

El valor del rastreo de tamaño de partículas en tiempo real por cada ciclón

Dylan Cirulis^{1*}, Christian O’Keefe², Juan F. Medina³ y Robert J. Maron⁴

1. *CiDRA Minerals Processing, USA*
2. *CiDRA Minerals Processing, USA*
3. *CiDRA Minerals Processing, USA*
4. *CiDRA Minerals Processing, USA*

RESUMEN

Desde que las bombas de gran tamaño aparecieron en el mercado en el año 1950, ofreciendo la capacidad suficiente para crear el movimiento de rotación necesario para la clasificación en ciclones, el ciclón ha mantenido su firme posición en la industria del procesamiento de minerales (Lynch, 2015). Los ciclones son sencillos de usar y tienen rangos de operación que los hacen los preferidos para grandes circuitos cerrados de molienda, y probablemente continuarán siendo los favoritos en el futuro. No obstante su simplicidad, los ciclones son clasificadores imperfectos y tienen ineficiencias asociadas con el traspaso de material fino y grueso al flujo no deseado. Más aún, aunque los ciclones generalmente se configuran en baterías o grupos y son alimentados por medio de un distribuidor común, el desempeño individual puede variar de manera importante. El funcionamiento del ciclón puede tener un impacto de gran importancia sobre el rendimiento general de la planta afectando la eficiencia de la molienda (finos no deseados en la alimentación del molino de bolas), la capacidad de tratamiento (detenciones debido a las obstrucciones) y también sobre la recuperación de mineral (por causa de la presencia de material grueso no deseado en la alimentación del proceso de separación aguas abajo).

Este documento presenta una tecnología innovadora y robusta que ha sido desarrollada con un colaborador de la industria para abordar el desafío que presenta el material grueso no deseado en los flujos de overflow del ciclón. Aquí se describirá en forma detallada el sistema de rastreo de tamaño de partícula (PST) del CYCLONÉtrac en conjunto con el enfoque de la calibración, para lo cual se ha desarrollado un método rápido de análisis de muestras de flujos de overflow del ciclón a fin de minimizar los errores inherentes a este proceso. El sistema cuenta con sensores instalados en cada ciclón que entregan una medición de tamaño de partícula y monitorean el funcionamiento de los ciclones en forma individual. Esto contrasta con el enfoque tradicional de medir la muestra obtenida del flujo de overflow consolidado de una batería de ciclones. Los datos obtenidos de la planta serán presentados para mostrar el valor de las mediciones individuales.

INTRODUCCIÓN

En un concentrador de procesamiento de minerales que contempla la conminución y posterior flotación, la recuperación de mineral valioso está fuertemente relacionada con la distribución del tamaño de partículas del material que alimenta a la flotación.

El tamaño óptimo de partículas se determina por el tamaño de liberación del mineral y la compensación de la planta entre la recuperación y tonelaje procesado, y no debe ser ni demasiado fino ni demasiado grueso. En general, al reducir la cantidad de material grueso se puede mejorar significativamente la recuperación en una planta. La entrega de partículas gruesas indeseadas generalmente es el resultado de un control inadecuado del proceso de molienda o deficiencias en la clasificación realizada por el hidrociclón. La reducción de la cantidad de finos no deseados puede aumentar la ley, el tonelaje procesado y potencialmente incrementar la recuperación. Este artículo presenta una solución al desafío de mantener un tamaño óptimo de partículas en la alimentación a la flotación.

A través de una alianza de cooperación industrial, CiDRA ha desarrollado una innovadora tecnología que mide el tamaño de partículas en las tuberías de overflow de cada hidrociclón. El sistema proporciona información del tamaño del producto en el flujo de overflow en tiempo real, lo que permite a los operadores tomar una acción correctiva en forma inmediata o adoptar diversas estrategias en la sala de control. La solución ha sido implementada y actualmente se acerca a los dos años de operación comercial, que será descrita en detalles. Se presentan los datos obtenidos de la planta mostrando ejemplos de cómo puede utilizarse la información para identificar los problemas de operación.

DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA

El sistema CYCLONEtrac PST consta de un conjunto de sensores, caja de interconexión y un computador en la sala de control. El conjunto de sensores está compuesto por una sonda reforzada en contacto con el flujo de overflow y un grupo de elementos electrónicos integrados protegidos por una caja metálica sellada. La sonda está recubierta por una capa extremadamente dura que refuerza su resistencia al desgaste. Cuando el flujo de pulpa golpea la sonda se crea una señal acústica de impacto. La respuesta al impacto es procesada por un conjunto de elementos electrónicos integrados para obtener la medición del tamaño de partículas en el flujo de pulpa. El sensor es alimentado por 24V y se comunica con una caja de conexiones por medio del protocolo MODbus.



Figura 1 Izquierda, sensor CYCLONEtrac PST. Derecha, sensor CYCLONEtrac PST instalado en la tubería.

