

Optimización del Circuito de Molienda en Río Tinto Kennecott por medio de la medición en tiempo real del tamaño de partículas en el flujo overflow utilizando la innovadora tecnología CYCLONEtracSM

Christian O’Keefe*, Paul Rothman, Robert Maron, David Newton, Joseph Mercuri
CiDRA Minerals Processing, Wallingford, CT, USA
Dylan Cirulis, Mark Holdsworth
Rio Tinto Kennecott, South Jordan, UT, USA

RESUMEN

Un circuito típico de conminución incluye un molino de bolas operando en lazo cerrado con una batería de hidrociclones. La función del circuito de molienda es reducir el tamaño del mineral de manera que el proceso de separación aguas abajo pueda obtener la recuperación y calidad de mineral requeridos mientras que a la vez se mantiene los objetivos de producción y rentabilidad de la planta. Con una molienda insuficiente del mineral se producirá un aumento en el flujo de gruesos y en el P80, se reducirá la recuperación de la planta y, en casos extremos, se puede incluso llegar a obstruir el proceso de recuperación aguas abajo. Si la molienda es excesiva, se producirá un P80 de material fino que reducirá la recuperación, la capacidad de producción y, además, afectará negativamente la rentabilidad de la planta. El desafío entonces es controlar el circuito del molino de bolas y la batería de hidrociclones de manera de maximizar el valor equilibrando la recuperación, la capacidad de producción y la rentabilidad de la planta, a pesar de las cambiantes condiciones del mineral y la condición general de los equipos.

Río Tinto Kennecott ha logrado exitosamente mejorar en forma importante el rendimiento del circuito de molienda implementando un control de lazo cerrado en tiempo real de la molienda que permite supervisar en forma directa el circuito P80 así como también monitorear en tiempo real cada hidrociclón. Equipos de trabajo interfuncionales dedicados diseñaron e implementaron estrategias de operación estándar y de control que utilizan la densidad, el flujo y la tecnología de control experto existentes junto con los sistemas CiDRA recientemente desarrollados CYCLONEtrac OSM y CYCLONEtrac PST. Se presentarán datos reales de planta así como una descripción de la tecnología que los respalda.

*Autor de contacto para correspondencia: Christian O’Keefe, PhD, CiDRA Minerals Processing, Wallingford, CT USA +1-860-966-8735, cokeefe@cidra.com

PALABRAS CLAVE: Clasificación, Instrumentación de Proceso, Hidrociclones, Conminución

1. INTRODUCCIÓN

En el proceso de beneficio de minerales que incluye la molienda, tanto la recuperación como la ley del mineral dependen en gran medida del tamaño de partícula que se entrega a los procesos de beneficio aguas abajo. Basándose en la rentabilidad deseada para la planta, se establece un tamaño de molienda óptimo u objetivo. Este artículo presenta una solución al desafío de mantener un tamaño óptimo de partícula en la alimentación de la flotación. En general, al reducir la cantidad de material grueso y mantener la capacidad de producción, se puede mejorar significativamente el flujo de caja de la planta. Debido a los diseños del proceso y del equipo mismo, el problema con este material grueso generalmente se presenta de dos formas. La primera forma se relaciona con la entrega indeseada al circuito de flotación de partículas extremadamente gruesas o de sobretamaño, como es el caso de pebbles y piedras que pueden tener varios milímetros o más. A menudo esto es el resultado de algunos sucesos específicos, tales como rotura del harnero del trómel en las descargas del molino, diversos malfuncionamientos de los hidrociclones clasificadores, o excesiva alimentación de alta densidad al hidrociclón. La segunda forma en que se presenta este problema se relaciona con la entrega indeseada de partículas gruesas que están sólo levemente por sobre el tamaño objetivo para la alimentación de la flotación, lo que generalmente se encuentra en un rango entre 100 μm y 200 μm . Esto generalmente es ocasionado por un control inadecuado del proceso de molienda o deficiencias en la clasificación realizada por el hidrociclón. El primer desafío, que se relaciona con la presencia de un material muy grueso, existe en diversos grados en muchas plantas, mientras que el segundo es un problema general que se encuentra en la mayoría de las plantas.

