

Mantenimiento reducido, mejoras en el rendimiento de la planta mediante rastreo en tiempo real del tamaño de partículas en los hidrociclones

Robert Maron^{1*}, Americo Zuzunaga¹, Dylan Cirulis¹, Juan Francisco Medina¹, Alejandro Jaque²

1. *CiDRA Minerals Processing, USA*
2. *CiDRA Minerals Processing, Chile*

RESUMEN

El rendimiento y la rentabilidad en una planta concentradora dependen principalmente de la producción del tamaño de partículas adecuado en el circuito de molienda/clasificación y su transferencia a la flotación. No considerar esto implica mayores costos en mantenimiento y energía, y menor procesamiento y/o recuperación.

Se presentará una nueva tecnología, actualmente en operación comercial en EEUU y Chile, que representa un cambio radical y alternativa superior para la medición en tiempo real del tamaño de partículas (disponibilidad sobre 95% y prácticamente libre de mantención).

Una buena medición del tamaño de partículas requiere una tecnología con una rápida tasa de actualización, baja latencia de datos, análisis directo del flujo principal, buena exactitud y repetibilidad, alta disponibilidad ($\geq 95\%$), y - fundamentalmente - bajo mantenimiento. Históricamente, estos requisitos no han sido satisfechos por las tecnologías existentes. El sistema desarrollado por CiDRA Minerals Processing supera estas limitaciones y proporciona una nueva información del tamaño de partículas en los hidrociclones individuales.

El mantenimiento representa un alto costo operativo para una planta concentradora. Básicamente, el costo de mantenimiento es el costo directo de repuestos y mano de obra, más la pérdida de producción del equipo fuera de servicio. Sin embargo, como ocurre con las tecnologías existentes en medición de tamaño de partículas, los procesos pueden prescindir de estos equipos. Aunque el proceso puede seguir funcionando, con menor eficiencia, el costo operativo rara vez se considera un resultado en el uso de equipos con baja disponibilidad y alto mantenimiento.

Este artículo analizará el potencial de reducir los costos directos del mantenimiento y mejoras en el rendimiento operativo obtenibles al utilizar esta nueva tecnología (PST). Se presentarán ejemplos utilizando datos de planta.

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.

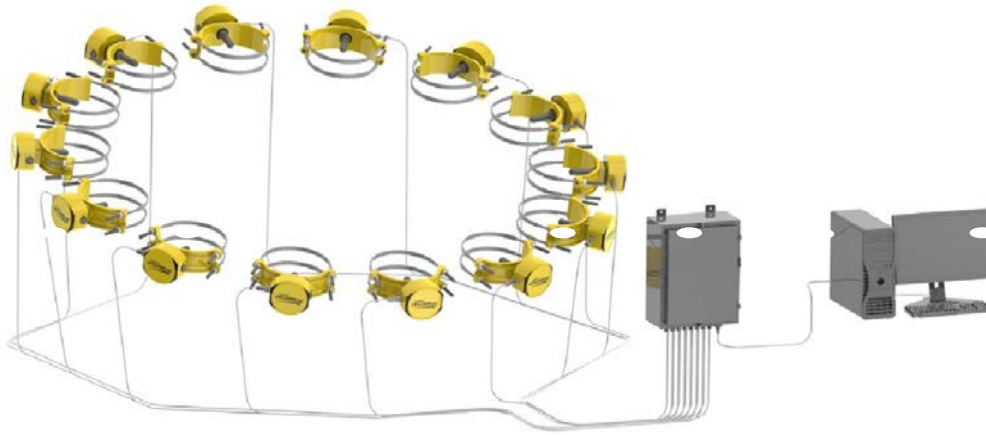


Figura 2 Sistema CYCLONetrac PST

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 traspa 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 copartípe 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.

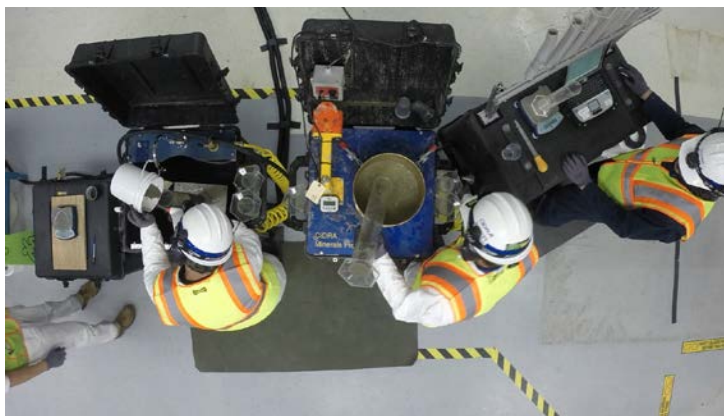


Figura 3 Vista superior de las estaciones de tamizado y análisis de pulpa por vía húmeda. En el centro se puede apreciar el agitador diseñado a la medida.