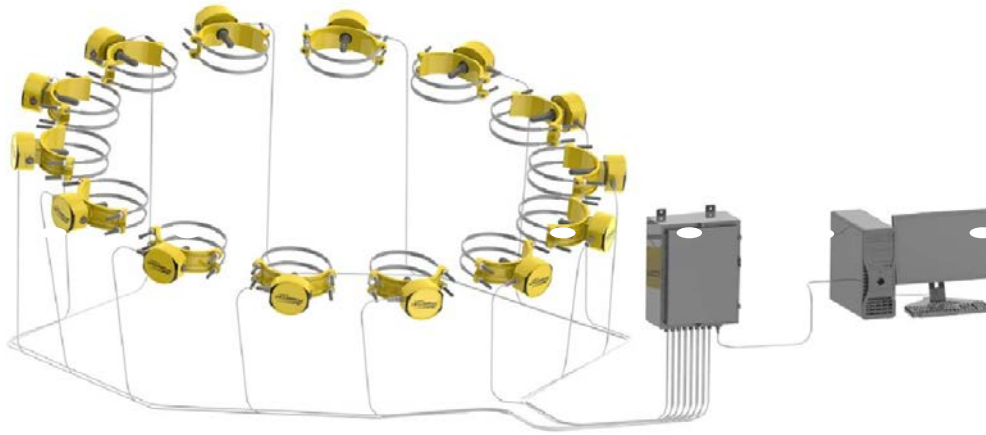


Figura 2 Sistema CYCLONetrac PST

Cada caja de conexión tiene capacidad para conectar hasta 16 sensores, les proporciona la potencia eléctrica (DC) al igual que a los sistemas de comunicación. La caja de conexión toma las comunicaciones MODbus de cada conjunto de sensores y lo traduce a protocolo Ethernet industrial para posteriormente transmitirlo a un computador en la sala de control. El computador en la sala de control centraliza las mediciones de cada dispositivo y las traspasa al Sistema de Control Distribuido (DCS) mediante comunicación OPC.

Las tuberías de overflow existentes requieren una perforación en 2" (50 mm) para la instalación del sensor PST. Luego, se asegura el conjunto en su lugar mediante una fijación tipo abrazadera. Si la unidad PST no está disponible para ser inmediatamente instalada, se dispone de un sistema tipo tapón para que la tubería de flujo de overflow pueda volver a ponerse en servicio con un mínimo impacto en la disponibilidad del hidrociclón. Generalmente, una batería de hidrociclones tiene cierta cantidad de hidrociclones disponibles que no se usan. Esto permite la instalación de los dispositivos del PST sin tener que experimentar detenciones del circuito de molienda, ya que la batería puede continuar operando.

La instalación de una unidad PST en una tubería de overflow ya preparada puede demorar solamente unos 10 minutos. La sonda ocupa un área transversal muy pequeña comparada con la sección total disponible de la tubería y la forma cilíndrica produce una perturbación mínima en el flujo. Por lo tanto, no existe impacto sobre el funcionamiento del ciclón por causa de perturbaciones en el flujo de overflow.

COMPARACIÓN DE TECHNOLOGÍAS

CYCLONetrac PST difiere del método tradicional de medición de tamaño de partículas en varias maneras. La Tabla 1 resume algunas de las diferencias claves entre las tecnologías disponibles utilizadas para medición de tamaño de partículas en circuitos de conminución. CYCLONetrac PST fue desarrollado con un copartícipe de la industria minera para producir una solución en la medición de tamaño de partículas para circuitos de molienda. Una combinación demostrada entre la alta disponibilidad y una frecuencia de actualización rápida hace posible la implementación de un control de lazo cerrado junto a una estrategia de control para el producto del circuito de conminución.

Tabla 1 Comparación de tecnologías de medición de tamaño de partículas

	CYCLONetrac PST	Sistemas tradicionales de muestreo del overflow consolidado de los ciclones utilizando difracción, ultrasonido, o caliper mecánico	Laboratorio de tamizado
Frecuencia de actualización	4 segundos	3-9 minutos	Generalmente cada 2 horas con una latencia de 12-24 horas
Posibilita control de lazo cerrado	Sí	No	No
Muestreo de flujo completo	Sí	No	No
Requiere mantención del muestreador	No – no hay muestreador	Sí	No
Disponibilidad	>98%	Generalmente baja con excepciones	Alta
Número de tamaños de partículas	Actualmente 1 (en desarrollo más alternativas)	Múltiple	Múltiple
Monitoreo del rendimiento de los hidrociclones individuales	Sí	No	Posible pero no es típico