Río Tinto Kennecott ha implementado dos soluciones relacionadas para encarar estos dos desafíos de ya larga data. Estas soluciones han sido posibilitadas por medio de innovadoras tecnologías de instrumentos. Esta nueva instrumentación que trabaja en tiempo real incluye sensores sólidos que se instalan en las tuberías de overflow de cada hidrociclón y entregan información del funcionamiento de cada uno de ellos, así como también de la batería o conjunto completo de hidrociclones. Estos sistemas entregan información del tamaño del producto del overflow en tiempo real, incluyendo la detección de pebbles/piedras y su rastreo, de manera que los operadores puedan tomar acciones correctivas inmediatas o aplicar diversas estrategias de control.

Ambas soluciones han sido implementadas en Río Tinto Kennecott y serán descritas en detalle. Se incluirá la declaración de los problemas, los diseños de sistema, estrategia de control, instalación y mantención, datos de validación y ejemplos con información real de la planta. La convención utilizada en este artículo con relación al tamaño de partícula es la siguiente: “pebbles” son partículas de 6mm – 12mm y de mayor diámetro; “piedras” son partículas de más de 12 mm de diámetro;

2. CONTROL DE PRESENCIA DE PEBBLES/PIEDRAS EN LA FLOTACIÓN

2.1 Declaración del Problema – Pebbles/Piedras

Los hidrociclones son aparatos relativamente simples y de alto rendimiento con una gran capacidad para clasificar las partículas por dimensiones. Se usan comúnmente en un circuito cerrado con los molinos de molienda, generalmente molinos de bolas, para controlar el tamaño de material que se envía a los procesos de enriquecimiento aguas abajo. La necesidad de extraer el máximo valor de los hidrociclones significa que los intervalos de mantención serán extendidos tanto cuanto sea posible, incluyendo el uso de la filosofía de intervalo de mantención que se basa en el reemplazo o reacondicionamiento de la unidad sólo cuando falle. Además, maximizar el retorno de la inversión en el equipo requiere operar la planta a la mayor capacidad de rendimiento posible sin comprometer la seguridad ni producir un desgaste excesivo del equipo o reducir la recuperación. Esto presenta una amplia variedad de condiciones de operación pues un hidrociclón puede estar cerca de una mantención requerida, mientras otros son nuevos o han sido recientemente acondicionados. Ya sea por cambios en las condiciones de operación de la planta o por

desgaste o daños, los hidrociclones pueden no operar de acuerdo con su diseño, lo que resultará en la presencia de pebbles y piedras en el overflow. Los pebbles y piedras en el overflow generalmente se traspasan directamente al sistema de flotación. Los pebbles y piedras en la alimentación de la flotación perjudican el rendimiento económico del concentrador pues disminuyen la recuperación aprovechable de mineral, reducen la eficiencia volumétrica en la celda de flotación y, en algunos casos, bloquean el paso del flujo en las celdas, produciendo detenciones parciales o completas de la planta. También se ha detectado que los pebbles y piedras dañan los equipos aguas abajo del circuito de molienda o causan obstrucciones en las tuberías y los espesadores.

La detección de pebbles y piedras en el overflow consolidado de una batería de hidrociclones por medio de sensores acústicos o monitores de partículas del tipo tradicional tiene la desventaja de la baja sensibilidad, tasas de actualización reducidas e incapacidad de distinguir cuál de los hidrociclones está traspasando los pebbles o las piedras. Determinar la fuente exacta de estos pebbles y piedras puede ser complicado y demoroso para el caso de cuadrillas de operación muy ocupadas y además, generalmente, es una actividad que debe ser realizada en forma manual. Mientras se trabaja en la solución del problema los pebbles y piedras continúan uniéndose al circuito de flotación provocando con ello una considerable interrupción del circuito hasta que el hidrociclón que está ocasionando la perturbación se saca de la línea. En algunas ocasiones se utilizan harneros en los overflow de los hidrociclones para evitar que los pebbles y piedras continúen su curso aguas abajo. Este escenario no proporciona un medio para detectar los pebbles y las piedras o alguna forma de discernir de donde provienen. El uso de harneros para este objetivo no es necesariamente una opción viable debido al incremento de los costos de capital y de operación, además de los requerimientos de espacio.

2.2 La solución de Río Tinto Kennecott para el Control de Pebbles/Piedras en la Flotación

Con el apoyo de Río Tinto, CiDRA ha desarrollado e implementado una nueva tecnología (CYCLONÉtrac OSM) para monitorear las líneas de overflow de cada hidrociclón y detectar la presencia de pebbles/piedras y el aumento del P80 que va asociado a dicho incremento. Esta tecnología detecta los pebbles y piedras (del rango 6-12mm y de mayor tamaño) que pasan a través del overflow del hidrociclón. Al monitorear el overflow en lugar del flujo de fondo (underflow), estos pebbles y piedras pueden ser detectados sin importar la causa, ya sea que se deba a un vértice obstruido, una condición de acordonamiento, ciertas condiciones de operación, daños en el hidrociclón o su desgaste.

