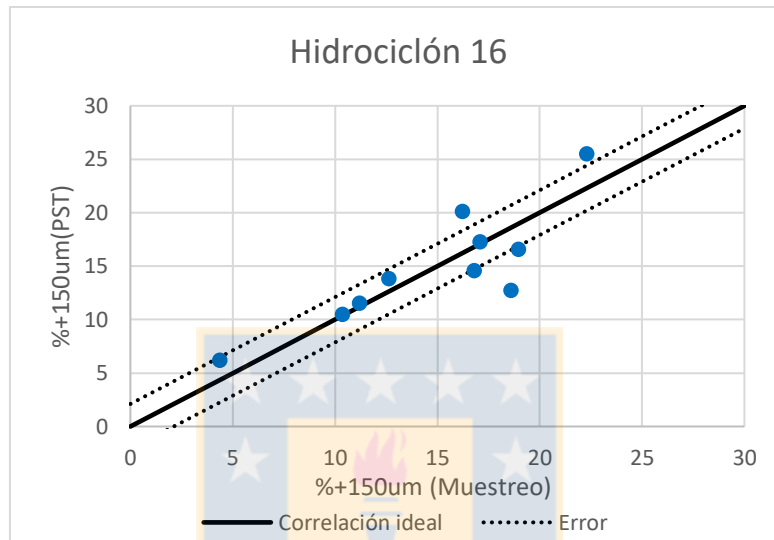


Figura 4.7 Señal granulométrica PST comparada con las muestras del hidrociclón 16

Para el caso del muestreo en el hidrociclón 16 se obtuvo un coeficiente de correlación de 0.73, lo que indica que la señal PST tiene una correlación fuertemente positiva con el muestreo. Para este caso se determinó un error promedio de ± 2.1 representado en el gráfico con las bandas de error.

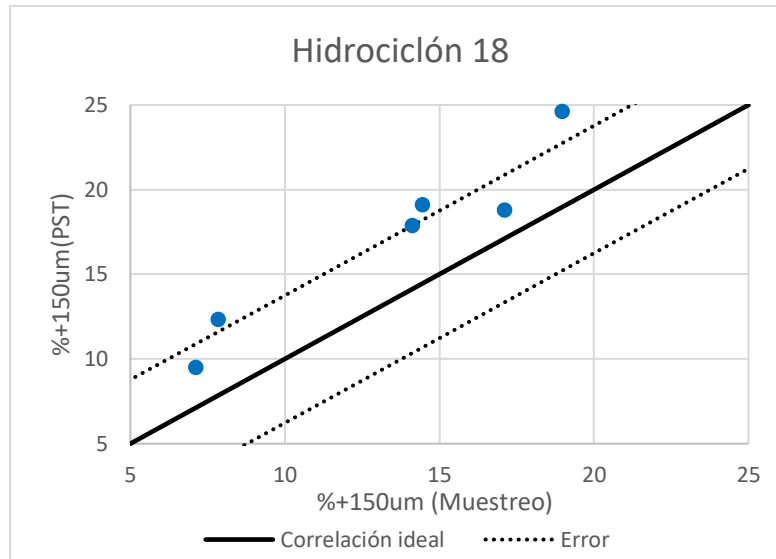


Figura 4.8 Señal granulométrica PST comparada con las muestras del hidrociclón 18

Para el caso del muestreo en el hidrociclón 18 se obtuvo un coeficiente de correlación de 0.93, lo que indica que la señal PST tiene una correlación fuertemente positiva con el muestreo. Para este caso se determinó un error promedio de ± 3.8 representado en el gráfico con las bandas de error.

De lo anterior se concluye que del muestreo individual se tiene en general una correlación fuertemente directa y positiva, con un coeficiente de correlación de Pearson promedio de 0,76.

Sin embargo, como se expuso anteriormente en la sección 2.5.2 el coeficiente de correlación entregado por la empresa CIDRA fue de 0.86 en la campaña de calibración del sensor. Es así como existe una diferencia entre los resultados expuestos por el muestreo realizado en este estudio y los otorgados por la empresa oferente del producto. Esta diferencia radica en diversos factores.

En primer lugar, los tamizajes realizados corresponden a técnicas distintas. El que utilizó la empresa que calibró el sensor fue tamizaje en húmedo, y el que se utilizó para obtener los resultados fue tamizaje en seco como se mencionó en la sección 3.4. Este factor es determinante debido a la sobreestimación del grueso en el caso del tamizaje en húmedo. Además influyen aspectos como la variabilidad del proceso, la continuidad en la toma de muestras y el componente humano.

A pesar de la diferencia entre los resultados y la calibración, la lectura del sensor PST es bastante precisa y certera en relación al % en peso mayor a 150 μm que pasa por el overflow de la batería.

De lo anteriormente expuesto, el PST presenta una señal más confiable en términos de granulometría con respecto al PSI y además presenta una señal individual certera a la hora de evaluar un evento de mala clasificación.



4.2 Criterio II. Evaluación del desempeño del Sistema experto con la señal granulométrica de PST

Para llevar a cabo el análisis se consideraron dos periodos de evaluación. El primero consiste en el primer periodo del turno día comprendido entre las 8:00 am y las 14:00 pm. El segundo consiste en el segundo periodo del turno día comprendido entre las 14:00 y las 20:00 pm.

Esta diferencia en los periodos radica en que el sistema experto de la planta estuviese o no funcionando con la señal PST. Para el caso del primer periodo si lo estaba y para el segundo no operaba con la señal PST.

Para evaluar el impacto de la señal, se consideraron las variables más importantes en el circuito de molienda-clasificación, considerando variables controladas y manipuladas. Es así como se evaluó tasa de alimentación fresca al circuito de molienda, velocidad del molino de bolas, potencia del molino de bolas y presión de la batería de hidrociclones.

Como variables importantes en la clasificación tomando el modelo de Plitt, se tiene el caudal de alimentación, el % de solidos de alimentación y la presión de la batería. Sin embargo, en la planta no se cuenta con una instrumentación en condiciones. Esto debido a que el densímetro y el flujómetro ubicados en la tubería que alimenta a la batería no están calibrados, haciendo que su medición no sea confiable.

Además cabe destacar que la velocidad de los molinos de bolas se mantiene estable dentro del rango de 11.5 rpm, esto debido a que en un estudio realizado anteriormente demostró que al variar la velocidad modificaba la tasa de desgaste de bolas y no se mantenía el nivel de llenado de los molinos.

Como hipótesis el impacto del sistema experto operando con la señal de PST, se traduciría en una menor variabilidad del tamaño de partículas en el circuito de molienda. Con lo anterior se tendría una menor variación en las variables del proceso.

A continuación se presenta la evaluación estadística del desempeño del circuito que se realizó durante 3 meses.