CALIBRACIÓN DEL SISTEMA

Los métodos de dimensionamiento de partículas en líneas de flujo de overflow, ya sea por medio de difracción, ultrasonido, caliper mecánico o el impacto, necesitan calibración por correlación de sus señales con muestras que son correspondientemente analizadas en seco en laboratorio o por medio de partículas de referencia. De acuerdo con la literatura de Outotec, el PSI 300, que corresponde a un dispositivo de medición según caliper “requiere un rango de aproximadamente 20 muestras para obtener la ecuación de calibración más precisa.” El CYCLONetrac PST, cuya

medición se basa en el impacto, también necesita calibración debido a las influencias del tipo de ciclón, las condiciones de operación y el lugar de instalación del sensor. Para obtener una buena calibración compuesta o combinada que pueda aplicarse a todos los ciclones dentro de una batería, se debe tomar muestras de cada ciclón. Cuando se ejecuta dicha calibración, ya no es necesario volver a realizarla, ni siquiera cuando se reemplaza el sensor. Además, se debe tomar muestras más allá del rango de operación esperado de los ciclones. De esta manera se evita la incertidumbre de la medición que se produce cuando se utilizan modelos de calibración para extrapolar las mediciones más allá del rango calibrado.

Las incertezas asociadas a la calibración están controladas por dos factores principales: el muestreo y el tamizado. La relación de contribución de estos dos factores sobre la incertidumbre total puede variar. Las limitaciones físicas que se encuentran frecuentemente en el muestreo del flujo de overflow del ciclón producirán que la incertidumbre del muestreo domine, particularmente si el tamizado y el procedimiento de análisis granulométrico han sido correctamente implementados. El objetivo es reducir el intervalo de confianza de la calibración resultante. Suponiendo que tales varianzas del muestreo se distribuyen normalmente, a medida que aumente el número de muestras se reducirá el intervalo de confianza de la calibración por la raíz cuadrada del número de muestras. Los mejores procesos de tamizado implican eliminar los finos, secar el resto de la muestra en una estufa, y luego clasificar con mallas. Lamentablemente, este proceso demanda demasiado tiempo, trabajo y equipos, requiriéndose normalmente entre 12 a 24 horas para terminarse, incluyendo el tiempo de secado. Para procesar más muestras con recursos limitados, se puede utilizar un procedimiento de tamizado de tamaño único por vía húmeda. En un procedimiento de tamizado de tamaño único por vía húmeda se utiliza una única malla para determinar el porcentaje de material que sobrepasa cierto tamaño. Para reducir el tiempo utilizado en el análisis granulométrico por vía húmeda y analizando las muestras en general para poder procesar el mayor número posible, CiDRA desarrolló un equipo dedicado. Para reducir la incertidumbre del análisis de fracción por peso de pulpa por vía húmeda, CiDRA desarrolló nuevas técnicas. El equipo de análisis granulométrico dedicado, diseñado a la medida, incluye un agitador que utiliza mallas de gran tamaño, de 12" de diámetro. Comparadas con las mallas de 8" de diámetro que generalmente son utilizadas, éstas de mayor tamaño proporcionan una superficie 2,25 veces mayor de área disponible. Se implementaron estaciones portátiles para tamizado por vía húmeda a objeto de reducir el tiempo utilizado en el traslado de las muestras al laboratorio, así el análisis puede realizarse cerca de los puntos de muestreo.

En la Figura 3 se muestra una foto del equipo portátil con el agitador diseñado a la medida.



Figura 3 Vista superior de las estaciones de tamizado y análisis de pulpa por vía húmeda. En el centro se puede apreciar el agitador diseñado a la medida.

Durante una campaña a finales del año 2015, aproximadamente 15% de las muestras fueron procesados por tamizaje seco. Dentro de los 1,5 minutos siguientes de tomar muestras para tamizaje seco, se tomaron muestras adicionales de los mismos ciclones y éstas fueron analizadas por vía húmeda en una malla única de 150 micrones, proporcionando el porcentaje de material retenido por la malla o % +150 micrones. Una limitación de esta prueba comparativa es que las distribuciones de tamaño en el flujo de overflow pueden cambiar rápidamente en un periodo de 1,5 minutos. Los resultados obtenidos por medio de tamizado y secado se compararon con las muestras de tamizado por vía húmeda y se calcularon las diferencias, Figura 4. De las dieciocho muestras se observó una diferencia media de 0,35 puntos de porcentaje y una desviación estándar de 2,3 puntos.