La información obtenida de estos sensores se envía a la sala de control donde los operadores están constantemente monitoreando el estado del overflow de cada hidrociclón a través de una pantalla dedicada que entrega la siguiente información, como se observa en la Figura 1:

1. Estado de cada hidrociclón
2. Condición de alarma de una batería
3. Tasa actual de pebbles/piedras en cada hidrociclón
4. Tendencia histórica de tasa de pebbles/piedras en cada hidrociclón

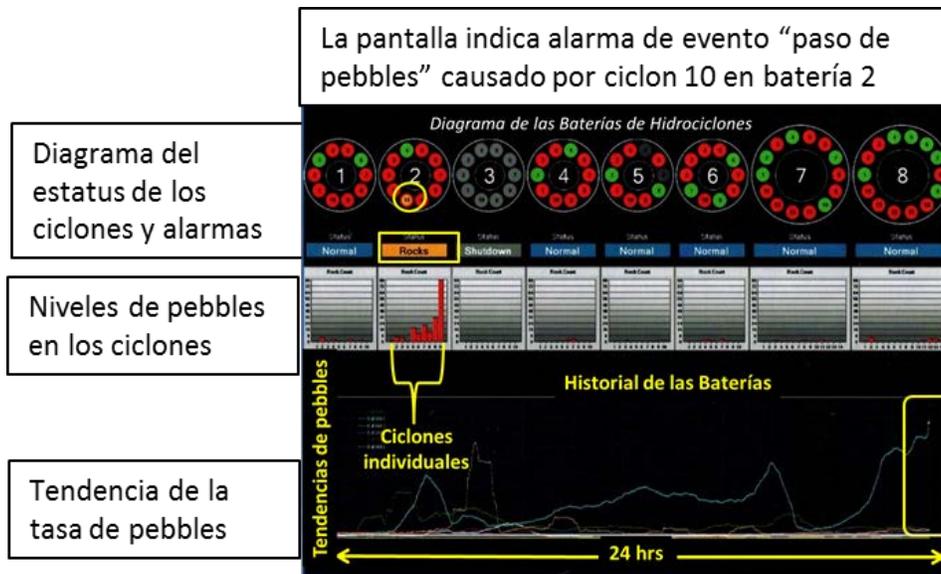


Figura 1 Despliegue de pantalla del CYCLONEtrac OSM con el estado de pebbles/piedras en la batería y en los hidrociclones individuales

El operador utiliza esta información para determinar si existe algún problema en el funcionamiento de una batería completa o en un hidrociclón individual. El operador distingue entre los dos tipos de eventos consultando las tendencias de nivel del evento en los hidrociclones (Figura 2), entonces el hidrociclón que está fallando puede ser aislado y reemplazado por otro. En otros casos, sin embargo, son varios hidrociclones los responsables de la tendencia al rápido aumento de eventos de paso de pebbles/piedras en una batería. En este caso el operador puede ajustar los parámetros de operación (por ej. la densidad de alimentación al hidrociclón) para que el sistema vuelva al estado regular (Figura 3).