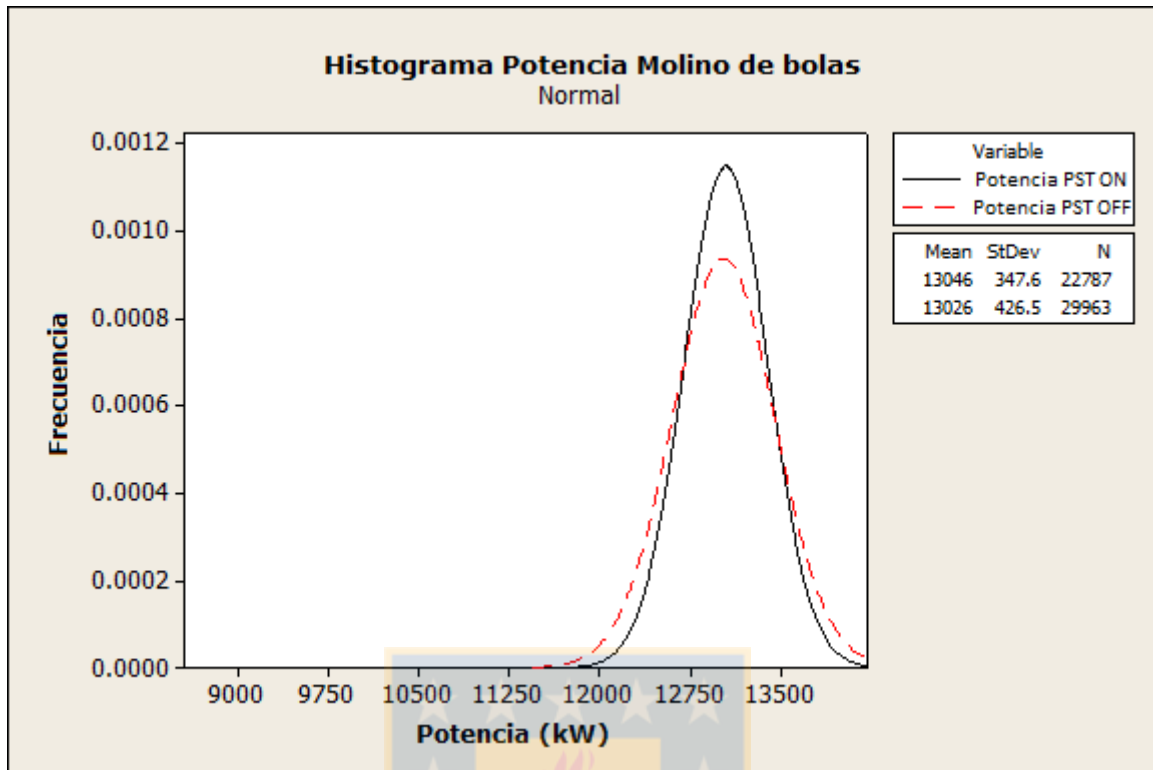


Figura 4.9 Histogramas superpuestos de potencia de molino de bolas con y sin señal

PST

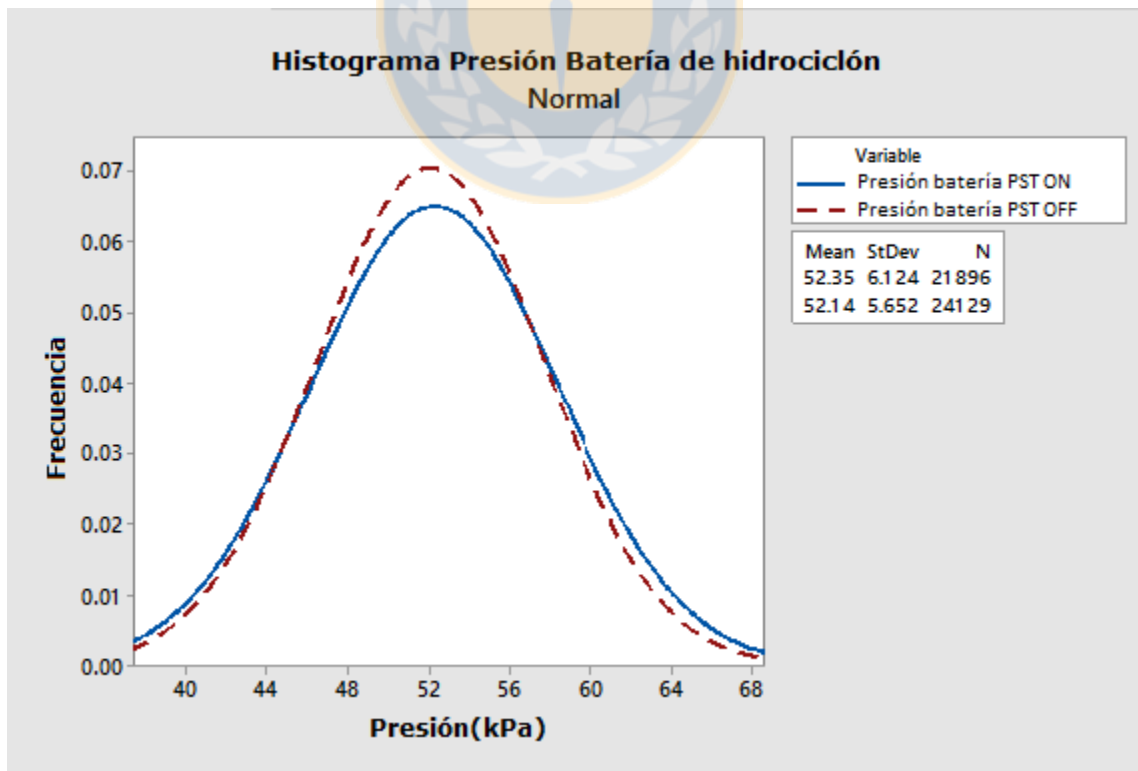


Figura 4.10 Histogramas superpuestos de presión de batería con y sin señal PST

De lo anteriormente expuesto se tiene como cuadro resumen lo siguiente

Tabla 4.2: Tabla resumen de las variables evaluadas de circuito molienda clasificación.

	PST ON	PST OFF
Tiempo en sobretamaño (min)	85	289
PST, %+100#Ty (mediana)	17.9	17.6
Tasa alimentación fresca (tph)	5208	5074
Potencia MB2 (kW, mediana)	13046	13026
Presión BHC2 (kPa, mediana)	52.3	52.1
Flujo agua sump (m ³ /h, mediana)	1112	1000
Razón Cu/Fe	0.41	0.4

De la tabla 4.2 se tiene que la aplicación del conjunto sensores PST junto con la lógica de sistema experto permitió disminuir en un 70% el tiempo en que los ciclones se encuentran en una condición de sobretamaño (mayor a 35%+100# Ty). Lo anterior se logró bajo una condición de mayor tonelaje procesado, lo que a su vez implicó una mayor granulometría a flotación.

Es importante destacar que durante la prueba existió restricción en el flujo máximo de agua adicionada al sumidero y se adicionó agua en terreno por medio de mangueras, sin contar con mediciones. Esto impactó directamente en la potencialidad de la lógica de lograr p80s más bajos en forma sostenida.

Se debe notar que la operación de molino de bolas y BHC (potencia y presión, respectivamente) se mantuvo casi perfectamente igual en ambas condiciones evaluadas. Por lo tanto en términos operacionales se mantuvieron estables.

Al finalizar la prueba se observó el funcionamiento detallado de la lógica implementada, encontrando una oportunidad de mejora que será vista con mayor detalle más adelante.

4.3 Criterio III. Disponibilidad del PST en comparación a PSI

Con objeto de analizar resultados a largo plazo se analizó la cantidad de tiempo en la que estuvo disponible la señal del PST y del PSI durante 5 meses. Esto implicó que para el caso del PST, se utilizó el dato de señal de granulometría para construir un catastro de la disponibilidad por hidrociclón y así promediarlas para obtener la global. No es el mismo caso del PSI, ya que éste solo presenta una señal debido a que es un muestreo del compósito de la batería.

Para este análisis se tuvo la consideración de excluir la data correspondiente a las mantenciones y detenciones.

A continuación se presentan los datos obtenidos.

Tabla 4.3 Resumen disponibilidad del PST por hidrociclón y global.

Hidrociclón	Disponibilidad PST
1	99.97%
2	100%
3	99.99%
4	99.98%
5	100%
6	100%
7	100%
8	99.98%
9	100%
10	99.99%
11	99.99%
12	100%
13	100%
14	0%
15	100%
16	100%
17	100%
18	100%
19	100%
Promedio global*	100%

De la tabla se observa que la disponibilidad del ciclón 14 es 0%. Esto se debe a que el hidrociclón tenía la línea de aire de la válvula de alimentación desacoplada, por lo que este dato se despreció para el promedio debido a que este hidrociclón no fue utilizado durante el periodo de evaluación.

A continuación se compara la disponibilidad del PST v/s PSI.

