

Detección en Línea del Rendimiento Anormal del Ciclón Usando Tecnología Particle Size Tracking (PST)

Jaime Sepulveda¹, Robert Maron^{2*}, Mauricio Estrada³, Rodrigo Bruna³

1. *J-Consultants Ltd., Chile*
2. *CiDRA Minerals Processing Inc, USA*
3. *SGS, Chile*

RESUMEN

La reciente aparición de mediciones de tamaño de partículas, confiables y en tiempo real, en hidrociclones individuales, ha superado una larga y desatendida necesidad en el procesamiento de minerales. Es bien sabido que un adecuado control del tamaño de partícula final producido por el circuito de molienda-clasificación, es una medición crítica. Su control inadecuado puede acarrear muchos efectos adversos: ej., menor producción, pobre rendimiento de flotación, y en última instancia menor producción neta de metal.

A fin obtener todos los beneficios de la tecnología CiDRA CYCLONetrac Particle Size Tracking (PST) (Seguimiento del Tamaño de Partícula) disponible comercialmente, las mediciones de tamaño de partícula de cada flujo de sobre flujo de ciclón individual deben incorporarse en la estrategia de control experto correspondiente, para aprovechar la capacidad única del PST de detectar en línea rendimientos anormales del ciclón (p. ej., un tamaño de producto excesivamente grueso que puede conducir a obstrucción o presentar flujo tipo cordón) de cualquier ciclón específico en cualquier momento durante la operación de la línea. En este contexto, PST permite la implementación de protocolos selectivos de apertura / cierre para cada uno de los ciclones del conjunto clasificador completo.

En este artículo, los autores proponen ejemplos de estrategias avanzadas de control de procesos que incorporan las señales de tamaño de partícula generadas desde cada hidrociclón, que podrían aplicarse a una línea típica de molienda SAG / Bola. Se espera que la implementación adecuada de la estrategia de control propuesta ofrezca una variabilidad significativamente menor del tamaño del producto final alimentado a la flotación aguas abajo y, por lo tanto, permita un acercamiento más cercano a las barreras del proceso aguas abajo. Este es un objetivo particularmente importante dada la creciente tendencia hacia la recuperación de partículas gruesas que requiere un molido más grueso, pero manteniéndose dentro de los límites existentes del proceso y el equipo.

***Autor correspondiente:** CiDRA Minerals Processing, Inc., Managing Director, Latin America, 55 Barnes Park North, Wallingford, CT, USA 06492. Email: rmaron@cidra.com

Traducido del inglés original al español por Victor Gutierrez B. victor@gutierrezb.com

INTRODUCCION

Los muchos desafíos que enfrenta la industria minera, tales como escasez de agua, creciente costo de la energía, disminución de la leyes y minerales más duros, están impulsando la innovación en muchas áreas, una de las cuales es el engrosamiento del tamaño del producto final y la recuperación de las partículas más gruesas resultantes. Una molienda más gruesa puede aumentar el rendimiento y disminuir el consumo de agua y de energía específica; sin embargo, requiere de cambios en la operación del circuito de molienda.

A medida que aumenta el rendimiento y nos acercamos a los límites de proceso existentes, se vuelve cada vez más importante poder medir y controlar continuamente el tamaño del producto final para evitar trastornos del proceso y pérdidas en la recuperación de flotación.

Para evaluar los beneficios alcanzables de la molienda más gruesa, los autores desarrollaron una metodología utilizando datos históricos de planta en términos del aumento resultante en la Producción Neta de Metal (Maron et. al 2017) y también han explorado algunos de los desafíos y tecnologías habilitadoras relacionadas con la molienda más gruesa (Maron et.al.2019). Este trabajo explora en profundidad el desafío de operar ciclones más cerca de sus límites operativos para producir un mayor rendimiento a un tamaño de producto final más grueso.

Los clasificadores de hidrociclón, utilizados normalmente en operaciones de molienda en circuito cerrado con molinos de bolas convencionales, juegan un papel crítico en la determinación del tamaño del producto final. Los hidrociclones se configuran típicamente en grupos de hasta una docena o más, alimentados radialmente desde un distribuidor central de slurry. Cuando todos los ciclones operativos están clasificando correctamente, sus flujos de sobre flujo (el producto molido final típicamente alimentado a la etapa de flotación aguas abajo) tienen caudales aproximadamente iguales y distribuciones de tamaño de partículas (PSD) idealmente idénticas. Sin embargo, cuando un ciclón del grupo comienza a funcionar de manera anormal, como clasificar mucho más grueso que los demás debido a la obstrucción parcial / total o taponamiento de su salida del ápex inferior, su caudal de sobre flujo aumenta significativamente y su PSD se vuelve mucho más grueso en comparación con los otros ciclones que operan normalmente.

Este engrosamiento de la corriente de sobre flujo PSD del ciclón con ápex taponado ocurre porque cuando el ápex se acerca a la condición completamente taponado, el flujo a través del ápex taponado disminuye a cero, y la corriente de sobre flujo se vuelve similar a la corriente de alimentación. Por lo tanto, el PSD de sobre flujo debe necesariamente aproximarse al del PSD del flujo de alimentación. Esto da como resultado que las partículas de carga circulante, aún demasiado gruesas porque todavía no han sido molidas hasta el objetivo P80 deseado, se dirijan al sobre flujo, lo que resulta en una disminución en la recuperación

La Figura 1 ilustra un ejemplo real de escala industrial en el que, en algún momento, el Ciclón 9 entró en una condición de ápex parcial o totalmente taponado, produciendo una corriente de sobre flujo significativamente más gruesa que la de los otros ciclones, que luego comenzaron a producir un producto de sobre flujo algo más fino. Aunque no se muestra en el gráfico, la PSD de la corriente de sobre flujo combinada de todo el grupo de ciclones probablemente se volvió un poco más gruesa, como se mostrará más adelante a través de la simulación. Por lo tanto, si solo se controlase la corriente de desbordamiento combinada, y no cada ciclón individualmente, entonces esto podría malinterpretarse como causado por un aumento en la dureza del mineral de alimentación. Por lo tanto, la acción probable de los operadores o del sistema de control habría sido simplemente

reducir el tonelaje fresco a la línea de chancado, con todas las pérdidas de rendimiento del circuito consecuentes.