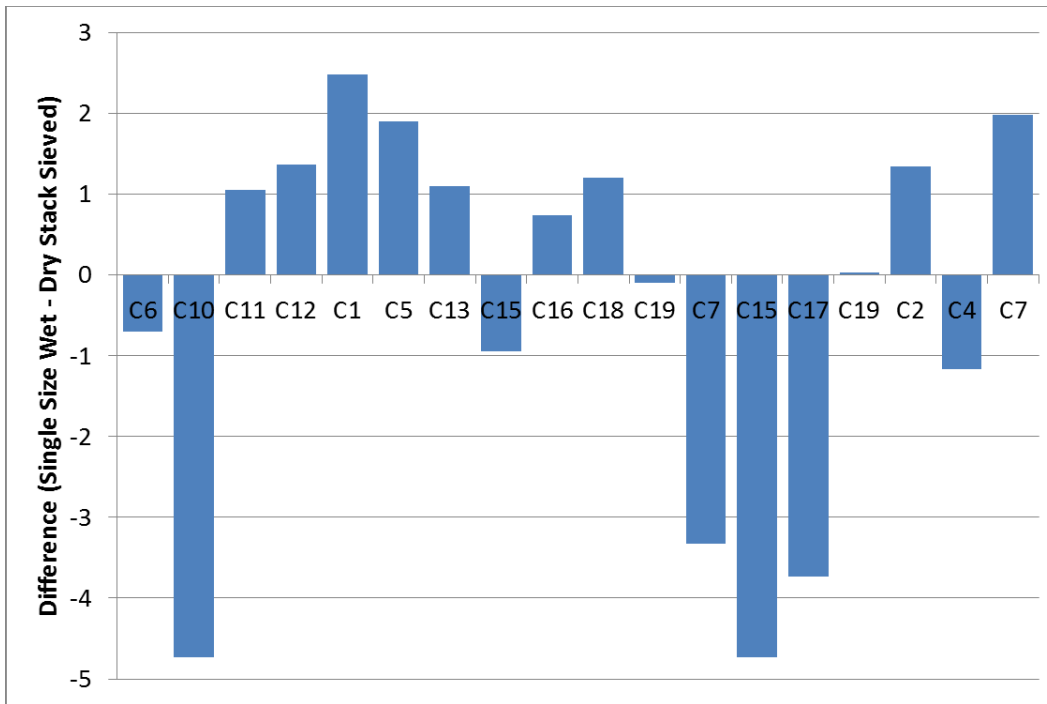


Figura 4 Diferencia (Resultados de laboratorio de tamizado y secado versus los resultados obtenidos por CiDRA por tamizado de tamaño único por vía húmeda.) La nomenclatura de los datos se refiere al ciclón (Por ejemplo: C6 para el ciclón seis).

Los sensores del CYCLONetrac PST se instalaron en 88 ciclones en el circuito de molienda primaria de una compañía productora de cobre de gran tamaño. Se tomaron muestras de estos ciclones, de las cuales un 50% fue utilizado para generar los coeficientes de calibración para la medición de % +150 micrones. El 50% restante de las muestras fueron utilizadas para validar el modelo, como un método de asegurar que funcione no tan solo con las muestras de calibración solamente. Las señales calibradas obtenidas de los sensores CYCLONetrac PST se compararon con los resultados de los análisis de todas las otras muestras y se calculó una desviación estándar de 4,5 puntos de porcentaje en la medición de % +150 micrones. En la Figura 5 se muestra un gráfico de los resultados junto con la incertidumbre obtenida del muestreo, y del tamizado y secado, versus las pruebas correspondientes por tamizado de tamaño único por vía húmeda.