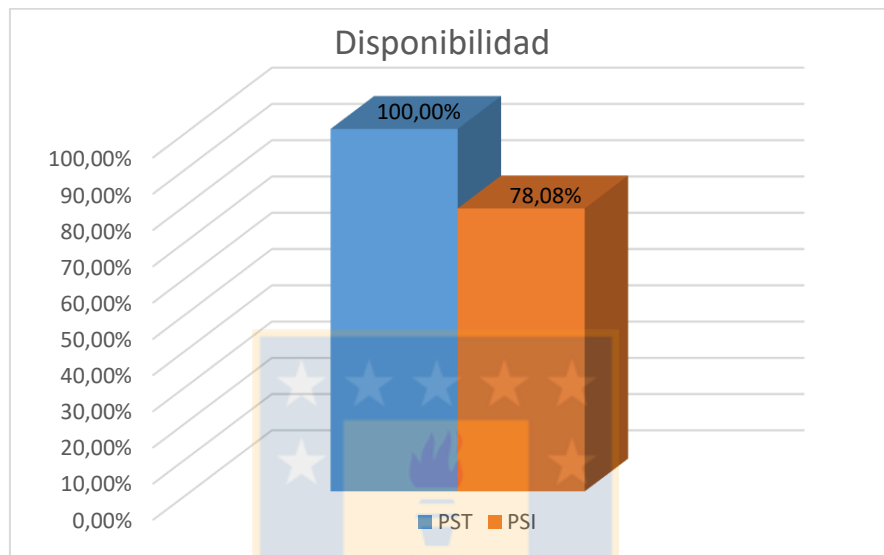


Figura 4.11: Gráfico comparativo de disponibilidad PST v/s PSI

De lo anterior se tiene que la disponibilidad del PST respecto a la del PSI es un 21,9% mayor.

Una mayor disponibilidad de la señal está relacionada a tomar acciones preventivas en la operación, evitando algún evento de acordonamiento. Al tener mayor disponibilidad se tiene un sistema más robusto y confiable.

4.4 Criterio IV. Potencial Predictivo del PST

Consiste en la identificación de hidrociclones individuales que presentan problemas en clasificación debido a desgastes en su estructura, como ápex desgastados, ápex bloqueados, liner dañado, vórtex finer dañado, etc...

Esta evaluación se divide en dos etapas. La primera consiste en el seguimiento de la cantidad de eventos ocurridos en un periodo determinado. Se le llama evento a la condición operacional en el que uno o más hidrociclones esté clasificando sobre el límite alto de calibración, es decir 35% sobre malla 100 Tyler.

De acuerdo a esto se obtiene un registro de cual o cuales hidrociclones presentan una mayor frecuencia de eventos.

Luego viene la segunda etapa, en la que el metalurgista de planta debe analizar el estado de la batería de hidrociclones cuando exista alguna detención o mantención programada.

Según la evaluación del metalurgista se deben validar o corroborar los datos obtenidos de los hidrociclones con mayor frecuencia de eventos.

Durante el periodo de evaluación se realizaron dos inspecciones de la batería de hidrociclón. Esto considerando la última fecha de cambio de la batería completa de hidrociclones que se realizó el 30 de Mayo de 2016 y además considerando las condiciones en las que el metalurgista pudo realizar la inspección, esto es, en una detención o mantención planificada de planta.

De las inspecciones realizadas no se obtuvo una relación entre los hidrociclones dañados y ciclones con mayor frecuencia de eventos.

A continuación se presenta los datos de los hidrociclones y los resultados vistos en planta.

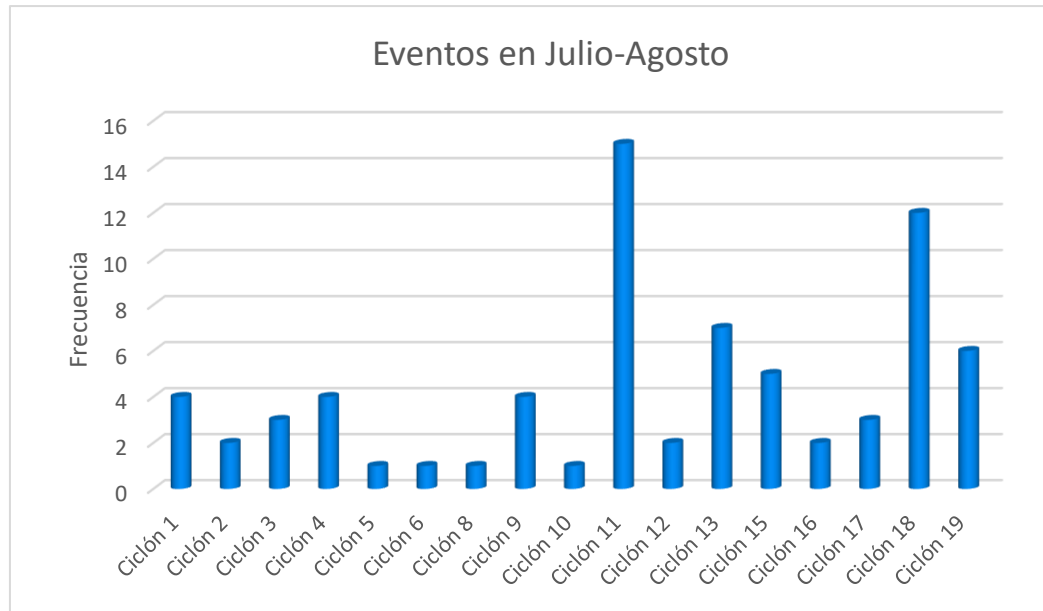


Figura 4.12 Gráfico de frecuencia de eventos durante el periodo evaluado.

De acuerdo a lo anterior los hidrociclones que deberían tener algún tipo de desgaste o alteración en su estructura son el 11, 13, 15, 18 y 19.

Se debe considerar que los hidrociclones que pudieron ser evaluados cualitativamente en esa ocasión fueron el 11, 13, 15 y 18. Sin embargo, de acuerdo a lo entregado por el metalurgista ninguno de estos hidrociclones presentaba anomalías.

A continuación se presentan las condiciones en las que estaban dos de los hidrociclones evaluados por el metalurgista y se contrastan con imágenes de inspecciones anteriores en las que habían hidrociclones que si presentaban anomalías.



Figura 4.13 Hidrociclón 11 en condiciones normales.



Figura 4.14 Hidrociclón 13 en condiciones normales



Figura 4.15 Hidrociclón con ápex quebrado y resalte



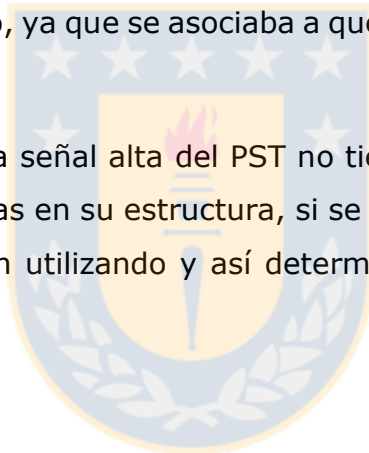
Figura 4.16 Hidrociclón con porta ápex desgastado.

Respecto al análisis cualitativo de los hidrociclones se aprecia que se encuentran en buenas condiciones. Por lo que la evaluación del potencial predictivo no es concluyente.

Se debe considerar que la inspección realizada es solamente visual y cualitativa, que se realiza en un espacio confinado, de difícil acceso y escasa visibilidad. Por lo que quizás sea objeto de estudio mejorar esta forma de evaluar la condición de los hidrociclones, ya sea con una nueva tecnología presente en el mercado o bien mejorando el análisis actual.

Como resultado del análisis del 3^{er} criterio se observó en planta que la utilización y disponibilidad del hidrociclón 14 había sido 0% después del cambio completo de la BHC2. Gracias a la señal del PST se detectó que había un problema con este hidrociclón. Resultó ser un problema de una línea de aire en la válvula de alimentación al ciclón que en terreno no se había observado, ya que se asociaba a que el hidrociclón tenía un problema con el limit switch.

Por lo tanto a pesar de que la señal alta del PST no tiene una relación directa con que un hidrociclón tenga problemas en su estructura, si se puede tener una visualización de que hidrociclones no se están utilizando y así determinar la causa raíz del porqué de esta baja utilización.



4.5 Optimización de la lógica de sobretamaño

Como ya se mencionó antes, en un inicio se esperaba que la lógica del sistema experto funcionando con la señal de granulometría tuviera un efecto en la estabilidad de las variables operacionales. Sin embargo, con el estudio que se realizó entre los meses de abril, mayo y junio, se concluyó que no hubo mayor impacto.

Debido a esto se decidió realizar un estudio exhaustivo a la lógica del sistema experto asociada a la lógica de sobretamaño. Para esto se utilizó la plataforma PHD para extraer y visualizar la data de los eventos.