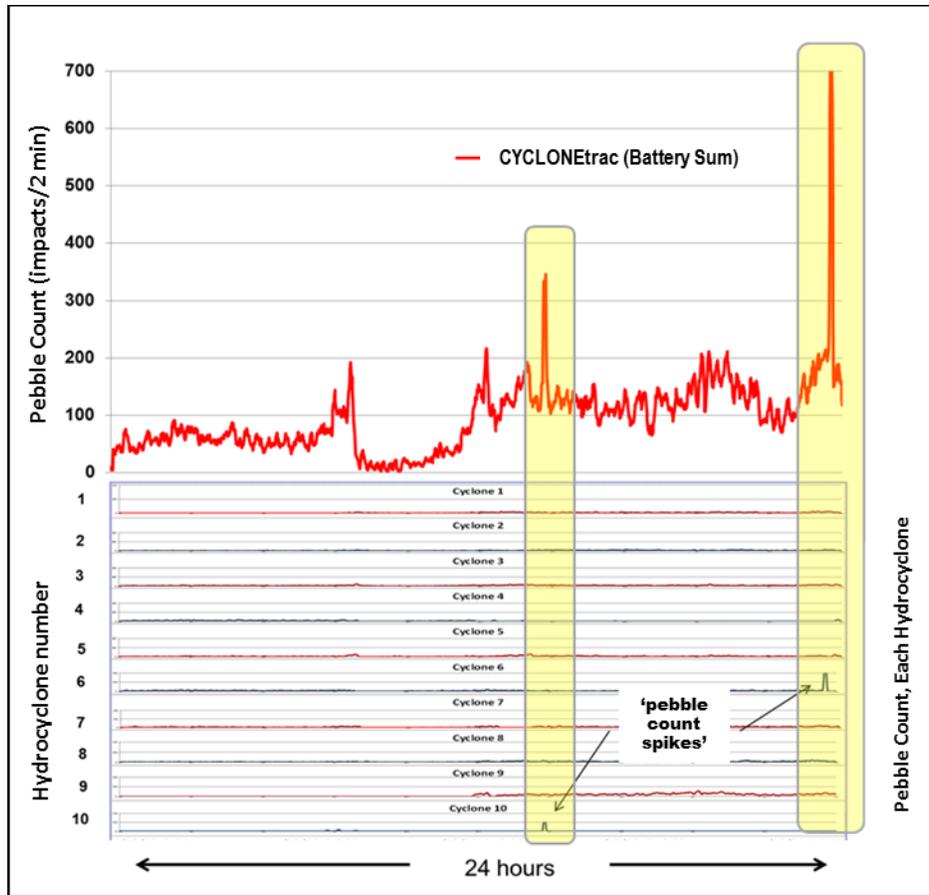


Figura 2 Un hidrociclón único causa el overflow combinado de la batería que se manifiesta como un salto en la tendencia de pebbles/piedras.

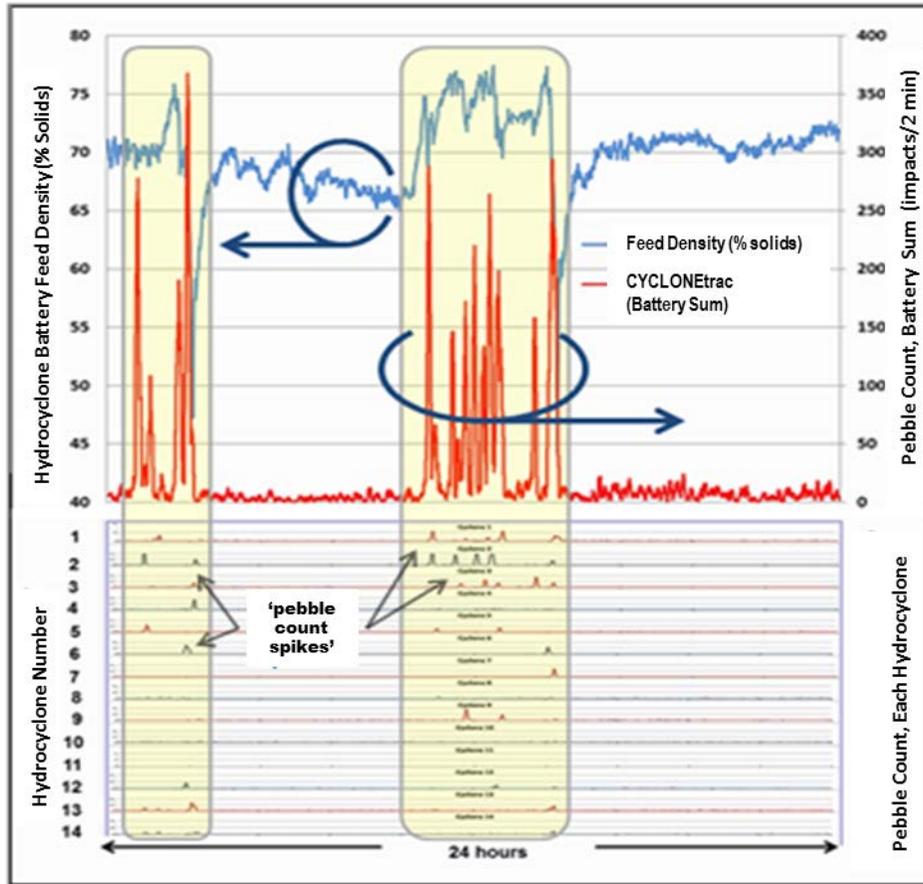


Figura 3 Varios hidrociclones causan el overflow combinado de la batería para desplegar saltos en la indicación de la tendencia pebbles/piedras, lo que coincide con los aumentos en la densidad de la alimentación a la batería.