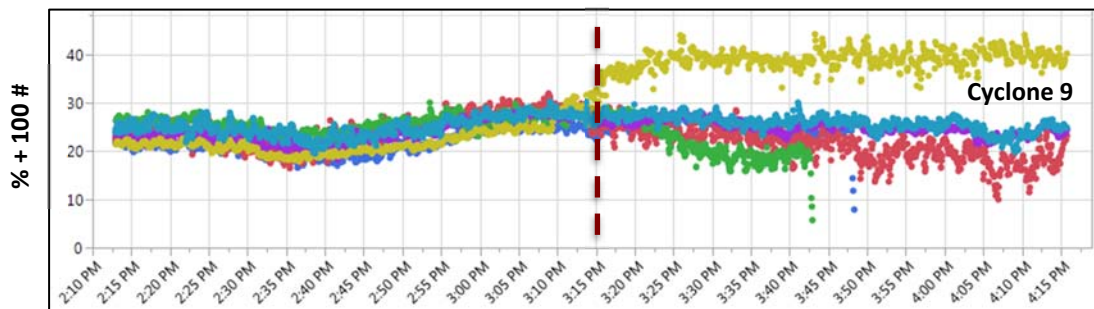


Figura 1. Múltiples señales de tamaño de partícula PST (% + 100#) en corrientes de sobre flujo de hidrociclones operando normalmente con sobre flujos PSD similares, cuando súbitamente el ciclón 9 se hace muy grueso afectando los demás ciclones en el mismo grupo.

Es sabido que estas contingencias, en su mayor parte desapercibidas, suceden con considerable frecuencia en todas las operaciones de molienda/clasificación. En consecuencia, existe la necesidad de encontrar e implementar soluciones de control de procesos efectivas para la rápida detección y corrección de ciclones operando anormalmente, disponiendo remotamente de su reemplazo inmediato por otro ciclón inactivo del grupo, hasta que se efectúe el mantenimiento adecuado del ciclón anormal. Una novedosa tecnología basada en el impacto acústico, desarrollada por CiDRA Minerals Processing, permite el seguimiento en tiempo real del tamaño de la partícula en la corriente de sobre flujo para cada ciclón en el grupo (ver Figura 2). Conocido como CYCLONETrac Particle Size Tracking (PST), está siendo utilizado en muchas operaciones de gran envergadura alrededor del mundo, entregando rendimientos y recuperaciones crecientes con cerca de un 100% de disponibilidad y mantenimiento mínimo. Supera las limitaciones de las tecnologías 'cerca de la línea' relacionadas con importantes dificultades operacionales asociadas al muestreo y transporte del slurry a los instrumentos de medición remotos.

Cuando se incorpora adecuadamente a una estrategia de Control de Proceso Experto, la medición confiable del tamaño de partícula en tiempo real de PST en cada flujo de desbordamiento de hidrociclón permite a los operadores aumentar el tamaño del producto y acercarse con mayor confianza a los límites del proceso aguas abajo, siempre existentes e inevitables. Mas aún, como se propone en el presente artículo, la tecnología PST permite la detección y corrección inmediata de ciclones con un rendimiento anormal al disponer su reemplazo inmediato por otros ciclones inactivos en el grupo, hasta que se realice el mantenimiento adecuado del ciclón anormal.

IMEDICION POR IMPACTO EN TIEMPO REAL DEL TAMAÑO DE PARTICULA EN UN HIDROCICLON

La implementación de la tecnología PST se basa en una sonda insertada en la corriente de slurry de sobre flujo a través de un orificio de dos pulgadas (50 mm) en la tubería de sobre flujo. Las

partículas en la corriente de slurry impactan la superficie de la sonda generando ondas de tensión de desplazamiento dentro de ella.

Un sensor convierte estas ondas de tensión en una señal eléctrica, y las técnicas de procesamiento de señales patentadas convierten estas señales en una medida de tamaño de partícula que se emite cada cuatro segundos. El sensor está en contacto permanente con numerosas partículas en la corriente de slurry obteniendo, por ende, información de las partículas varias órdenes de magnitud superior a las tecnologías tradicionales basadas en muestreo. Además, debido a la ubicación del sensor aguas abajo del hidrociclón y la presencia de un núcleo de aire en ese punto, el sensor no produce ningún cambio en la contrapresión vista por el hidrociclón y por lo tanto no afecta el rendimiento del hidrociclón. Debido al desgaste abrasivo causado por el impacto directo del slurry, la sonda es un elemento de desgaste. La vida útil de la sonda está relacionada con la dureza y tamaño de la partícula la cual es obviamente más fina en la corriente de sobre flujo comparada con la corriente de alimentación. Actualmente el software proporciona hasta cinco tamaños de malla de referencia para ser incorporadas en una estrategia de control de procesos. Una vez instalado en la batería, el sistema PST es calibrado empíricamente en un rango de tamaños de partículas determinado por el cliente. La detección de ciclones anormales, como se analiza en este artículo, puede involucrar mediciones PST por encima del tamaño máximo del rango de calibración, por lo que la detección de eventos anormales mejora a medida que el tamaño de calibración máximo aumenta. La Figura 2 muestra los componentes principales del sistema PST.

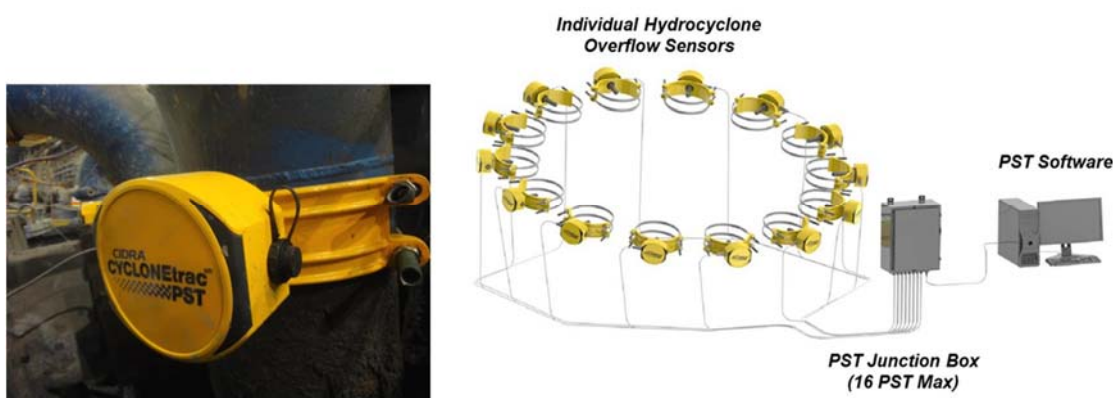


Figura 2 Cabezal de sensor PST montado (izquierda), y sistema con interconexiones (derecha)