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.

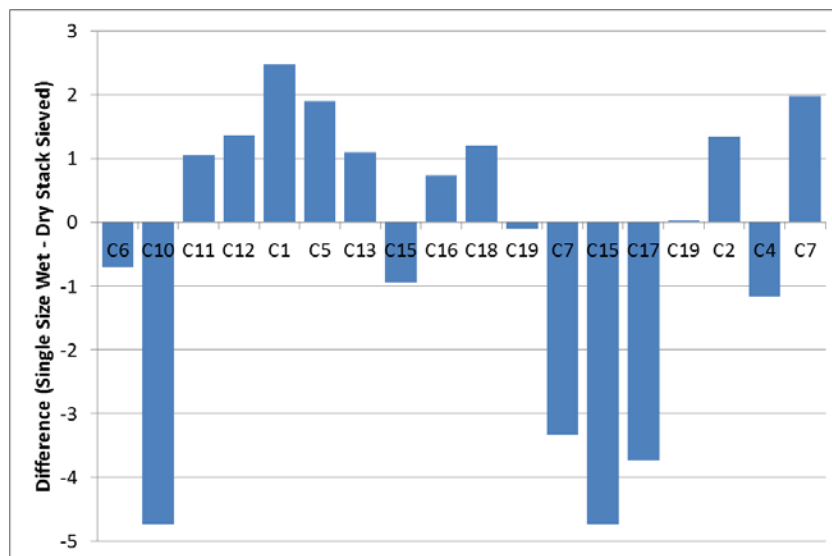


Figura 4 Diferencia (Resultados de laboratorio de tamizado y secado versus los resultados obtenidos por CiDRA por tamizado de tamaño único por vía húmeda.) La nomenclatura de los datos se refiere al ciclón (Por ejemplo: C6 para el ciclón seis).

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 utilizado para validar el modelo, como un método de asegurar que funcione no tan solo con las muestras de calibracion 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.

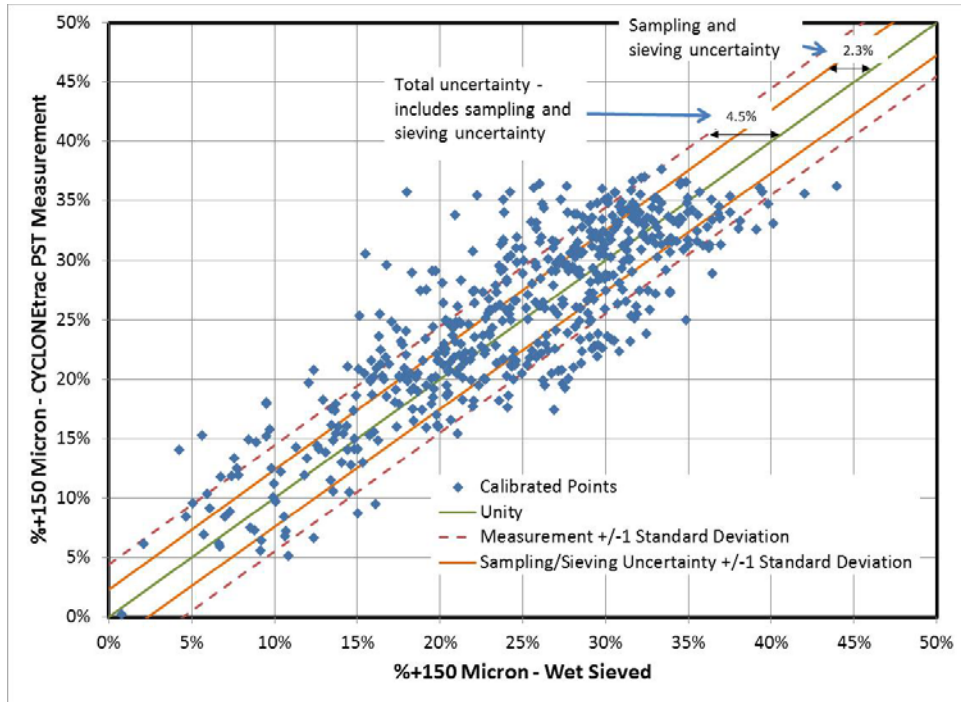


Figura 5 Comparación del resultado de % +150 micrones obtenido por los sensores del CYCLONEtrac PST versus los % +150 micrones de las muestras de tamizado de tamaño único por vía húmeda (porcentaje de sólidos retenidos en una malla de 150 micrones)

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 o estrategias clave:

1. Proporciona una indicación en tiempo real del tamaño del producto final de la batería 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.