Durante el desarrollo del sistema CYCLONetrac OSM se consultó a los operadores de la sala de control en forma regular para recoger su retroalimentación en los despliegues de pantalla, tendencias y condiciones de alarma. Con el apoyo del equipo de trabajo técnico del concentrador, los pasos de pebbles/piedras fueron investigados para poder determinar la respuesta óptima a dichos eventos y para detectar si los umbrales de alarma del OSM habían sido adecuadamente ajustados. Entonces se desarrolló una estrategia de control y respuesta y se capacitó al personal de operaciones durante la fase de implementación. El sistema de control se implementa manualmente y se sigue el procedimiento que se muestra en la Figura 4.

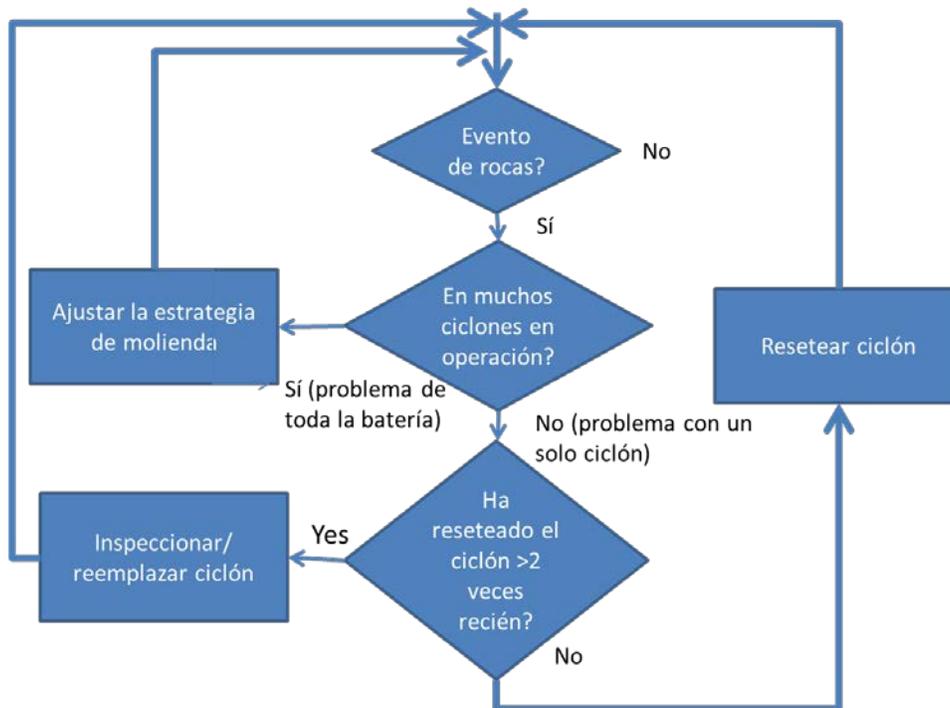


Figura 4 Estrategia de control y respuesta implementada manualmente

2.3 Sistema de Sensor – Control de Pebbles/Piedras en la Flotación

Una de las competencias esenciales de CiDRA es la medición de información acústica a través de la pared de una tubería (Gysling et al, 2005, y O’Keefe et al, 2007). CiDRA ha utilizado su conocimiento especializado en esta área para crear el sistema CYCLONetrac OSM. La hipótesis física para este sensor se basa en la observación que los pebbles o piedras tienen una probabilidad significativa de golpear el interior de la tubería de overflow de un hidrociclón cuando pasan por ella. Incluso en presencia de revestimientos de goma, la partícula que golpea transmite suficiente energía mecánica en forma de ondas acústicas a través del revestimiento y a través de la pared de la tubería hacia su exterior. En el sistema CYCLONetrac OSM de CiDRA un sensor de tensión – de propiedad de CiDRA – se fija mecánicamente al exterior de la tubería. La tensión inducida por la partícula o la onda acústica tensionan la pared de la tubería y así también al sensor y crean una señal eléctrica característica de la partícula. Un algoritmo único extrae esta señal de muy bajo nivel separándola del ruido de fondo para identificar el paso de un grupo de pebbles o piedras durante un breve período de tiempo conocido como el evento de paso de pebbles. El sistema informa la tasa o frecuencia con que estos eventos de pebbles ocurren y una alarma suena cuando los límites de esa tasa son sobrepasados. Al utilizar un sensor acústico distribuido en lugar de un sensor de punto, la probabilidad de detectar un pebble o una piedra atravesando y golpeando el interior de la tubería de overflow se incrementa grandemente.