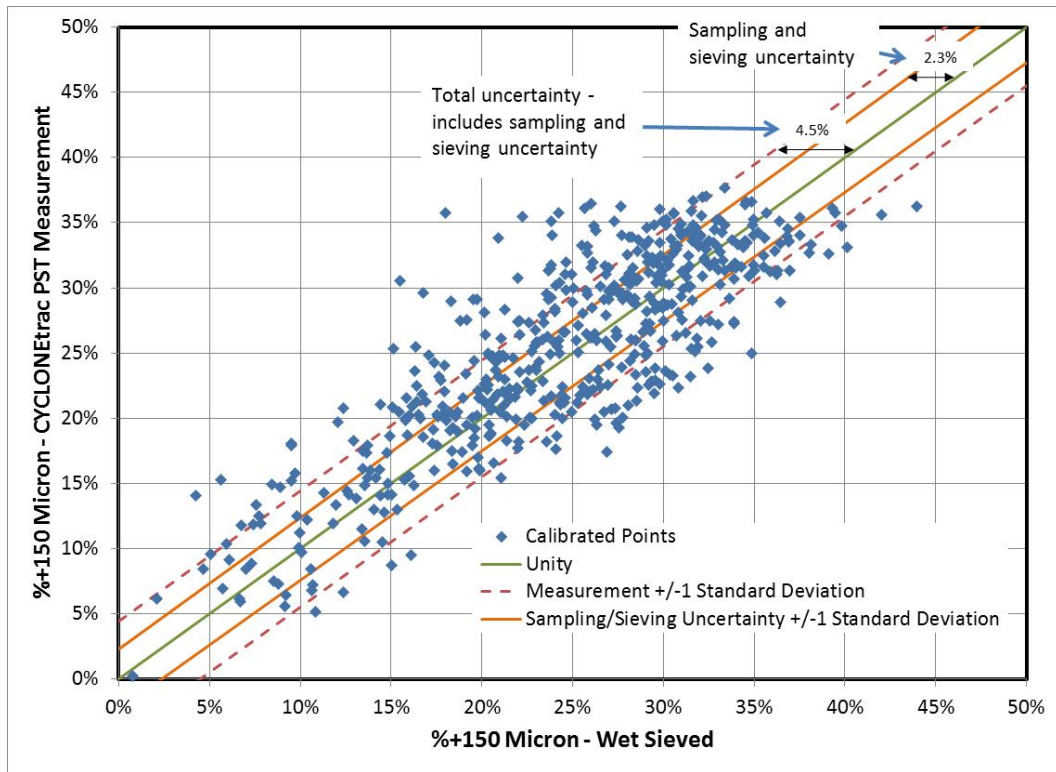


Figura 5 Comparación del resultado de % +150 micrones obtenido por los sensores del CYCLONetrac PST versus los % +150 micrones de las muestras de tamizado de tamaño único por vía húmeda (porcentaje de sólidos retenidos en una malla de 150 micrones)

FUNCIONAMIENTO DEL CICLÓN

Un circuito de molienda típico utiliza una configuración de múltiples ciclones operando en paralelo en una batería con una alimentación única y líneas de descarga común para la batería completa. Dado que tradicionalmente no ha existido instrumentación en cada ciclón, esta configuración dificulta la identificación de los ciclones que están teniendo un comportamiento deficiente y hace difícil, además, cuantificar este efecto sobre el proceso de molienda-clasificación. La instalación del sistema CYCLONetrac PST permite dos funciones clave:

1. Proporciona una indicación en tiempo real del tamaño del producto final que puede utilizarse para ajustar ciertos parámetros del proceso; por ejemplo: la densidad de alimentación y/o la presión del ciclón para controlar el tamaño del producto final.
2. Identificación de ciclones con bajo rendimiento de clasificación para permitir una acción correctiva. Por ejemplo: cerrar y volver a abrir un ciclón para 'resetearlo' o detener los ciclones que estén fallando para reemplazarlos por otros con menos tiempo de uso.

Se ha emitido un análisis de caso detallado para el ítem 1 en (Cirulis *et al*, 2015). En este caso la planta logró importantes incrementos en tonelaje procesado y disminución en el tamaño de partículas a través de mejoras en el control del circuito de molienda y clasificación de un molino de bolas. En el caso del ítem 2, análisis previos (Cirulis *et al*, 2015) han demostrado que un ciclón funcionando en forma deficiente puede tener un impacto importante sobre el total de la molienda y el circuito de clasificación. Los siguientes cuadros muestran ejemplos de ciclones con funcionamiento deficiente, pero más que analizar el impacto sobre el circuito de

molienda/clasificación revisan las causas posibles. Los datos han sido recopilados de un circuito SABC.

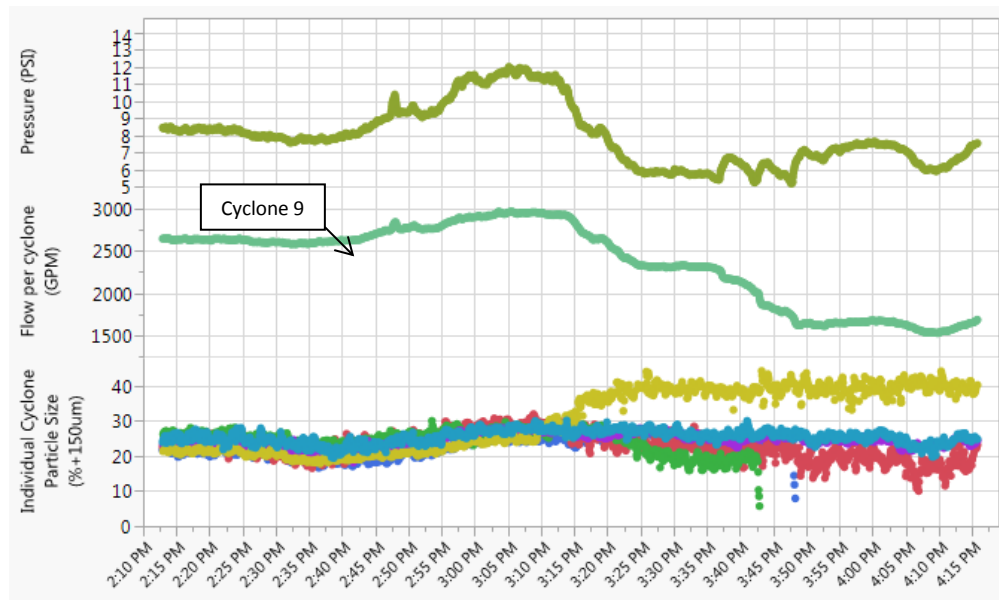


Figura 6 Ejemplo 1 – Datos de proceso de circuito de molienda

En la Figura 6, se observa que el ciclón 9 pasa de un estado de operación normal a mal rendimiento, a las 3:15PM, luego de un incremento en el flujo de alimentación y presión a los ciclones. El ciclón 9 sigue trabajando en forma deficiente y produciendo un tamaño de partículas del orden de 40% por sobre 150 micrones durante una hora. Durante este período, la carga circulante en el circuito de molino de bolas, indicado por el flujo de alimentación, cae en más de 1000 galones por minuto, atribuible al estado de corto circuito del ciclón 9. Este material se descarga a través del flujo de overflow del ciclón 9, lo que resulta en un aumento en la tasa de flujo masico de la alimentación a la flotación proveniente de ese ciclón; por lo tanto, el producto consolidado obtenido por la batería es dominado por el material grueso proveniente de este ciclón individual.