SIMULACION DE CICLONES TAPONADOS

Para evaluar el impacto de un ciclón anormal en el rendimiento general de la línea de molienda, se desarrolló un típico Modelo de Equilibrio de Población (PBM), simulador tamaño por tamaño circuito molino de bolas / clasificación, utilizando el software J-Tools basado en EXCEL (Figura 3), donde el ciclón anormal está marcado como '12' y los ciclones normales en el mismo grupo están etiquetados '11'

El supuesto clave subyacente para el desarrollo del simulador es que, en un distribuidor de grupo de hidrociclones adecuadamente diseñado, la presión de alimentación a cada ciclón (incluyendo los ciclones taponados), sería el mismo para cada ciclón individual como asimismo la densidad (% de

sólidos) del slurry alimentado a cada uno de ellos. Bajo estos supuestos, la tasa de flujo volumétrico resultante (m³/h) a cada ciclón estará en proporción directa a la suma de las áreas de descarga de sus ápex y vórtice (ej., $\pi DU^2/4$ y $\pi DO^2/4$, respectivamente); en consecuencia, permaneciendo las demás dimensiones iguales, el radio de alimentación volumétrica relativa (Φ) entre un ciclón operando normalmente (Q_N) y un ciclón parcial/totalmente taponado (Q_P) vendría dado por:

$$\phi = Q_P/Q_N = (DU_P^2 + DO_P^2)/(DU_N^2 + DO_N^2) \quad (1)$$

donde el subíndice N indica un ciclón operando normalmente y P un ciclón con una descarga de sobre flujo parcial/totalmente taponada (ej., DU_P aproximándose a cero).

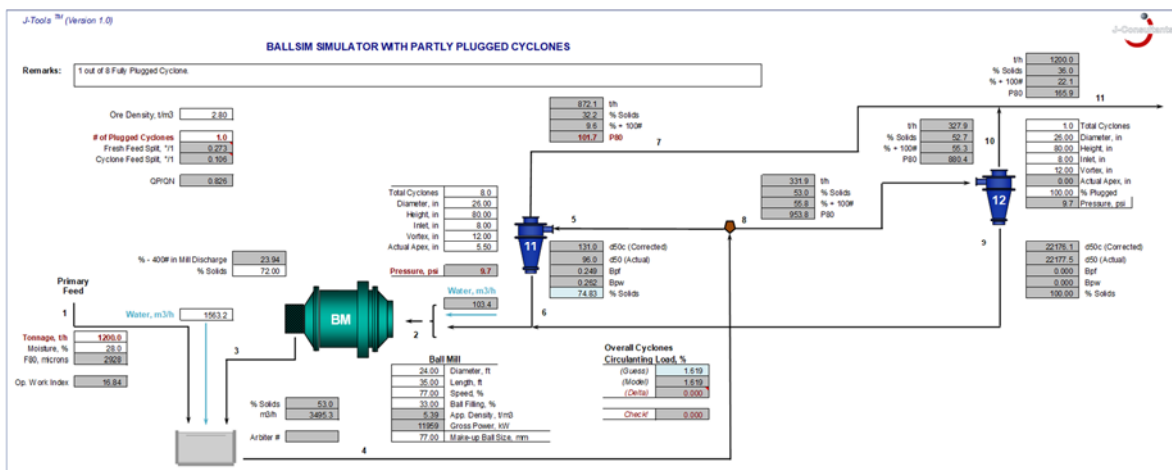


Figura 3 simulación J-Tools de un hidrociclón parcial/totalmente taponado

Considerando que todos los ciclones poseen las mismas dimensiones características ($DO_P \equiv DO_N$, en particular), el radio de alimentación volumétrica (ϕ) entre un ciclón operando normalmente (Q_N) y un ciclón parcial o totalmente taponado (Q_P) vendría dado por:

$$\phi = Q_P/Q_N = [1 + (DU_P/DO_N)^2]/[1 + (DU_N/DO_N)^2] \quad (2)$$

Para que se cumpla el balance de masa alrededor de los clasificadores, la tasa de flujo de alimentación total al grupo completo de ciclones, (Q), viene dado por:

$$Q = N_P Q_P + (N - N_P) Q_N \quad (3)$$

donde N es el número total de ciclones en el grupo, Resolviendo para la división de flujo total ($N_P Q_P/Q$) absorbida por los ciclones taponados:

$$N_P Q_P/Q = 1/(1 + (N/N_P - 1) / \phi) \quad \text{para } N_P > 0 \quad (4)$$

A partir de la Ecuación 4, es posible, entonces, estimar la proporción de la alimentación total del grupo de ciclones en los ciclones taponados ($N_P Q_P/Q$). Es conveniente expresar el grado de taponado del ápex (% taponado) en términos de su dimensión de ápex parcialmente taponado en comparación con la dimensión del ápex operando normalmente (DU_N):

$$\% \text{ Taponado} = [1 - (DU_P/DU_N)^2] * 100 \quad (5)$$

equivalente a:

$$DU_P = DU_N [1 - (\% \text{ Taponado}/100)^{0.5}] \quad (6)$$

Es posible crear diferentes grados de comportamiento anormal para el ciclón '12' variando su área de ápex desde su valor no restringido nominal (0% Taponado) a aproximadamente cero (100% Taponado), desviando así una proporción creciente de su slurry de alimentación a la corriente de sobre flujo engrosado.

Como se muestra en la Figura 3, la tasa de flujo de alimentación total del ciclón (corriente #4) está dividida en un nodo hipotético (pentágono naranja) con una parte (corriente #5) dirigida a los ciclones que operan normalmente, y la restante (corriente #8) dirigida al ciclón '12'. La corriente de sobre flujo del ciclón anormal (corriente #10) se une con la corriente de sobre flujo proveniente de los ciclones normales (corriente #7) para formar el sobre flujo final consolidado (corriente #11) que va a flotación. El sub-flujo del ciclón anormal (corriente #9) se une con la corriente de sub-flujo de los ciclones normales (corriente #6) y retorna al molino de bolas. El usuario puede especificar entonces el número deseado de ciclones taponados, normalmente un ciclón a la vez.