El método de análisis consiste en identificar los episodios en planta donde se tuvo eventos de sobretamaño. Para cada evento se estudió si en ese periodo el ciclón estuvo o no disponible para que pudiera operar la lógica. Esto es, cuando el tag de apertura de la válvula de alimentación al hidrociclón marque abierto (1) además el tag del status de ciclón operación/mantenimiento marque (0) y que el tag del status del ciclón manual/automático marque (1). Así para que un hidrociclón esté disponible para que actúe la lógica sobre él, tiene que estar operativo y en automático.

Durante el estudio se encontró un defecto en la lógica de control respecto a los tiempos de respuesta del sistema frente a una señal de alta granulometría.

De la experiencia en planta se tiene que bastan en promedio 12 minutos en los que una batería de hidrociclón este acordonada para que provoque un embancamiento masivo de celdas.

Un acordonamiento masivo se puede dar por ciertas condiciones operacionales. Un caso es tener un mineral de alimentación con una baja razón Cu/Fe <0.3 , además de una presión alta en la batería (sobre 55 kPa) o bien con un porcentaje en sólidos de alimentación a la batería muy bajo ($<60\%$). Esto produce una alta carga circulante en la molienda secundaria, por lo que la tarea de molienda disminuye y la granulometría alimentada a la batería no es óptima.

También ocurre cuando se mantiene la misma tasa de alimentación fresca al molino SAG pero solo están operando 3 de los 4 molinos de bolas. En este caso, ocurre una sobrecarga de los molinos de bolas que se visualiza en la disminución abrupta de la

potencia, que repercute en la capacidad de molienda de los molinos sacrificando la granulometría alimentada a la batería.

Otra condición es producto de un taponamiento del ápex del hidrociclón. Cuando hay un elemento que se encuentra tapando la descarga del HC, la única vía de salida de la pulpa es el vórtex. En este caso se visualiza una disminución de carga circulante a la molienda secundaria y como producto de esto, aumenta la potencia (holgura del molino) y disminuye la presión en los descansos. Como toda la alimentación del hidrociclón sale por el vórtex ocurre un cortocircuito de la pulpa por lo que no hay clasificación, y todas las partículas gruesas pasan hacia flotación.

El acordonamiento masivo ocurrido en planta se originó por la primera condición anteriormente descrita. Y fue necesario estudiar lo ocurrido para evidenciar los efectos aguas abajo además de contrastar los resultados de la optimización de la lógica y demostrar su efectividad.

Como se mencionó en el punto 4.2 la lógica en la primera fase del estudio (desde Abril hasta Junio) solo estaba activada desde las 8:00 hasta las 14:00 hrs.

El evento de embancamiento masivo ocurrió el 4 de Mayo y tuvo una duración de aproximadamente 1 hora.

Tabla 4.4: Tiempo en sobretamaño con lógica antigua

Tiempo en sobretamaño	Minutos
Hidrociclón 8	11:11
Hidrociclón 9	23:35
Hidrociclón 18	11:54
Hidrociclón 17	8:39
Hidrociclón 4	5:50

En este punto cabe recordar que el limite alto de calibración corresponde a 35% +100#Ty, y que una medición sobre este límite no es precisa pero si indicativa de alta granulometría.

Como se ve en la figura 4.17 en este evento en particular bastaron 5 hidrociclones con mala clasificación para producir un acordonamiento masivo. La duración promedio de

cada evento (señal granulométrica sobre 35% + #100 Ty) fue de 12 minutos y 33 segundos.

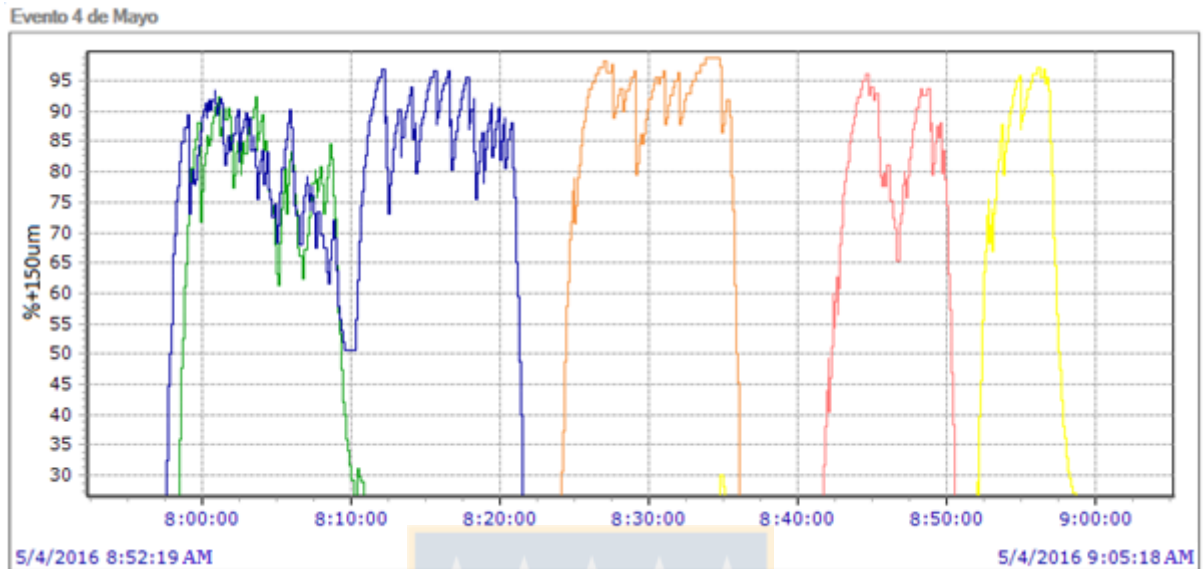


Figura 4.17 Visualización de un acordonamiento masivo mediante plataforma PHD.

Producto de este acordonamiento y muchos eventos evidenciados durante el periodo de estudio, se detectó que el tiempo de respuesta del cierre del ciclón que presentaba problemas era muy largo.

Es por esto que se realizó una optimización a la lógica. Ésta consistió en que en un comienzo el código solamente tomaba en cuenta la PV de granulometría individual por hidrociclón, pero no chequeaba que dicho hidrociclón estuviera habilitado para que el sistema experto actuara sobre él, esto es, en modo operación y en modo automático.

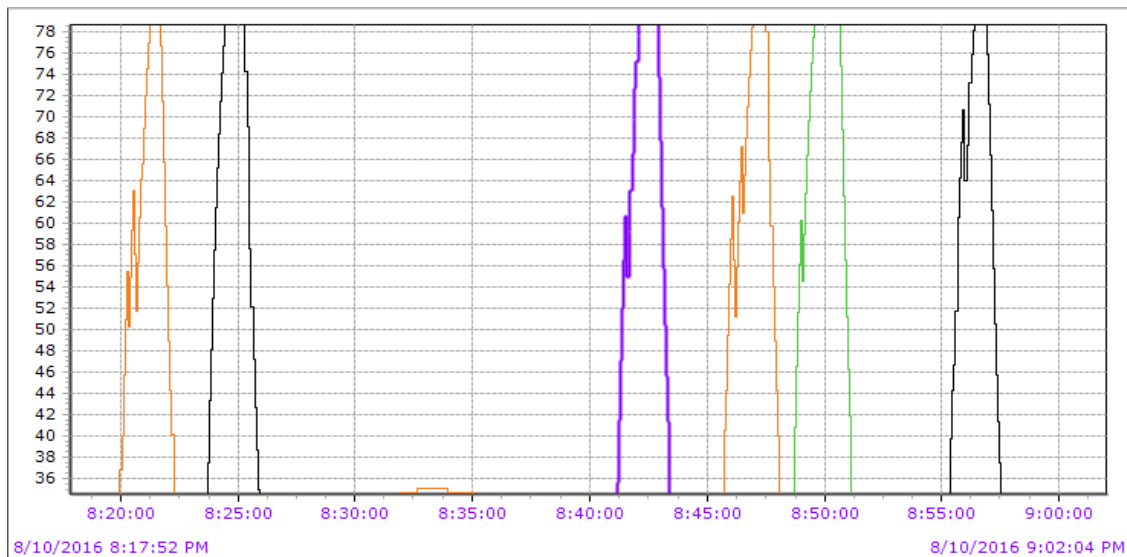


Figura 4.18 Visualización de la nueva lógica actuando sobre un evento.