El proceso de instalación consiste en 1) limpieza y posiblemente arenado de la tubería para eliminar acumulación de material, salpicaduras de pintura y otras protuberancias; 2) enrollar la banda de sensores alrededor de la tubería y encinarla utilizando tornillos imperdibles; 3) cubrir la banda de sensores con una cubierta hermética e instalar el cable de la banda al preamplificador integrado dentro de la cubierta del sensor; 4) montar los transmisores y las cajas de conexión de potencia/comunicación 5) conectar las líneas de potencia/comunicación entre los cabezales de sensor y los transmisores y entre los transmisores y las cajas de conexión de potencia/comunicación; 6) alimentar las cajas de conexiones; y 7) conectar una línea Ethernet entre las cajas de conexiones y el computador CYCLONetrac que generalmente se instala en la sala de control. En la Figura 5 se muestran fotos del sistema instalado. En la foto superior derecha la

fotografía muestra el cabezal del sensor instalado en la tubería de overflow, en la de la mano izquierda se puede ver el transmisor y la caja de conexiones de potencia/comunicación y en la foto inferior se observa un sistema completo de batería. El proceso de instalación no es invasivo y permite que la batería de hidrociclones pueda seguir operando.



Figura 5 Sistema CYCLONetrac OSM instalado con transmisor y caja de conexiones (foto superior izquierda), cabezal del sensor (foto superior derecha) y una batería de hidrociclones completamente instrumentada (foto inferior)

Debido a la naturaleza no invasiva del instrumento, no se requiere mantención con programación regular y no existe ningún mecanismo de desgaste inherente en el instrumento. El cabezal del sensor puede ser reutilizado de manera que si se reemplaza una tubería de overflow se saca el cabezal de la tubería y se instala en la nueva. Al reinstalar no se requiere calibración alguna ni poner el instrumento en cero.

El sistema CYCLONetrac OSM ha sido comercialmente desarrollado en el concentrador de cobre Copperton de Río Tinto Kennecott en Utah, USA desde 2010 (Cirulis et al, 2011). Durante el desarrollo del sistema CYCLONetrac OSM se registró información acústica en tiempo real tanto de las condiciones de operación normales como anormales, incluyendo muchos eventos de paso de pebbles. Las series de datos registrados en el tiempo se utilizaron para desarrollar y optimizar un algoritmo - que tiene derechos de propiedad - que detecta y despliega los cambios en las tendencias de paso de pebbles en los hidrociclones individuales y la tendencia consolidada de cada conjunto de hidrociclones. La evaluación de las tendencias permitió ajustar dichas tendencias y las alarmas equilibrando la sensibilidad con respecto de las falsas alarmas. El adecuado ajuste de los límites ha permitido a los operadores controlar eficazmente el proceso de separación por medio de intervención manual. Al tiempo que el sistema

despliega la tendencia de diversos tamaños de material grueso, el tamaño mínimo para detección repetible de las partículas individuales es de aproximadamente 6 a 12 mm (Figura 6).



Figura 6 Durante la validación en terreno se analizaron 78 muestras de tamiz y se compararon con la contabilización de pebbles del OSM. Se muestra un ejemplo de material recolectado durante un paso de pebbles/piedras.

2.4 Datos de Planta

La implementación del sistema CYCLONetrac OSM ha reducido de manera importante el número de eventos de paso de pebbles en el concentrador Copperton de Río Tinto Kennecott, como se demuestra por la reducción en la cantidad de detenciones que se ha necesitado para limpiar las filas de flotación. El tiempo de detención de las filas de flotación se ha reducido y ha habido una notoria disminución del componente de desgaste. Las celdas de flotación en la sección rougher-scavenger son Wemco y la reducción de las partículas gruesas dentro de la fila de flotación ha mejorado el rendimiento de las celdas, particularmente debido a que se ha permitido que el falso fondo trabaje de acuerdo con su diseño.

2.5 Conclusión – Control de Presencia de Pebbles/Piedras en la Flotación

La tecnología CYCLONetrac OSM y la participación del operador permite reducir en gran medida la cantidad de tiempo en que los pebbles o piedras pasan a través del overflow (evento de paso de pebbles). Permite al personal de planta identificar el daño al hidrociclón o exceso de desgaste y asegurarse si la causa del paso de los pebbles reside o no en un circuito de molienda. Durante varios años de operación comercial en Río Tinto Kennecott el sistema CYCLONetrac OSM ha probado ser valioso en la detección de grandes cantidades de pebbles y piedras en el overflow del hidrociclón, permitiendo tomar una acción

correctiva inmediata y ayudando a evitar obstrucciones severas en la flotación rougher o en los circuitos de relave.