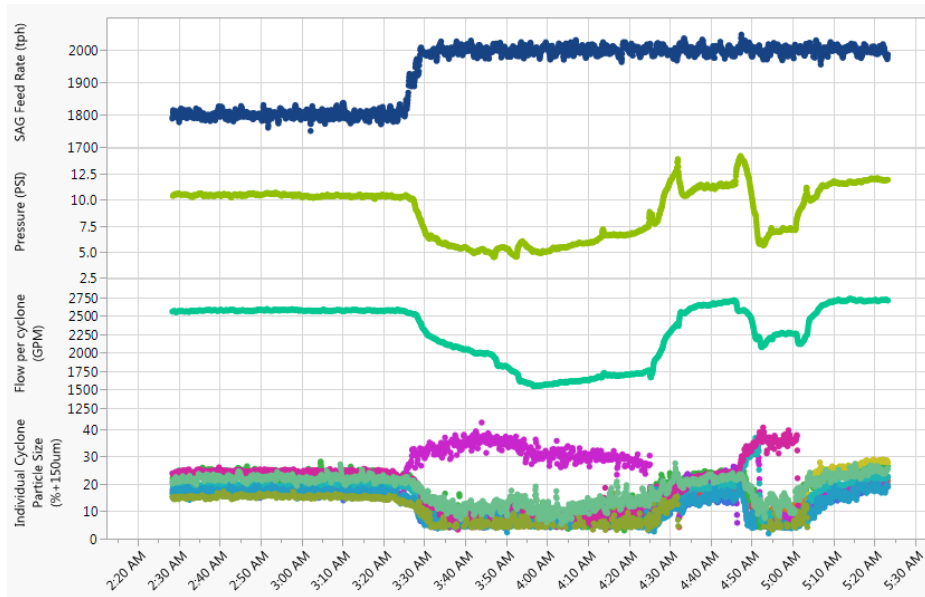


Figura 7 Ejemplo 2 – Datos de proceso del circuito de molienda

La Figura 7 muestra la respuesta del circuito a un aumento del 10% de la tasa de alimentación del molino SAG ocurrido a las 3:25AM. Casi de manera instantánea el ciclón 7 pasa de un estado de operación normal a mal rendimiento, y permanece así por 55 minutos antes de ser cerrado. Debido al corto circuito de la alimentación al ciclón, la carga en los otros ciclones se reduce y se puede inferir por el menor tamaño de partículas del producto de cada ciclón. Cuando el ciclón 7 se cierra se recupera el flujo de alimentación y la presión del ciclón, y luego de un alza abrupta de la presión, otros 2 ciclones comienzan a funcionar en forma deficiente por diez minutos después de los cuales finalmente se cierran.