La Figura 4 resume los resultados proyectados para un ejemplo de un grupo de 8 ciclones operando a cinco condiciones de taponado diferentes que van de los 8 ciclones normales a 1 de 8 parcialmente taponado en el rango de 25% a 100%.

	% Plugged					
	0	25	50	75	100	
Fresh Tonnage Split, %/1						
Abnormal Cyclones	0.125	0.180	0.199	0.222	0.273	↑
Normal Cyclones	0.875	0.820	0.801	0.778	0.727	↓
Cyclone Feed Flowrate Split, %/1						
Abnormal Cyclones	0.125	0.111	0.107	0.106	0.106	↓
Normal Cyclones	0.875	0.889	0.893	0.894	0.894	↑
Cyclone Feed Flowrate, m³/h/Cyclone						
Abnormal Cyclones	522	443	428	420	413	↓
Normal Cyclones	522	509	508	506	499	↓
Operating Conditions						
Circulating Load, %/1	2.06	1.88	1.83	1.77	1.62	↓
Op. Work Index, kWh/t	15.28	15.44	15.63	15.89	16.84	↑
Normal Cyclone O'Flow						
t/h	1050	984	961	933	872	↓
Cyclone Pressure, psi	10.35	9.97	9.94	9.88	9.70	↓
P80	143	134	126	118	102	↓
% +100#	18.40	16.48	14.91	13.18	9.64	↓
Plugged Cyclone O'Flow						
t/h	150	216	239	267	328	↑
Cyclone Pressure, psi	10.35	9.97	9.94	9.88	9.70	↓
P80	143	195	246	322	880	↑
% +100#	18.40	30.20	38.28	45.11	55.27	↑
Combined Cyclone O'Flow						
t/h	1200	1200	1200	1200	1200	↑
P80	143	145	148	152	166	↑
% +100#	18.40	18.95	19.57	20.27	22.11	↑
% Recovery						
	90.22	90.03	89.18	87.48	82.82	↓

Figure 4. Ejemplo de simulaciones J-Tools para el caso de un grupo de 8 ciclones donde 1 de los ciclones está sujeto a varios grados de taponado del ápex de 0 a 100%.

El primer impacto significativo de un ciclón anormal puede observarse en el cambio en la división de tonelaje fresco, es decir la relación entre tonelaje fresco que sale a través del sobre flujo del ciclón anormal y el tonelaje fresco total que es alimentado al circuito. Para el caso de todos los 8 ciclones operando normalmente, la división es de 0.125 tal como se esperaría, es decir el tonelaje se divide en forma uniforme entre todos los ciclones. Sin embargo, la división aumenta a 0.273 a medida que el grado de taponado aumenta de 0% a 100%; es decir, una proporción cada vez mayor del tonelaje de alimentación fresco se entrega como un producto mucho más grueso a través del sobre flujo del ciclón completamente taponado. El sobre flujo del ciclón taponado entrega incluso más tonelaje que la fracción de 0.104 (0.894 / 7) entregada por cualquiera de los ciclones individuales que operan normalmente.

Otro efecto significativo de taponado progresivo es el aumento en el grosor del sobre flujo proveniente del ciclón anormal medido por el P80 y la medición relacionada de %+100#. El P80 muestra un dramático aumento desde el normal 143 μm a un máximo de 850 μm cuando el ciclón esta 100% taponado. Al mismo tiempo, el sobre flujo de los ciclones normales se hace más fino a 102 μm , en línea con la respuesta real observada en el ejemplo de planta mostrado en la Figura 1. Por último, el efecto de combinar estos flujos muy gruesos y otros levemente más finos en el sobre flujo combinado del ciclón, es aumentar el P80 de este flujo combinado desde el normal 143 micrón a un máximo de 166 micrón. Este aumento en P80 puede no parecer significativo. Sin embargo, si es la única medición disponible, como puede ser en la mayoría de las plantas, entonces puede que ni siquiera sea considerada digna de acción correctiva. O, si se toma acción, podría ser la acción equivocada con el operador o sistema de control reduciendo la alimentación fresca debido al ligero engrosamiento no deseado del P80 general detectado, posiblemente atribuido erróneamente a la súbita introducción de mineral más duro. Mientras tanto, el verdadero problema es un ciclón taponado que no ha sido detectado.

IMPACTO SOBRE LA RECUPERACION DE FLOTACION

El muy significativo impacto sobre la recuperación de flotación aguas abajo de metal valioso (digamos cobre), consecuencia de un ciclón operando anormalmente puede ser también analizado por medio del simulador J-Tools desarrollado. Una descripción conveniente, tamaño por tamaño, de la ecuación del proceso de recuperación de flotación es proporcionada por la relativamente simple expresión:

$$R_i = R_{\max} [\exp (-0.693 (d_i^* / d_{\text{crit}}^{\text{C}})^{m_{\text{C}}} - \exp (-0.693 (d_i^* / d_{\text{crit}}^{\text{F}})^{m_{\text{F}}})] \quad (7)$$

donde:

- R_i = Recuperación promedio para partículas en la fracción de tamaño d_i a d_{i+1}
- R_{\max} = Máxima recuperación alcanzable para cualquier tamaño de partícula en la corriente de alimentación de flotación
- d_i = Tamaño de partícula promedio para la fracción de tamaño d_i a d_{i+1}
- $d_{\text{crit}}^{\text{C}}$ = Tamaño crítico por encima del cual las partículas más gruesas comienzan a flotar a recuperaciones decrecientes
- $d_{\text{crit}}^{\text{F}}$ = Tamaño crítico por debajo del cual las partículas más finas comienzan a flotar a a recuperaciones decrecientes
- $m_{\text{C}}, m_{\text{F}}$ = Factores de forma (los valores más altos reflejan una mayor sensibilidad de recuperación cambios en el tamaño de partícula)

La Figura 5 presenta un ejemplo de este tipo de representación para parámetros característicos $R_{max} = 96\%$, $d_{crit}^C = 250 \mu\text{m}$, $d_{crit}^F = 11 \mu\text{m}$ y parámetros de forma $m_c = 2.5$ y $m_f = 4.0$, que muestra un significativo descenso en la recuperación de partículas más gruesas que $250 \mu\text{m}$ y un leve descenso para partículas más finas que $11 \mu\text{m}$, como es característico en aplicaciones de flotación convencionales.