3. CONTROL DE MOLIENDA POR MEDIO DE RASTREO DE TAMAÑO DE PARTÍCULAS EN EL HIDROCICLÓN

3.1 Declaración del Problema – Control de Molienda Facilitado por CYCLONetrac PST

La recuperación de mineral valioso se relaciona fuertemente con la distribución del tamaño de partícula del material entregado al circuito de flotación. La recuperación de material liberado y mixto (middling) de +150 micrones es significativamente menor que la de material de -150 micrones. Esto se debe en parte a la reducción de liberación de mineral y a las limitaciones en la capacidad de recuperar partículas gruesas por medio de la flotación.

La capacidad de tomar decisiones basadas en la compensación o ventaja comparativa en términos de rendimiento y recuperación depende de la capacidad de medir el tamaño de la molienda. Para lograr un rendimiento y recuperación óptimos, el tamaño de la molienda que se alimenta a la flotación debe ser controlado y estabilizado en tiempo real. Actualmente existen tres métodos para determinar el tamaño de molienda en Río Tinto Kennecott, todos con niveles variables de precisión y frecuencia. A saber: Análisis granulométrico en laboratorio de muestras de cabezas de flotación rougher, muestreo en línea del overflow consolidado de la batería de hidrociclones, y el procedimiento de Balanza Marcy©.

El análisis granulométrico de las muestras obtenidas de las cabezas de la flotación de rougher se considera la medición más confiable de la distribución del tamaño de partículas que se pueda presentar a las celdas rougher de flotación. Además, el muestreo y el tiempo de procesamiento retrasan la obtención de resultados por 24 horas. Esta demora hace difícil utilizar la información del tamaño de molienda para un control de proceso en tiempo real y para la toma de decisiones. Además, la alimentación de rougher es una combinación de múltiples overflows (reboses) de hidrociclones de molinos de bolas y, por lo tanto, no representa el funcionamiento de ningún circuito individual de molino de bolas. Por lo tanto, las muestras del flujo de rougher no pueden ser utilizadas en una estrategia de control de molino de bolas para controlar el tamaño de partículas en tiempo real.

El sistema de muestreo en línea y los monitores de tamaño de partícula de ultrasonido se instalaron en cada una de las baterías en el año 2004. Estos sistemas toman periódicamente muestras muy pequeñas del overflow consolidado de los hidrociclones. Luego se acondiciona la muestra y se mide el tamaño de partícula con un monitor de tamaño de partícula por medio de ultrasonido. Desde su instalación, los instrumentos han demostrado requerir una mantención intensiva y como resultado de ello su uso ha decaído considerablemente.

El procedimiento de balanza de Marcy, basado en un procedimiento descrito por B.A. Wills (1988) como “Un método rápido para medir la fineza de la molienda,” lo utiliza el personal de operaciones para obtener una indicación del tamaño de molienda en un momento específico. El procedimiento es relativamente rápido de ejecutar; sin embargo, es propenso a errores de muestreo y de procesamiento, lo que a su vez resulta en una medición inadecuada del tamaño de partícula. Más aún, la naturaleza manual del procedimiento impide que sea usado para el control automático de procesos.

Idealmente, y para lograr control óptimo del proceso, se necesita una medición precisa en tiempo real que debe, además, unirse a un sistema de control automático robusto que pueda maximizar el valor de la operación de molienda en presencia de condiciones de operación y escenarios cambiantes. Este sistema de medición de tamaño de partícula debería entregar una indicación del tamaño de partícula tanto para la batería de hidrociclones como para cada hidrociclón individual. El sistema no debería requerir muestreo ni estar compuesto de partes móviles y debería ser robusto y con muy pocos requerimientos de mantención.