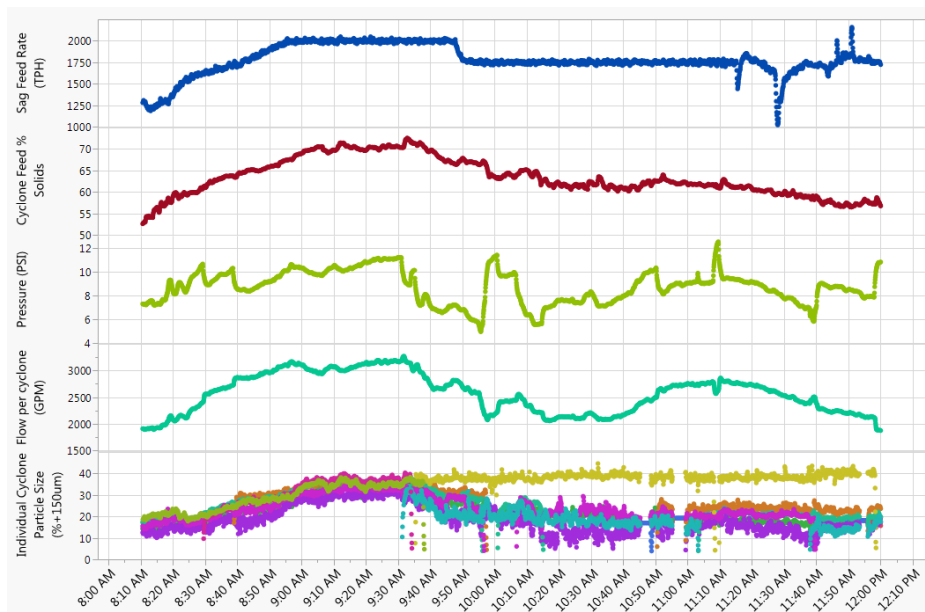


Figura 8 Ejemplo 3 – Datos de proceso de circuito de molienda

La Figura 8 muestra la respuesta del circuito a un aumento del 60% en la tasa de alimentación al molino SAG por un período de 45 minutos, comenzando a las 8:10AM. En la medida que la tasa de alimentación aumenta, la carga en el circuito de molino de bolas se incrementa, indicado esto por la elevación del flujo, presión y porcentaje de sólidos en la alimentación a los ciclones. A las 9:30AM un pequeño aumento en el flujo del ciclón hace que el ciclón 7 entre en mal rendimiento y continúe produciendo un producto que excede en un 40% los 150 micrones. El ciclón 7 sigue operando en este estado por dos horas y media, durante las cuales la carga circulante cae mientras la mayoría del material de alimentación al ciclón va directo a la flotación aguas abajo debido a la condición de corto circuito en el ciclón.

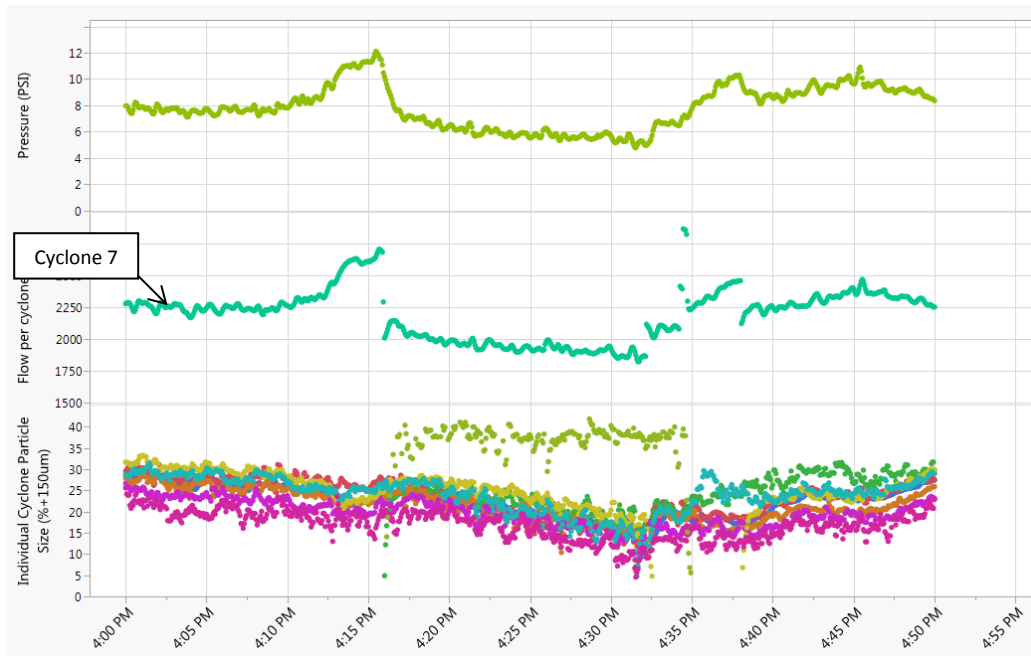


Figura 9 Ejemplo 4 - Datos de proceso del circuito de molienda

El control de abrir/cerrar del ciclón está en un lazo de retroalimentación con la presión del ciclón. La Figura 9 muestra un período de tiempo en el cual el ciclón está abierto en respuesta a un aumento de presión de 2 psi. Sin embargo, el ciclón abierto pasa inmediatamente a un estado de baja clasificación sugiriendo, probablemente, problemas con una obstrucción en el apex u otro componente interno. Durante los 15 minutos que el ciclón permanece abierto se ve un claro impacto sobre el circuito evidenciada en una reducción de la carga circulante (flujo de alimentación del ciclón, por ciclón).