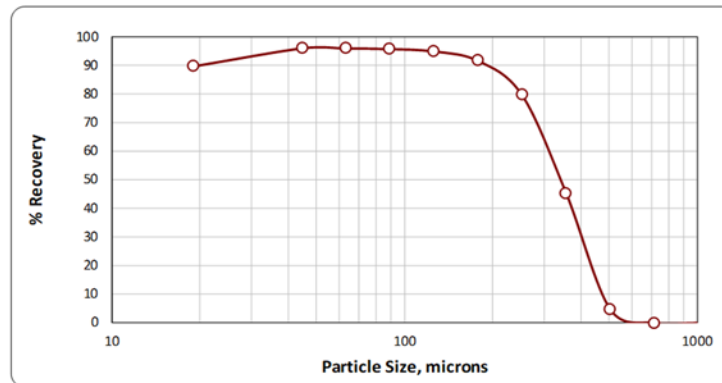


Figure 5 Example of size-by-size recovery

La combinación de los valores de recuperación, tamaño por tamaño, con el PSD del sobre flujo total del ciclón, tamaño por tamaño, predicho por el simulador dio lugar a los valores de recuperación total de valiosos ya presentados en la parte inferior de la Figura 4. El verdadero efecto costoso de un ciclón completamente taponado se revela en la disminución de la recuperación desde un valor normal de 90.22% a un valor muy inferior de 82.82%, cuando el ciclón anormal esta taponado en un 100. La razón está claramente ilustrada en la Figura 6 donde se muestran, junto con la curva de recuperación de flotación, el PSD del sobre flujo para los ciclones normales y del ciclón completamente taponado. Cuando todos los ciclones están operando normalmente, el 95% de las partículas en el sobre flujo son más finas que el tamaño de flotación crítica, $250 \mu\text{m}$ (el tamaño sobre el cual la recuperación cae dramáticamente). Cuando un ciclón se tapona completamente, un levemente mayor 98% de las partículas en el sobre flujo de los ciclones no obstruidos son más finos que $250 \mu\text{m}$ y dentro del rango de tamaño flotable, pero ahora representan solo el 73% del total de tonelaje que se está moliendo. El restante 27% del tonelaje total es descargado del ciclón obstruido donde solo el 59% de sus partículas son más finas que $250 \mu\text{m}$ y por ende susceptibles de flotar. En resumen, si uno de ocho ciclones está taponado, su tonelaje fresco procesado ha aumentado 2X, de 12.5% a 27.3%, pero la cantidad de material flotable descargado ha disminuido de 95 a 59%. El efecto neto es una disminución de la recuperación total de aproximadamente un 7.4%.

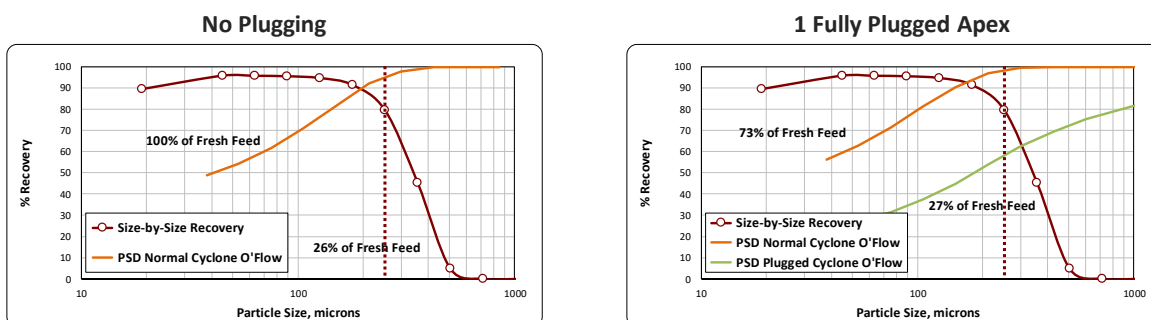


Figura 6. Curva de recuperación de flotación típica y curvas de distribución de tamaño de partícula de sobre flujo para dos casos: no hay ciclones taponados con el 100% de alimentación fresca clasificada correctamente (izquierda); y un ciclón completamente taponado con el 27% de la alimentación fresca no clasificada y el 73% restante siendo ligeramente más fino (derecha).

ALGORITMO DE DETECCIÓN DE VALORES ATÍPICOS

Las señales PST de los ciclones operando normalmente en una batería, que operan en una condición de estado estable durante un período de tiempo definido, como las que se muestran en la mitad izquierda de la Figura 1 anterior, exhibirán típicamente fluctuaciones aleatorias naturales (Y_i), normalmente distribuidas alrededor de un determinado valor medio (Y_{AVE}) con una desviación estándar característica (σ). Cuando un ciclón se tapona, parcial o totalmente, su señal PST difiere significativamente de los otros y puede considerarse un “valor atípico” estadístico. La Prueba de Grubbs (Grubbs, 1950; Grubbs, 1969) es un criterio estadístico bien conocido para la detección de “valores atípicos” o “fuera de rango” con respecto a series de otros valores comparables en una serie de tiempo dada y proponemos adoptarlo para el análisis en línea de señales PST.

Prueba de Detección de Valores Atípicos de Grubbs

Para el análisis de datos estadísticos, la Prueba de Grubbs, también conocida como la prueba residual normalizada máxima o la prueba de desviación estudentizada extrema, es un criterio estadístico utilizado para detectar valores atípicos en un conjunto de datos univariantes que se supone provienen de una población normalmente distribuida. La estadística de la prueba de Grubbs se define como:

$$G = (Y_{MAX} - Y_{AVE}) / \sigma \quad (\text{unilateral}) \quad (8)$$

Donde Y_{MAX} es el mayor valor de un conjunto de N observaciones aleatorias ($Y_i, i = 1, N$), Y_{AVE} es el promedio de todos esos valores y σ es su desviación estándar. De este modo, G denota la mayor desviación estándar respecto de la media en unidades de σ .