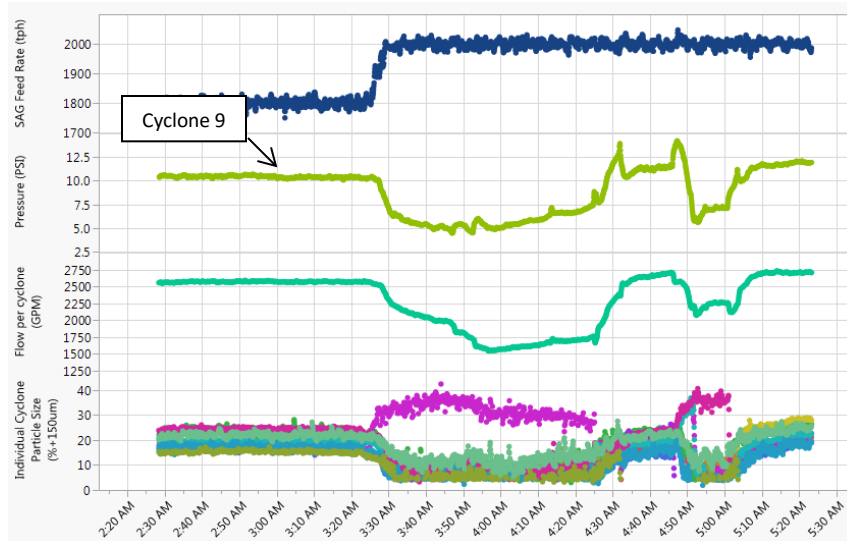


Figura 6 Ejemplo 2 – Datos de proceso del circuito de molienda

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.

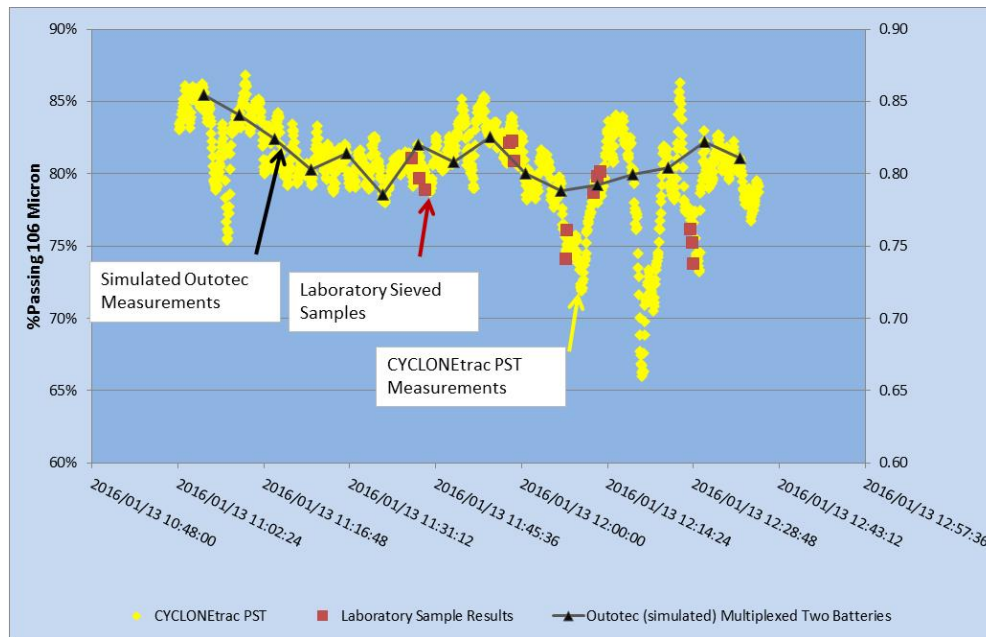


Figura 7 Señal PST en un ciclón comparado con muestras obtenidas manualmente junto con los datos del PST tomados cada 6 minutos para simular los sistemas cuyo funcionamiento se basa en muestreadores

Para determinar visualmente el impacto de la rápida tasa de actualización y la tasa de respuesta del CYCLONetrac PST comparado con los sistemas de tecnología más antigua, se simuló el resultado de este instrumento con una tasa de actualización de 6 minutos, que es lo que se habría obtenido si un sistema de generación anterior se hubiera conectado a dos baterías. En la Figura 7 los resultados en la que se muestran aquí revelan la incapacidad de detectar los cambios de tamaño dentro de un marco de tiempo que permita que el sistema de control reaccione ante ellos mientras que el CYCLONetrac PST sí responde a esos cambios.