A raíz de lo identificado en dicha oportunidad se modificó el código para determinar 2 máximos: ciclón con mayor granulometría en términos absolutos y ciclón con mayor granulometría habilitado para el SE.

Con este cambio las lógicas de acordonamiento solo se activan para ciclones sobre los cuales efectivamente el sistema experto puede tomar acción.

Como resultado de la optimización anterior se puede visualizar en la figura 4.18, que en agosto hubo un evento con potencial de acordonamiento de 4 hidrociclones. Debido a la acción de la lógica de control se cerraron los hidrociclones con mala clasificación en un tiempo promedio de 2 minutos (Tabla 4.5). Este tiempo es el tiempo mínimo que se requiere para que el Sistema tome acción y mande el comando de apertura y cierre de los hidrociclones en malas condiciones.

Tabla 4.5 Tiempo en sobretamaño con lógica optimizada

Tiempo en sobretamaño	Minutos
Hidrociclón 18	2:13
Hidrociclón 9	2:09
Hidrociclón 8	2:10
Hidrociclón 18	2:18
Hidrociclón 13	2:23
Hidrociclón 9	2:09

Además de la optimización mencionada a la lógica de alta granulometría, se determinó que el periodo de 6 horas en que la lógica estaba activa no era un periodo óptimo. Por lo que se cambió el día 23 de junio a estar activa las 24 horas del día de forma continua.

Lo anterior se determinó debido a que la lógica no alcanzaba a balancear la batería, además de que se había establecido un periodo de 6 horas para contrastarlo con el escenario en que la lógica no estaba activa. Como no tuvo resultado ese análisis se procedió a hacer esta mejora.

La utilización de la nueva lógica logró un aumento en la utilización promedio de los ciclones además de minimizar la diferencia entre ellos.

De esta manera se logra operar la batería de forma más homogénea permitiendo que el desgaste de los hidrociclones sea más uniforme.

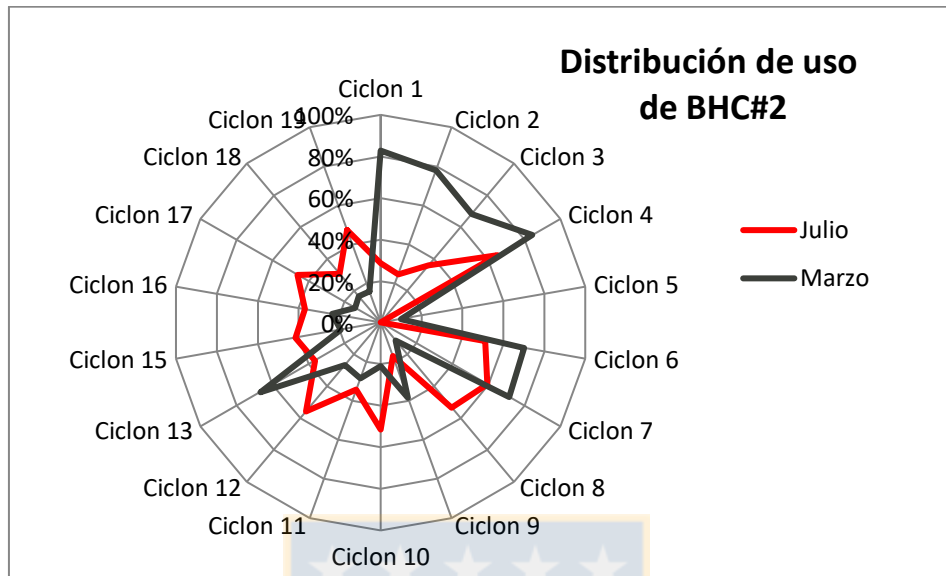


Figura 4.19 Distribución del uso de batería de hidrociclones

De la figura 4.19 se aprecia que el periodo de marzo, en donde operaba la lógica "antigua" la tendencia era una utilización frecuente del primer cuadrante de la batería. En el periodo de julio, en donde operaba la lógica "nueva" se aprecia que en promedio la utilización de los hidrociclones fue más homogénea, permitiendo la utilización de la mayoría de los hidrociclones.

4.6 Efectos económicos de un acordonamiento

El efecto de un acordonamiento se puede analizar desde dos puntos de vista. El primero es el de las consecuencias en los equipos por el lado de mantención y el otro son las repercusiones en la producción.

Durante el periodo de estudio, se evidenció un acordonamiento masivo durante el mes de Mayo. Lo que sucedió fue que las características del mineral de alimentación cambiaron bajando la razón Cu/Fe. Esto produjo un aumento en la densidad del mineral y de acuerdo al balance de fuerzas de la sección 2.2.3, al ocurrir esto disminuye el radio de partículas al rebalse. Así la clasificación se hizo más fina y el flujo de descarga al underflow fue mayor. Esto provocó una condición de acordonamiento y por consiguiente un aumento de granulometría en el rebalse.

Debido a esto, las baterías de ciclones presentaron los primeros síntomas de acordonamiento. Para lidiar con las condiciones operacionales, el supervisor de sala bajó el tratamiento para controlar la carga hacia molienda secundaria, sin embargo la razón Cu/Fe seguía muy baja con una razón de 0.28. Pasadas las horas, se evidenciaron los primeros indicios de material grueso en canaletas rougher. Posterior a eso, se aisló MB4 y se redujo el tratamiento. La condición de acordonamiento se hizo presente en todas las baterías de hidrociclón, lo que repercutió en un posterior embancamiento de la canaleta rougher y seguido de esto la detención de planta durante 3 horas y media.

Las consecuencias en planta producto de este tipo de evento son catastróficas tanto para los equipos como para la producción. Para efectos de equipos un embancamiento masivo afecta principalmente a los ejes centrales de las celdas rougher, esto debido a que el material grueso queda en el fondo de la celda afectando el normal funcionamiento de éstas (se observa un efecto de pulpeo de la celda) e incluso en eventos más críticos con el paso del tiempo llegan a romperse los ejes de las celdas.

Para evaluar el efecto en la producción, se recurrió a datos de informes ejecutivos y se complementó con datos de los parámetros metalúrgicos de la semana en la que ocurrió el embancamiento.

Tabla 4.6 Cuadro resumen de las condiciones del embancamiento

Nº Ciclones acordonados	5
Ciclones	4,8,17,18 y 19
Tiempo de detención de MSAG	3:24:00
Equipos afectados	MT-013 embancado; FT-207 eje cortado; Dardo traspaso celda 216 embancado; Columna FT-312 embancada.
Duración total de evento	1:01:09
Pérdida estimada de Cu fino (ton)	328
Pérdida estimada de Cu fino (lb)	723.117
Pérdida (US\$)	1.516.376

Es decir, un evento de acordonamiento en donde 5 ciclones se acordonaron en distintos periodos de tiempo ocasionó una pérdida estimada de US\$ 1.516.376. Cabe destacar que esta aproximación, está basada en un informe ejecutivo en el que se analizó el tonelaje de Cu fino real procesado y el proyectado semanal, considerando el costo de producción de cobre fino.

Además como hubo una detención de planta y pasó material grueso a flotación, el parámetro de la recuperación se vio afectada durante la semana del evento del 4 de Mayo.