En una prueba unilateral, Y_{MAX} se rechazará como valor atípico a un nivel de significancia α , si

$$G = (Y_{MAX} - Y_{AVE}) / \sigma > (N - 1) t^2 / N^{0.5} / (N - 2 + t^2)^{0.5} \quad (9)$$

con t indicando el valor crítico superior de la distribución-t con $N-2$ grados de libertad y un nivel de significancia de α/N .

Los siguientes cuatro Casos proporcionan ejemplos de la aplicación de la Prueba de Grubbs al procesamiento e interpretación de señales PST de un grupo convencional de 8 ciclones, basado en datos generados aleatoriamente vía una técnica de simulación de Monte Carlo.

Caso 1 – Detección de Ciclones Obstruidos

Como se muestra en la Figura 7, después de 10 minutos de funcionamiento normal, el Ciclón 1 entra en una condición completamente taponado, produciendo un sobre flujo mucho más grueso, mientras que los otros 7 ciclones comienzan a producir un sobre flujo algo más fino, en línea con las tendencias de datos reales mostradas en la Figura 1 y anticipadas por el simulador de J-Tools como se discutió anteriormente. Debido a la distribución desigual del caudal másico del circuito a favor del ciclón taponado, este último predomina y la corriente de sobre flujo general del ciclón (normal + ciclones taponados) se vuelve un poco más gruesa (trazo rojo en la Figura 7). Es importante tener en cuenta que este cambio probablemente pasaría desapercibido si solo se midiera y controlara el sobre flujo combinado y no todos los sobre flujos de ciclones individuales. Debido a la disponibilidad de las señales individuales PST del ciclón, la aplicación descrita de la Prueba de Grubbs en línea, detecta rápidamente este evento (gráfico superior en Figura 7) y sugeriría el reemplazo inmediato de este ciclón anormal por otro ciclón inactivo disponible en el grupo (*Nota: si un grupo dado fue diseñado para operar con 8 ciclones, debe ser equipado con al menos 10 ciclones en total de manera que siempre existan ciclones inactivos para reemplazar los ciclones taponados*). Curiosamente, si un sistema de control detectara el producto de sobre flujo combinado ligeramente más grueso, lo más probable es que tomara la costosa acción de reducir el tonelaje de alimentación fresca al circuito porque habría determinado que la velocidad de alimentación actual era demasiado alta para que el circuito lo chancara al tamaño deseado, por ejemplo, debido a un aumento en la dureza del mineral.

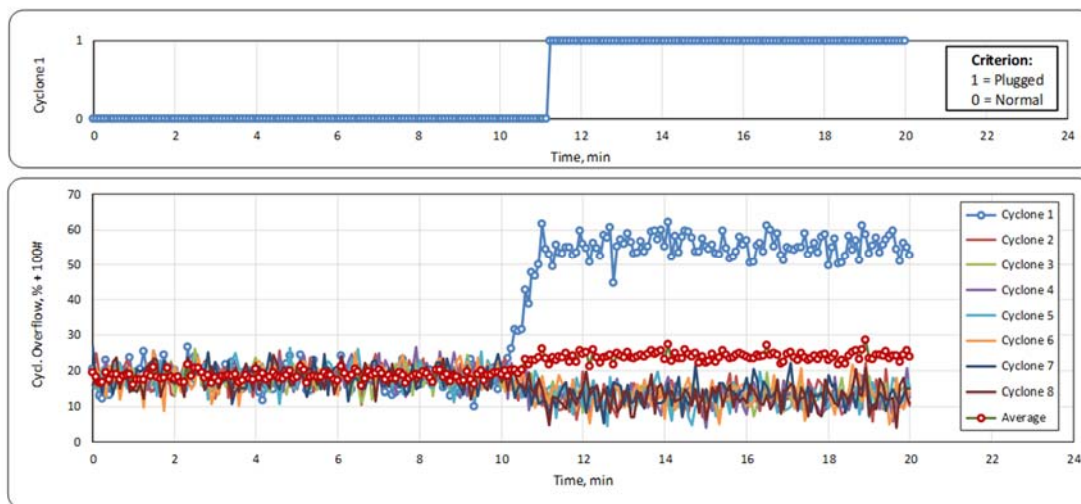


Figure 7. Ejemplo de detección de ciclón obstruido mediante la aplicación en línea del criterio de detección de valores atípicos de la Prueba de Grubb.

Caso 2 – Molienda Gruesa General

A diferencia de otros algoritmos de apertura / cierre de ciclones (generalmente basados en bandas de control fijas), cuando todos los ciclones se vuelven más gruesos, como se muestra en la Figura 8, como resultado de las condiciones de operación cambiantes, la Prueba de Grubbs correctamente no destaca ningún ciclón candidato para reemplazo (ver gráfico superior en la Figura 8); evitando así una reacción exagerada repetitiva del sistema de control cuando tales situaciones están presentes

durante la operación normal.

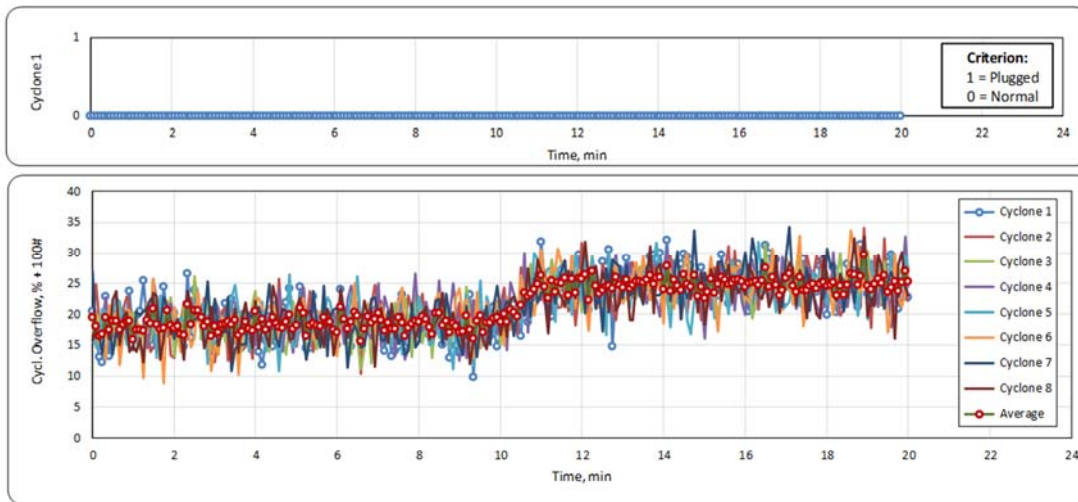


Figura 8. Ejemplo del criterio de detección de valores atípicos de la Prueba de Grubbs que demuestra insensibilidad al engrosamiento general del tamaño del chancado; es decir, sin taponado.