MANTENCION REDUCIDA Y RENDIMIENTO MEJORADA A TRAVES DEL USO DE CYCLONETRAC PST

El hecho de tener información de tamaño de partículas en tiempo real de alta disponibilidad puede reducir significativamente el volumen de material grueso que llega a flotación rougher por medio de posibilitar la detección y el cierre de los ciclones individuales descargando material excesivamente gruesa. Por ejemplo, un evento relativamente corto de unos 10 minutos puede resultar en la llegada de unas 200 toneladas de material no flotante a las células de flotación rougher. Esto puede causar daños a las válvulas de dardos y rotores, así como el volumen celular reducida y, por tanto, tiempo de residencia más corto y recuperación reducida, todos los cuales aumentan los requisitos de mantenimiento. También, un estudio de varios años en una concentradora de cobre grande reveló una disminución en la recuperación de rougher de casi un 3 por ciento entre las limpiezas de células.

Los requisitos de mantenimiento - planificados y no-planificados - para sistemas de medición de tamaño de partículas en línea tradicionales pueden ser muy altos dependiendo de las condiciones del proceso. Una concentradora de cobre grande informó que era necesario un equipo de mantenimiento de tres personas de tiempo completo para mantener la disponibilidad por encima del 90% para cuatro instrumentos de tamaño de partículas (PSI) y el muestreo asociado y otros subsistemas. El costo de mantener estos trabajadores en sitios remotos puede ser de US\$100k/año o más.

El único mantenimiento periódico requerido del sistema PST es la sustitución periódica de los sensores debido al desgaste abrasivo, que depende obviamente del tipo de mineral. Las sondas tienen una garantía de 18 meses prorrateado, y la vida útil es de 24 a 36 meses. Dado que las sondas funcionan como una guía de ondas acústicas, la pérdida de área de la sección transversal debido al desgaste afectará el rendimiento y por lo tanto la calibración. Actualmente, el desgaste se determina por inspección mecánica periódica de pequeñas sondas de muestra. Sin embargo, una alarma detector de desgaste electrónico está siendo probada en terreno que va a eliminar por completo la necesidad de una inspección mecánica y señalará cuando una sonda necesita ser reemplazado debido a desgaste que la ha causado estar fuera de calibración. La instalación de la sonda sólo toma 30 minutos debido a las piezas de montaje sencillas.

La calibración de los instrumentos tradicionales PSI puede tener un costo significativo de mantenimiento y a veces es necesario varias veces al año si las variaciones de tipo de mineral son significativas. En comparación, la calibración del sistema PST ha demostrado ser muy robusto. Basado en la experiencia de la primera instalación comercial, la calibración inicial se ha comportado bien sin modificaciones desde principios del 2014.

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). El

sistema ha demostrado una disponibilidad de casi 100% con casi cero mantenimiento durante periodos de multiples años.

Esta información puede utilizarse para:

1. En condición de control automático en nivel de la batería, 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 en nivel de cada ciclón, 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 individuales operen dentro de sus flujos y rangos de presión especificados.
3. Identificar los ciclones que están operando en forma deficiente para que reciban mantenimiento.
4. Si el sistema se calibra en dos tamaños de partículas diferentes, por ejemplo +150um (malla 100) y +250um (malla 60), entonces es posible obtener información sobre la inclinación de la curva de tamaño de partículas, y por lo tanto la nitidez de separación o calidad de la clasificación. Esto se ha demostrado en el laboratorio, pero aún no está en una planta.

Ha sido demostrado que una reducción significativa de mantenimiento puede ser obtenida mientras obtener información confiable de tamaño de partículas para cada hidrociclón, lo cual no es posible con tecnologías tradicionales. Adicionalmente, la nueva tecnología suministra oportunidades importantes para mejorar el control de proceso y beneficios economicos asociados.

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>