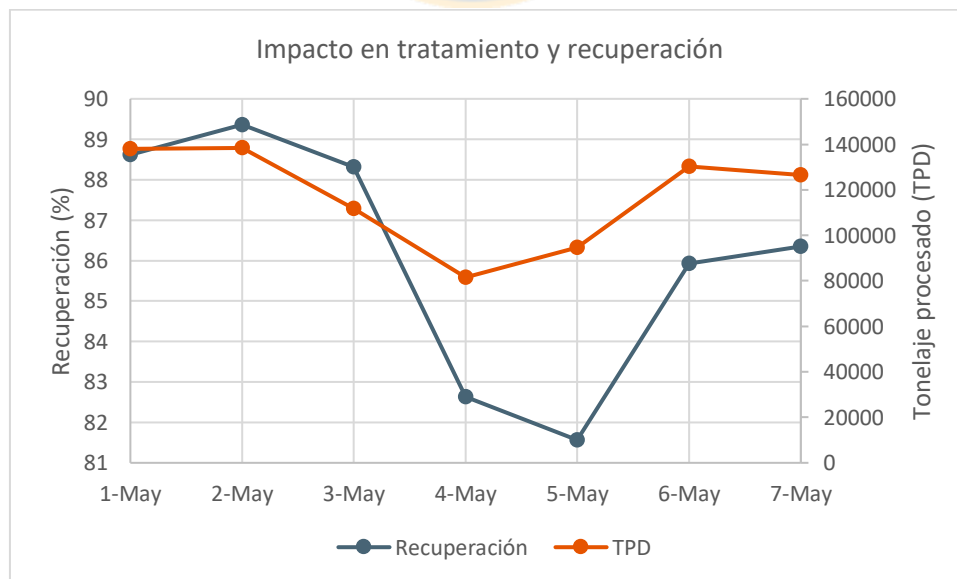


Figura 4.20. Impacto en tratamiento y recuperación

En la figura anterior se visualiza que uno de los parámetros más afectados es la recuperación. Esto producto del escenario de alta granulometría que se extendió al área de flotación. Lo que se traduce en una menor efectividad a la hora de la colección de partículas porque al ser más grandes en tamaño son difíciles de mantener en suspensión y la probabilidad de desadhesión es mayor.



5. Conclusiones

- La utilización de las señales de granulometría entregadas por PST representan una alternativa de mayor confiabilidad y representatividad respecto al sensor PSI con un 22% menos de error relativo.
- El análisis del desempeño del SE operando con la señal PST indicó que disminuía el tiempo total en sobretamaño, sin embargo no se logra una disminución del p80.
- La disponibilidad de la señal PST supera en un 22% a la del PSI. Esto implica que PST permite operar con un lazo de control más robusto y confiable a la hora de actuar el sistema experto.
- El estudio del nivel predictivo no fue concluyente a la hora de identificar hidrociclones defectuosos.
- La lógica nueva en el sistema experto permite una operación más homogénea de los ciclones que constituyen la batería. Esto tiene el potencial de lograr perfiles de desgaste similares para todas estas unidades, minimizando el riesgo de tener algunos ciclones que presenten una clasificación deficiente por sobre el resto.
- El funcionamiento de la lógica optimizada permite evitar eventos que pueden causar un embancamiento masivo.

6. Recomendaciones

- Si bien el análisis del desempeño del SE operando con la señal PST indicó que disminuía el tiempo total en sobretamaño, no se logra una disminución del p80. Una recomendación es aprovechar la potencialidad de la lógica de lograr p80s más bajos en forma sostenida. Esto se lograría implementando una lógica que incorpore agua al sumidero producto de una alta granulometría, considerando siempre la presión de la batería (que se controla con la velocidad de la bomba de alimentación) y nivel del cajón. Escondida se encontraba en la fase final de la instalación de los flujómetros al sumidero, es por esto que aún no ligaban la lógica de granulometría con la adición de agua al sumidero.
- Una recomendación es que las señales de status de ciclón otorgadas por el sistema PST tienen la potencialidad de reemplazar a los status actuales basados en limit switches (posición abierto/cerrado de válvula cuchillo). El limit switch es un sensor de contacto que muestra una señal eléctrica ante la presencia de un movimiento mecánico. Al estar en contacto con la pulpa afecta la detección de la posición, por lo que muchas veces su status indica error. Ahora bien si el status de un ciclón estuviese asociado al PST este sería confiable y no habría error, debido a que el sensor PST indica que está operativo si y solo si hay un flujo de pulpa en contacto con él.
- Lo anterior se puede utilizar en lógicas de DCS, así como en cálculo de horómetros para estos equipos. Que además serviría para tener una mantención programada de los ciclones cuando sea necesario su cambio.

7. Bibliografía

- [1] Christian O'Keefe y Robert Maron. (2016). Multiple Concentrator Survey of Real-Time Individual Cyclone Particle Size Tracking (PST). *Procemin 2016, 12th International Mineral Processing Conference*.
- [2] L.G Austin y F. Concha.A. (1994). Diseño y simulación de circuitos de molienda y clasificación. (pp 207-230)
- [3] Outotec. (2014). Informe inspección PSI-200 Planta Laguna Seca.
- [4] Outotec. (2009). On-line slurry particle size analyzer.
- [5] Américo Zuzunaga, Peter Ameluxen. (2016). Molienda y Flotación – Un Enfoque Holístico a la Optimización de Procesos.
- [6] Minera Escondida Limitada. (2015). Filosofía de control sistema experto molienda.
- [7] Minera Escondida Limitada. (2013). Parámetros operacionales Concentradora Laguna Seca.
- [8] Minera Escondida Limitada. (2016). Condición equipos CLS Línea 1.
- [9] Robert Maron, Jerin Russell. (2014). Optimización del proceso en Rio Tinto-Kennecott utilizando medición en tiempo real del material grueso en flujos de overflow de cada hidrociclón. *IMPC-2014*
- [10] J. Sepúlveda. (1998). Molienda y clasificación, en ambiente Moly-cop Tools. Moly-Cop Chile S.A.
- [11] F.Concha, A. Barrientos, J. Montero y R. Sampaio. (1996). Air core and roping in hydrocyclones. *International Journal of Mineral Processing*. 743-749
- [12] Moly-cop. (s.f). Apuntes clases "Modelo matemático de la clasificación".

Anexo A. Tablas de error y correlaciones

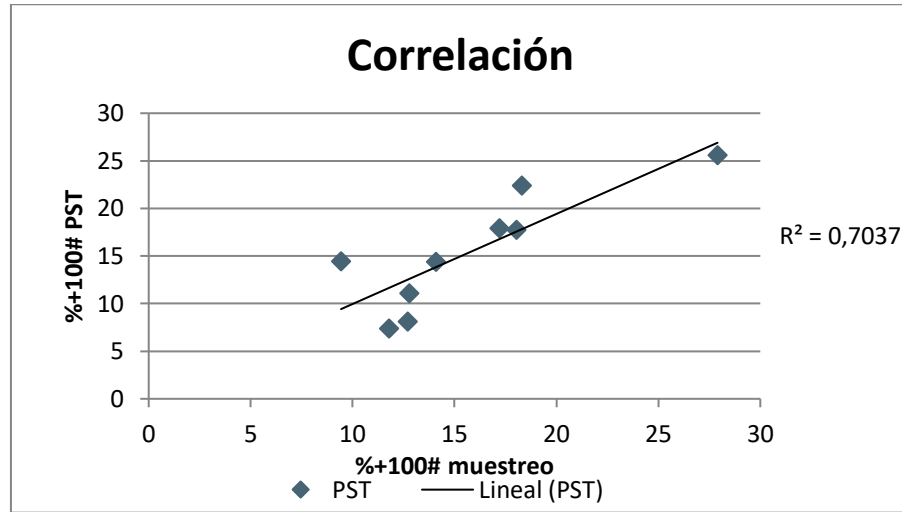


Figura I: Grafica de correlación muestreo y PST

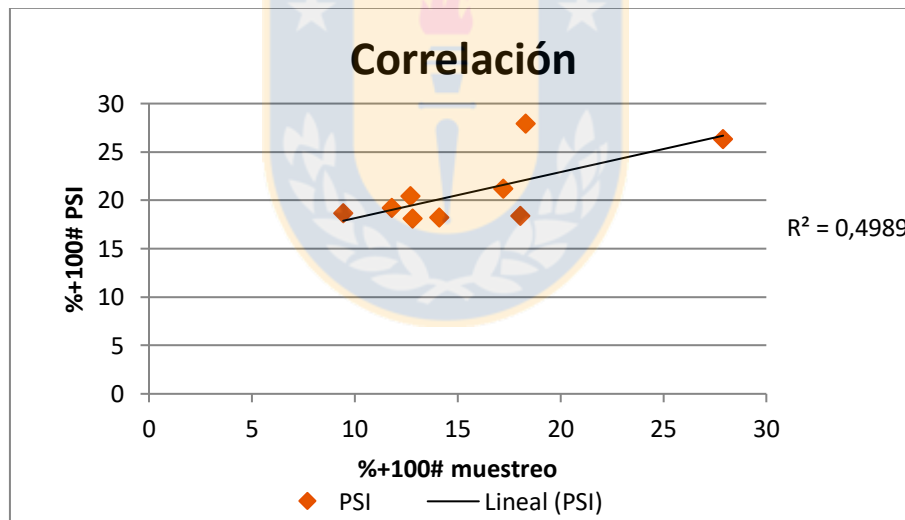


Figura II: Grafica de correlación muestreo y PSI

Para la señal individual de cada hidrociclón de PST, se obtuvo lo siguiente.