Caso 3 – Límite de Detección del Algoritmo

En cualquier aplicación, los límites de detección pueden ajustarse a un rango preferido especificando adecuadamente los parámetros estadísticos del algoritmo, como el nivel de significancia α o el número de observaciones aleatorias N tal como se define en la Prueba de Grubbs. En el ejemplo que se muestra en la Figura 9, el algoritmo de detección de ciclones anormales puede resaltar eventos de taponamiento de ápex emergentes tan temprano como un taponamiento del 7-10%. El límite de detección real dependerá de varios factores, únicos para cada aplicación, y del rango calibración del sistema PST.

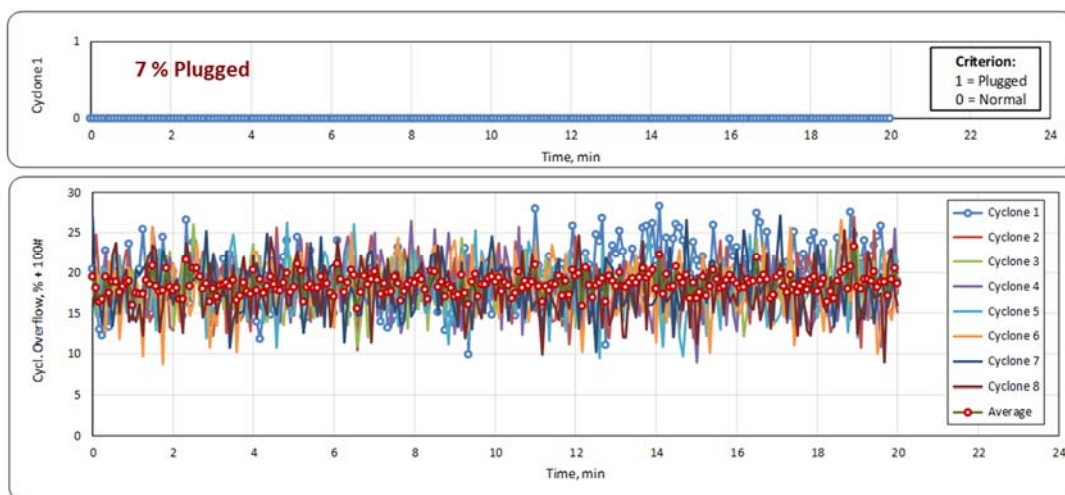


Figura 9. Ejemplo del Ciclón 1 justo por debajo de su umbral de detección de taponamiento de 7-10%.

Caso 4 – Aplicación a Datos Reales

Para el ejemplo del caso real presentado anteriormente en la Figura 1, puede demostrarse, también, que el algoritmo de detección de valores atípicos hubiera detectado claramente la respuesta anormal del Ciclón 9 como se muestra en Figura 10.

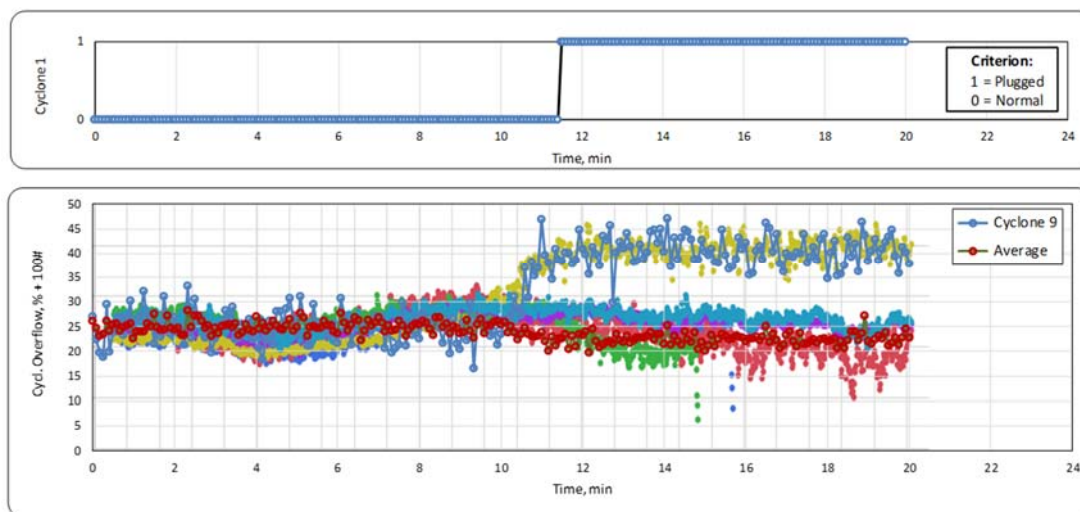


Figura 10. Ejemplo del algoritmo de detección de valores atípicos detectando el ciclón 9 anormal en el caso de ejemplo que se muestra en la Figura 1.

ESTRATEGIA DE CONTROL INTEGRAL

El uso adecuado del algoritmo de detección de valores atípicos propuesto permite la efectiva implementación de una nueva estrategia de control integral para la línea de producción completa. (ej. SAG o HPGR, Molienda de Bola y Flotación).

Centrándose en la etapa de molienda de bolas, siguiendo la representación esquemática de las lógicas de control expertas propuestas en la Figura 11, el primer paso en el ciclo de control es confirmar si el sobre flujo del circuito P80 (o algún tamaño de malla de referencia) cumple con el rango aceptable establecido. Si P80 es demasiado fino o está dentro del rango, no se requiere acción adicional y el control se transfiere nuevamente a la etapa de molienda aguas arriba (en este ejemplo, el molino SAG). Por el contrario, si P80 es demasiado grueso, el siguiente paso es aplicar la Prueba de Grubbs para identificar posibles ciclones obstruidos. Si es positivo, los ciclones conectados deben reemplazarse rápidamente por otros ciclones inactivos en el grupo. Si es negativo, es necesario examinar y ajustar cuando corresponda varias condiciones del circuito de molienda, tales como, presión de ciclón, potencia del molino, carga circulante. Si no se encuentran ajustes posibles o necesarios, entonces la contingencia P80 se declara causada por el molino SAG aguas arriba que entrega demasiado flujo (para la dureza del mineral actual) a los molinos de bolas y el control se transfiere de regreso al molino SAG en modo RESTRINGIDO.