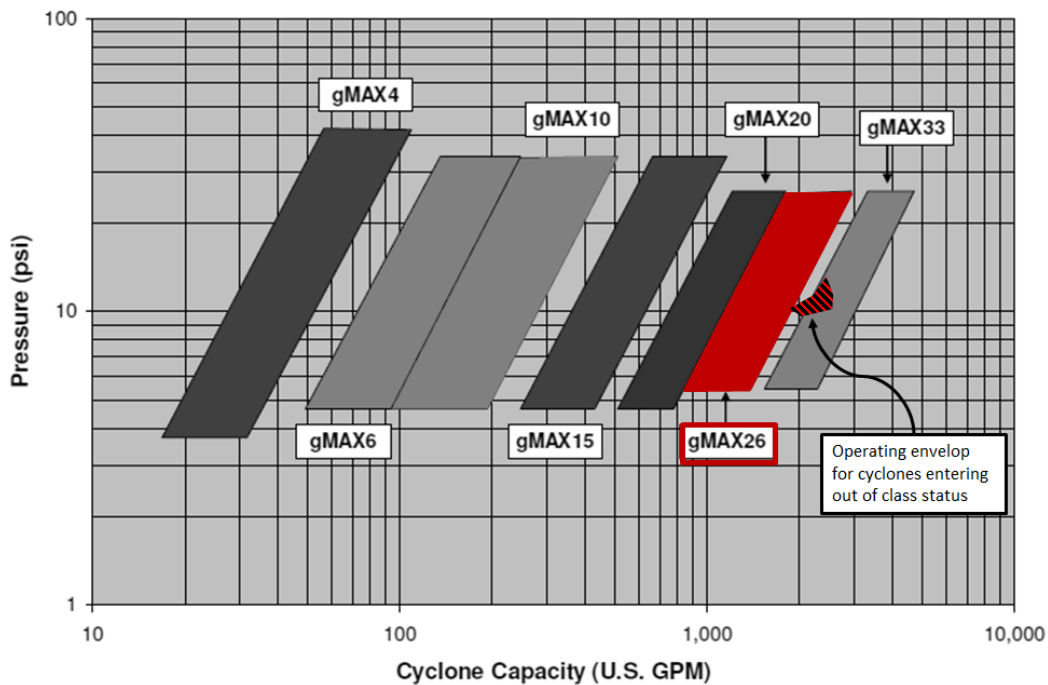


Figura 10 Curvas de capacidad del FLSmidth Krebs gMAX (FLSmidth)

La capacidad del ciclón está definida por la presión, flujo y las dimensiones del ciclón. La Figura 10 muestra las curvas de capacidad de los ciclones FLSmidth Krebs gMAX. En los casos presentados anteriormente (todos ciclones Krebs gMAX 26) el flujo y la presión existentes en el momento en que los ciclones entran en una condición de mal rendimiento, están representados en la Figura 10 y corresponden al área achurada. Está claro que en estos casos la capacidad del ciclón está siendo sobrepasada y ésta puede ser la causa subyacente. De manera interesante, se puede indicar que en muchos casos el número de ciclones abiertos no fue el máximo, sugiriendo con ello que o el control de presión no está optimizado, o los ciclones adicionales pueden no haber estado disponibles por causas de actividades de mantenimiento u operacionales.

Los datos obtenidos por el CYCLONetrac PST revelan que el problema subyacente puede ser que la capacidad del ciclón necesita aumentarse si se debe operar para obtener tonelajes procesados similares o más altos. Además, los datos han identificado que pueden existir oportunidades de optimizar el control de los ciclones para mantener la eficiencia de la planta tanto en el circuito de molienda como en la flotación aguas abajo.

CONCLUSIONES

CYCLONetrac PST en cada ciclón ha permitido disponer de datos e información nunca antes disponibles e imposible de conseguir. (i.e. por medio de campañas de muestreo continuo).

Esta información puede utilizarse para:

1. En condición de control automático, tomar las acciones correctivas para evitar pérdidas de eficiencia (es decir, eficiencia de molienda y/o recuperación de flotación).
2. En condición de control automático, optimizar el sistema de control del circuito de molienda para incluir datos de cada ciclón en tiempo real. Específicamente, aprovechar las

oportunidades para optimizar el control de la presión y asegurar que los ciclones operen dentro de sus flujos y rangos de presión especificados.

3. Identificar los ciclones que están operando en forma deficiente para que reciban mantenimiento.

Considerando los beneficios del monitoreo del rendimiento de clasificación individual por cada ciclón y la optimización de las estrategias de control, CYCLONÉtrac PST debería transformarse en la instrumentación estándar para la clasificación por ciclones en la industria del procesamiento de minerales.

REFERENCIAS

Lynch, A., "Classifiers" in *Comminution Handbook*, Carlton, Australia: AusIMM, 2015, ch. 10, pp.150-152.

Outotec Literature PSI 300 EN_150109.pdf, 2009

Cirulis, D., Dunford, S., Snyder, J., Bartsch, E., Rothman, P., Maron, R., Newton, D., O'Keefe, C., and Mercuri, J., 2015. Process optimization using real time tracking of coarse material in individual cyclone overflow streams in *Metplant 2015 Conference Proceedings*, Perth, Australia, 7-8 September

Cirulis, D., Zuzunaga, A., Jaque, A., Melo, F., Duarte, L. and Maron, R., 2015. Real-Time Particle Size Tracking in Individual Hydrocyclones: New Field Results in Proceedings of *Procemin 2015, 11th International Minerals Processing Conference*, Santiago, Chile, 21-23 October.

FLSmidth, *FLSmidth Krebs gMAX Capacity Curves- English Units*. Available: <http://www.flsmith.com/~media/PDF%20Files/Liquid-Solid%20Separation/Hydrocyclones/gMAXCapacityCurveEnglishUnits.ashx>