Tabla I Cuadro resumen datos de muestreo y señal PST de hidrociclón 2

Fecha	Hora	N°Ciclón	%+100# PST	%+100# muestreo	error abs	error rel.
3/19/2016	17:28	2	21.39	24.62	3.2	13.1%
4/1/2016	12:10	2	6.09	8.17	2.1	25.4%
4/2/2016	10:37	2	11.35	11.97	0.6	5.2%
4/2/2016	18:31	2	8.40	8.24	0.2	2.0%
4/4/2016	10:00	2	16.62	13.34	3.3	24.6%
4/4/2016	17:44	2	13.71	11.94	1.8	14.8%
4/7/2016	11:20	2	24.23	19.02	5.2	27.4%
4/7/2016	17:45	2	20.64	16.15	4.5	27.8%
4/16/2016	17:36	2	11.28	12.62	1.3	10.6%
5/17/2016	17:12	2	23.36	19.83	3.5	17.8%

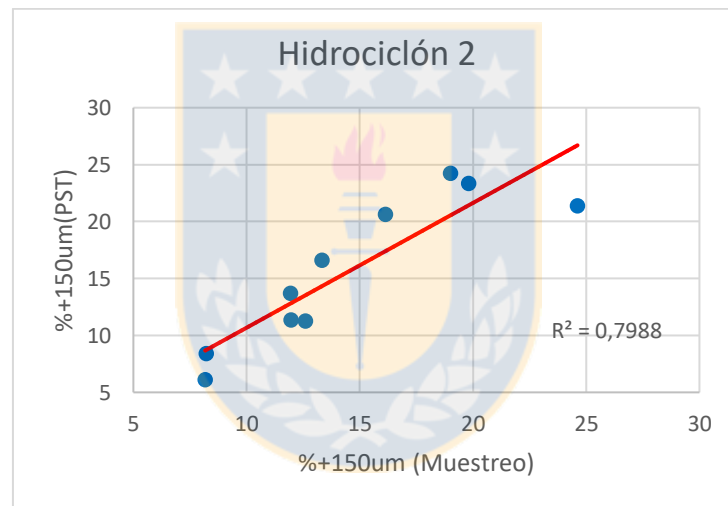


Figura III Gráfico de correlación muestreo y dato PST de hidrociclón 2

Tabla II Cuadro resumen datos de muestreo y señal PST de hidrociclón 4

Fecha	Hora	N°Ciclón	%+100# PST	%+100# muestreo	error abs	error rel.
3/18/2016	11:18	4	14.34	17.44	3.1	17.7%
3/19/2016	17:30	4	23.97	23.66	0.3	1.3%
4/2/2016	18:33	4	11.40	8.01	3.4	42.4%
4/4/2016	10:01	4	14.28	12.95	1.3	10.3%
4/4/2016	17:45	4	13.57	11.35	2.2	19.5%
4/7/2016	11:22	4	25.57	22.28	3.3	14.8%
4/7/2016	17:47	4	20.71	15.59	5.1	32.8%
4/8/2016	18:04	4	17.55	12.43	5.1	41.2%
4/9/2016	9:42	4	25.69	20.41	5.3	25.9%
4/15/2016	18:58	4	15.36	15.70	0.3	2.2%

4/16/2016	10:47	4	12.73	11.10	1.6	14.6%
4/16/2016	17:37	4	15.53	14.65	0.9	6.0%
5/18/2016	11:38	4	25.62	24.14	1.5	6.1%
6/10/2016	12:11	4	19.26	12.27	7.0	56.9%
6/10/2016	17:46	4	18.44	12.80	5.6	44.0%
6/15/2016	18:46	4	16.58	10.54	6.0	57.2%
6/16/2016	19:05	4	18.79	21.53	2.7	12.8%



Figura IV Gráfico de correlación muestreo y dato PST de hidrociclón 4

Tabla III Cuadro resumen datos de muestreo y señal PST de hidrociclón 7

Fecha	Hora	NºCiclon	%+100# PST	%+100# muestreo	error abs	error rel.
3/19/2016	17:31	7	22.31	21.32	1.0	4.7%
4/1/2016	12:12	7	8.62	3.84	4.8	124.5%
4/2/2016	10:39	7	12.14	10.01	2.1	21.3%
4/2/2016	18:34	7	9.44	6.45	3.0	46.4%
4/7/2016	11:24	7	25.05	22.54	2.5	11.2%
4/7/2016	17:48	7	21.55	15.65	5.9	37.7%
4/8/2016	18:05	7	16.57	11.73	4.8	41.2%
4/9/2016	9:48	7	24.20	15.37	8.8	57.5%
5/17/2016	17:14	7	24.60	19.29	5.3	27.6%
5/18/2016	11:39	7	23.26	17.69	5.6	31.5%
5/20/2016	16:43	7	18.53	14.65	3.9	26.5%
6/16/2016	19:06	7	19.14	15.98	3.2	19.8%
6/17/2016	17:12	7	20.13	17.14	3.0	17.4%

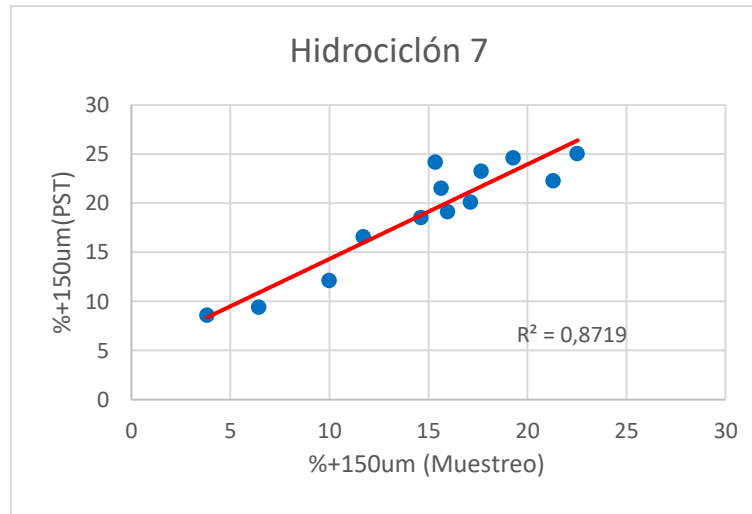


Figura V Gráfico correlación muestreo y dato PST de hidrociclón 7

Tabla IV Cuadro resumen datos de muestreo y señal PST de hidrociclón 9

Fecha	Hora	NºCiclon	%+100# PST	%+100# muestreo	error abs	error rel.
3/18/2016	11:19	9	11.95	18.14	6.2	34.1%
3/19/2016	17:32	9	19.62	21.31	1.7	7.9%
4/4/2016	17:46	9	12.21	12.16	0.0	0.4%
4/7/2016	11:25	9	27.36	26.17	1.2	4.6%
4/7/2016	17:49	9	18.19	16.87	1.3	7.8%
4/8/2016	18:06	9	14.15	10.60	3.6	33.6%
4/9/2016	9:49	9	20.48	16.18	4.3	26.6%
4/15/2016	18:59	9	16.09	15.88	0.2	1.3%
4/16/2016	10:48	9	11.21	11.26	0.1	0.5%
4/16/2016	17:38	9	8.61	11.01	2.4	21.8%
4/22/2016	16:36	9	13.27	10.97	2.3	20.9%
4/23/2016	11:21	9	14.47	13.48	1.0	7.3%
5/18/2016	11:41	9	23.25	20.47	2.8	13.6%
6/9/2016	10:21	9	16.91	11.93	5.0	41.8%
6/10/2016	12:12	9	17.15	13.46	3.7	27.4%
6/10/2016	17:47	9	18.61	13.19	5.4	41.0%