Claramente, esta estrategia de control de optimización solo es posible gracias a la disponibilidad de mediciones de tamaño en línea PST para cada ciclón individual en el grupo.

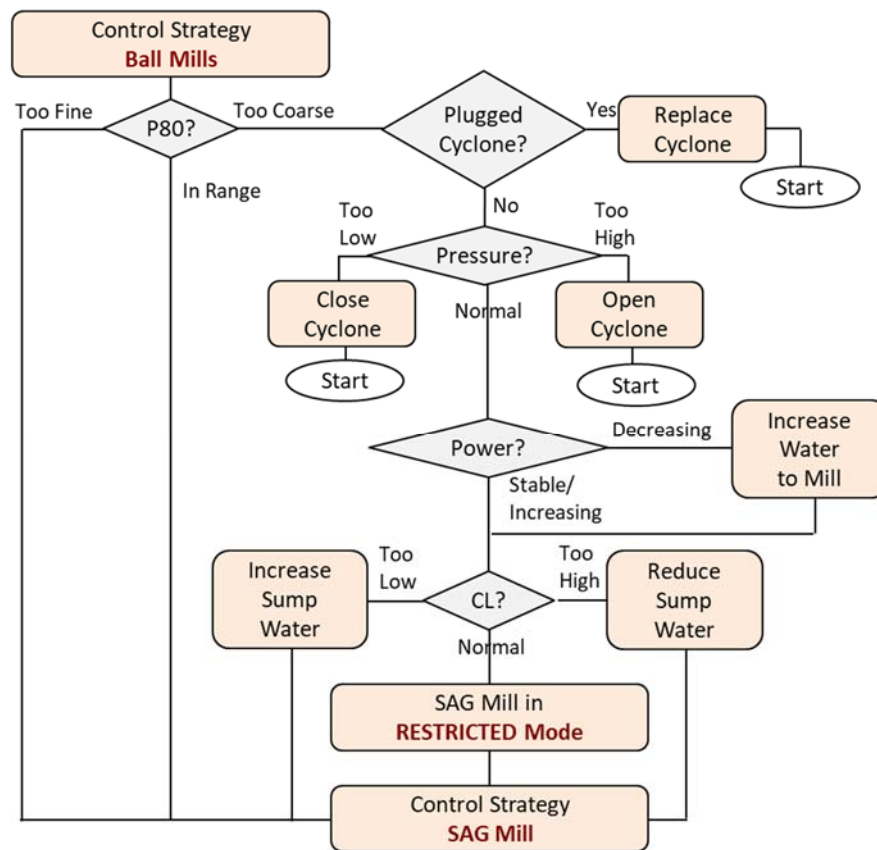


Figura 11 Esquema de la Lógica de Control Experto propuesta para la etapa de molienda de bolas.

OBSERVACIONES FINALES

Por décadas la ausencia de una medición de tamaño de partícula confiable, en línea, ha limitado la implementación de estrategias de control automático del tamaño de las partículas, que puedan permitir a las concentradoras maximizar la producción de metal valioso. Por medio de medir el tamaño de partícula en el sobre flujo de cada ciclón, se ha demostrado que el Sistema PST de CiDRA permite la detección y control de ciclones anormales individuales, yendo mucho más allá que el tradicional control a nivel de batería. La Estrategia de Control Experto propuesta no sería factible con dispositivos alternativos de medición del tamaño de partícula cerca de la línea, limitados a procesar solo el sobre flujo combinado de todos los ciclones en el grupo, a frecuencias de medición mucho más bajas que las requeridas para estrategias de control efectivas.

La condición de un ciclón anormal ha sido simulada reduciendo progresivamente el diámetro del ápex para simular ciclones parcial a totalmente taponados. Esta simulación permite una comprensión cuantitativa en profundidad del evento y del efecto significativo que un único ciclón anormal puede tener sobre un grupo completo de ciclones.

Para el ejemplo particular de un agrupamiento de 8 ciclones aquí discutido, las simulaciones revelan que, para un ciclón completamente taponado, un desproporcionadamente alto 27% del tonelaje total que está siendo molido, sale del sobre flujo del ciclón taponado del cual solo un 60% es flotable a niveles de recuperación aceptable, resultando en una pérdida estimada de 7-8% de material valioso.

Aplicando un algoritmo de detección de valores atípicos estadísticos, como la Prueba de Grubbs descrita, es posible detectar un valor "atípico" o "fuera de rango" (como la señal PST de un ciclón anormal) con respecto a una serie de otros valores (como las señales PST de ciclones que funcionan normalmente). A diferencia de otros algoritmos de apertura/cierre de ciclones, no destaca los ciclones anormales para reemplazo cuando todos los ciclones cambian simultáneamente su tamaño de producto debido a un cambio en la condición de operación, como cuando todos los ciclones producen sobre flujos más gruesos. El límite de detección puede ajustarse especificando adecuadamente los parámetros estadísticos del algoritmo.

REFERENCIAS

Grubbs, F.E., (1950), "Sample Criteria for Testing Outlying Observations", *Annals of Mathematical Statistics*, 21 (1): 27-58.

Grubbs, F.E., (1969) 'Procedures for Detecting Outlying Observations in Samples', *Technometrics*, Vol. 11, No. 1, *Published by American Statistical Association and American Society for Quality*, viewed 06 November 2019. <http://webspaceship.edu/pgmarr/Geo441/Readings/Grubbs%201969%20-%20Detecting%20outlying%20observations%20in%20samples.pdf>

Maron, R., O'Keefe, C., Sepúlveda, J.E. (2017) 'Assessing the Benefits of Automatic Grinding control Using PST Technology for True On-Line Particle Size Measurement', *Proceedings of PROCEMIN 2017 13th International Mineral Processing Conference, Santiago, Chile*.

Maron, R., Sepulveda, J.E., Jordens, A., O'Keefe, C., Walqui, H. (2019) 'Coarser Grinding: Economic Benefits and Enabling Technologies', *Proceedings of MINEXCELLENCE 2019, 4th International Seminar on Operational Excellence in Mining, Santiago, Chile*.