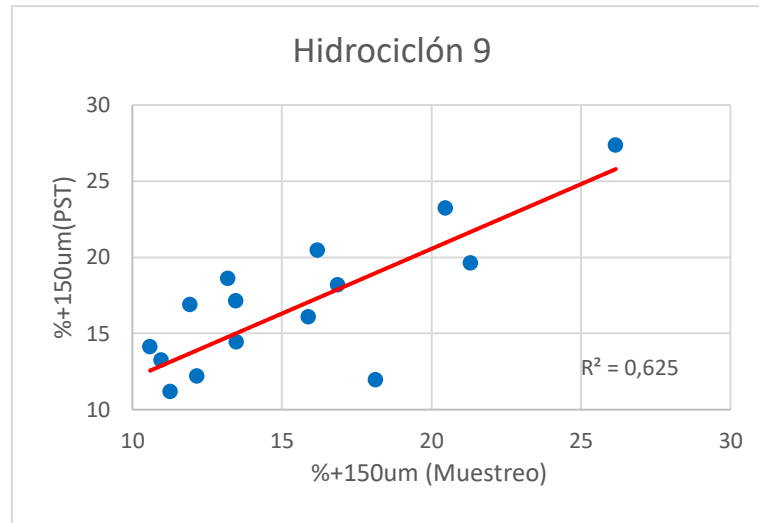


Figura VI Gráfico de correlación muestreo y dato PST de hidrociclón 9

Tabla V Cuadro resumen datos de muestreo y señal PST de hidrociclón 13

Fecha	Hora	NºCiclon	%+100# PST	%+100# muestreo	error abs	error rel.
3/18/2016	11:21	13	17.21	17.93	0.7	4.1%
4/1/2016	12:13	13	9.64	7.26	2.4	32.8%
4/2/2016	10:41	13	12.48	10.15	2.3	23.0%
4/2/2016	18:36	13	14.63	7.75	6.9	88.8%
4/4/2016	10:03	13	18.48	9.36	9.1	97.4%
4/7/2016	11:27	13	28.31	26.74	1.6	5.9%
4/7/2016	17:50	13	22.33	15.97	6.4	39.8%
4/8/2016	18:07	13	18.10	10.96	7.1	65.2%
4/9/2016	9:50	13	26.59	18.88	7.7	40.8%
6/9/2016	10:25	13	18.24	14.31	3.9	27.4%
6/10/2016	17:50	13	19.24	14.72	4.5	30.7%
6/15/2016	18:47	13	14.02	9.79	4.2	43.1%

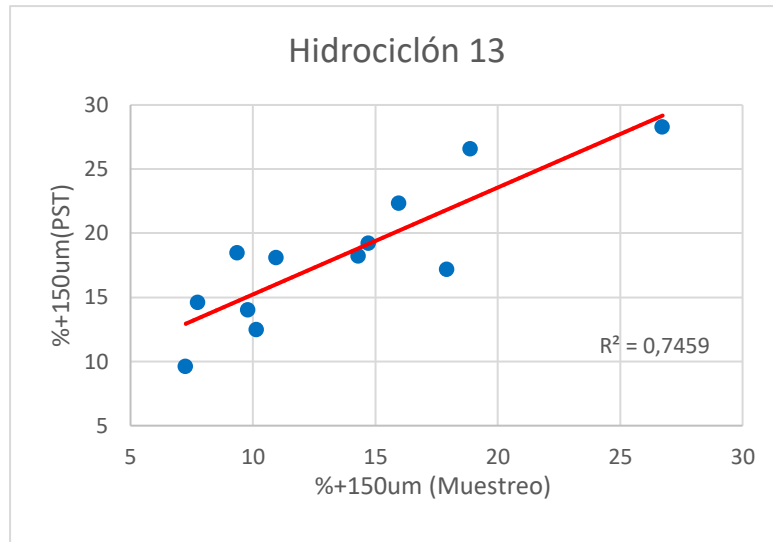


Figura VII Gráfico de correlación muestreo y dato PST de hidrociclón 13

Tabla VI Cuadro resumen datos de muestreo y señal PST de hidrociclón 16

Fecha	Hora	NºCiclon	%+100# PST	%+100# muestreo	error abs	error rel.
3/17/2016	17:58	16	16.55	18.97	2.4	12.7%
4/1/2016	12:14	16	6.16	4.38	1.8	40.6%
4/7/2016	11:28	16	25.48	22.30	3.2	14.3%
4/7/2016	17:51	16	17.25	17.10	0.1	0.9%
4/8/2016	18:08	16	13.79	12.63	1.2	9.2%
4/9/2016	9:51	16	20.09	16.24	3.9	23.7%
4/16/2016	17:41	16	11.54	11.22	0.3	2.9%
5/20/2016	16:46	16	14.57	16.82	2.3	13.4%
6/15/2016	18:48	16	10.46	10.37	0.1	0.8%
6/16/2016	19:08	16	12.72	18.61	5.9	31.7%

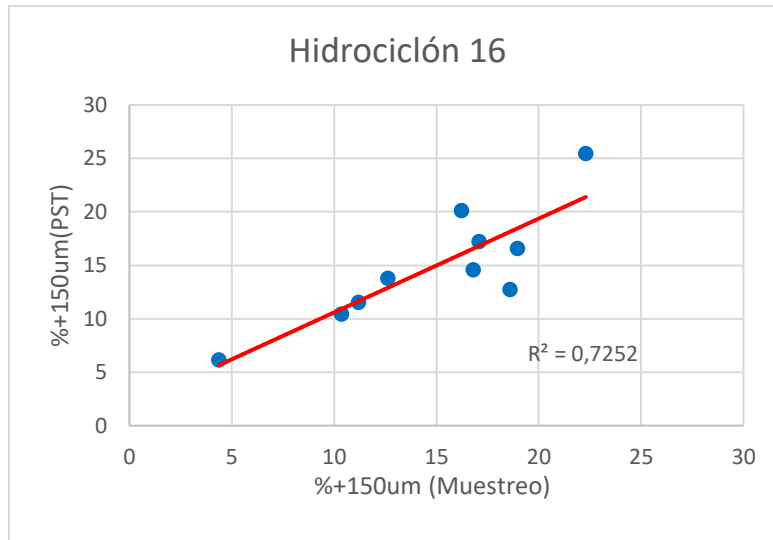


Figura VIII Gráfico de correlación muestreo y dato PST de hidrociclón 16

Tabla VII Cuadro resumen datos de muestreo y señal PST de hidrociclón 18

Fecha	Hora	NºCiclon	%+100# PST	%+100# muestreo	error abs	error rel.
4/1/2016	12:15	18	9.52	7.12	2.4	33.7%
4/2/2016	10:43	18	12.35	7.85	4.5	57.3%
4/8/2016	18:09	18	17.87	14.14	3.7	26.4%
4/9/2016	9:52	18	24.61	18.98	5.6	29.7%
4/15/2016	19:02	18	19.10	14.45	4.6	32.2%
5/20/2016	16:47	18	18.80	17.12	1.7	9.8%

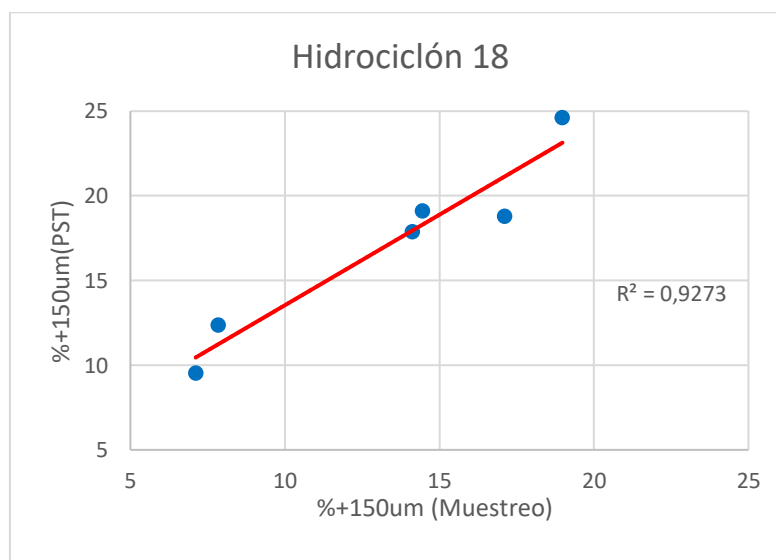


Figura IX Gráfico de correlación muestreo y dato PST de hidrociclón 18.