En ausencia de un indicador de tamaño de partícula en tiempo real, para supervisar el tamaño del corte, se usa generalmente la medición de presión así como la medición y el control de densidad. Históricamente, la filosofía de control de densidad de alimentación al ciclón en Río Tinto Kennecott ha sido maximizar la adición de agua para lograr la mínima densidad posible dentro de los límites o restricciones. Los medidores de densidad de alimentación al ciclón no fueron necesarios en esta filosofía por lo tanto la atención a la calibración y la mantención se redujeron y como resultado de ello, la confianza en los valores de densidad también declinó. Con el transcurso del tiempo, la mayor restricción para el circuito de molino de bolas y a menudo también para la línea completa de molienda, fue entonces la capacidad de alimentación de la bomba de alimentación del ciclón. Las restricciones se resolvieron mejorando los impulsores y motores de la bomba de alimentación del hidrociclón. Además de las mejoras a la bomba, los medidores de densidad de alimentación al ciclón fueron llevados a un rango de precisión aceptable por medio de calibración y reorientación y se desarrolló una estrategia de control para permitir un punto de referencia objetivo por el operador y, a su vez, así se ayudó a restablecer la confianza en las mediciones.

3.2 Río Tinto Kennecott – Solución para Maximizar el Valor a través del Control de Molienda

3.2.1 Esquema de Control – Control de Molienda Facilitado por CYCLONEtrac PST

La optimización del tamaño de molienda en tiempo real requiere la concurrencia de tres componentes críticos. Primero, los elementos clave del proceso deben ser medidos con precisión y en tiempo real. Esto incluye la densidad y el tamaño de partícula, siendo este último actualmente totalmente logrado con el sistema CYCLONEtrac PST. Segundo, el proceso debe estabilizarse utilizando estrategias de control de lazo cerrado. Tercero, el proceso debe ser dirigido a un punto de referencia óptimo. En Río Tinto Kennecott el molino de bolas y los hidrociclones están en un circuito cerrado. Los elementos principales de la eficiencia del hidrociclón son la densidad de alimentación y la presión de funcionamiento. Sin embargo, la capacidad de tratamiento, dureza del mineral y la recirculación de cargas son variables clave en la eficiencia de la molienda. Para poder abordar el segundo componente crítico de la optimización del tamaño de molienda, se ha desarrollado un esquema de control que utiliza la medición en tiempo real del PST para estabilizar el overflow de +150um (100 mallas) del hidrociclón. La base del control reside en la manipulación de la densidad de alimentación al hidrociclón dentro de otras restricciones del circuito, como se ve en la Figura 7.

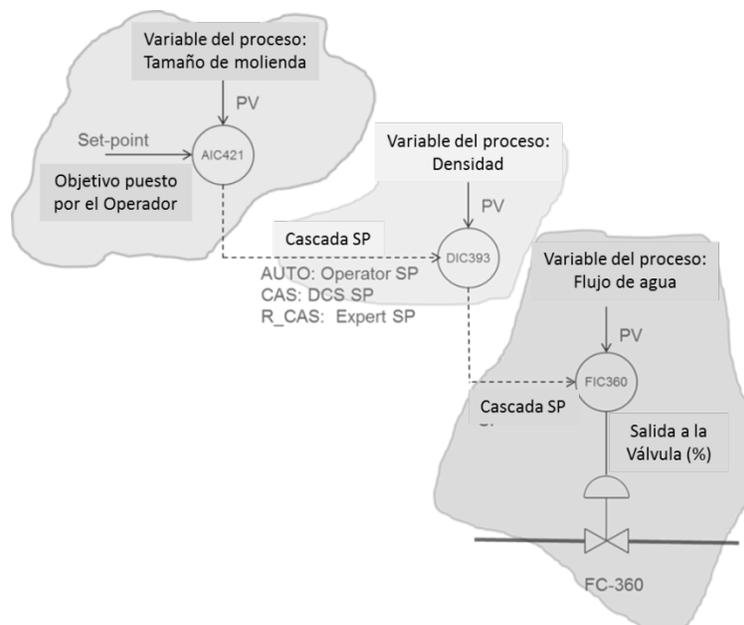


Figura 7 Circuitos de control en cascada utilizados para optimizar el valor de la molienda

La Figura 8 muestra la estabilidad del tamaño de molienda bajo control automático. La variabilidad natural del tamaño de molienda la muestra la señal del CYCLONetrac PST a la izquierda de la Figura 8. El tamaño de molienda es llevado a un valor determinado observando la señal PST y ajustando manualmente la densidad de alimentación. Sin control automático, el tamaño de molienda fluctúa mientras la densidad se mantiene constante. Finalmente, en el lado derecho del gráfico se muestra la estabilidad del tamaño de molienda bajo control automático. El sistema de control ajusta automáticamente el valor determinado de la densidad para mantener el tamaño de la molienda en ese punto.

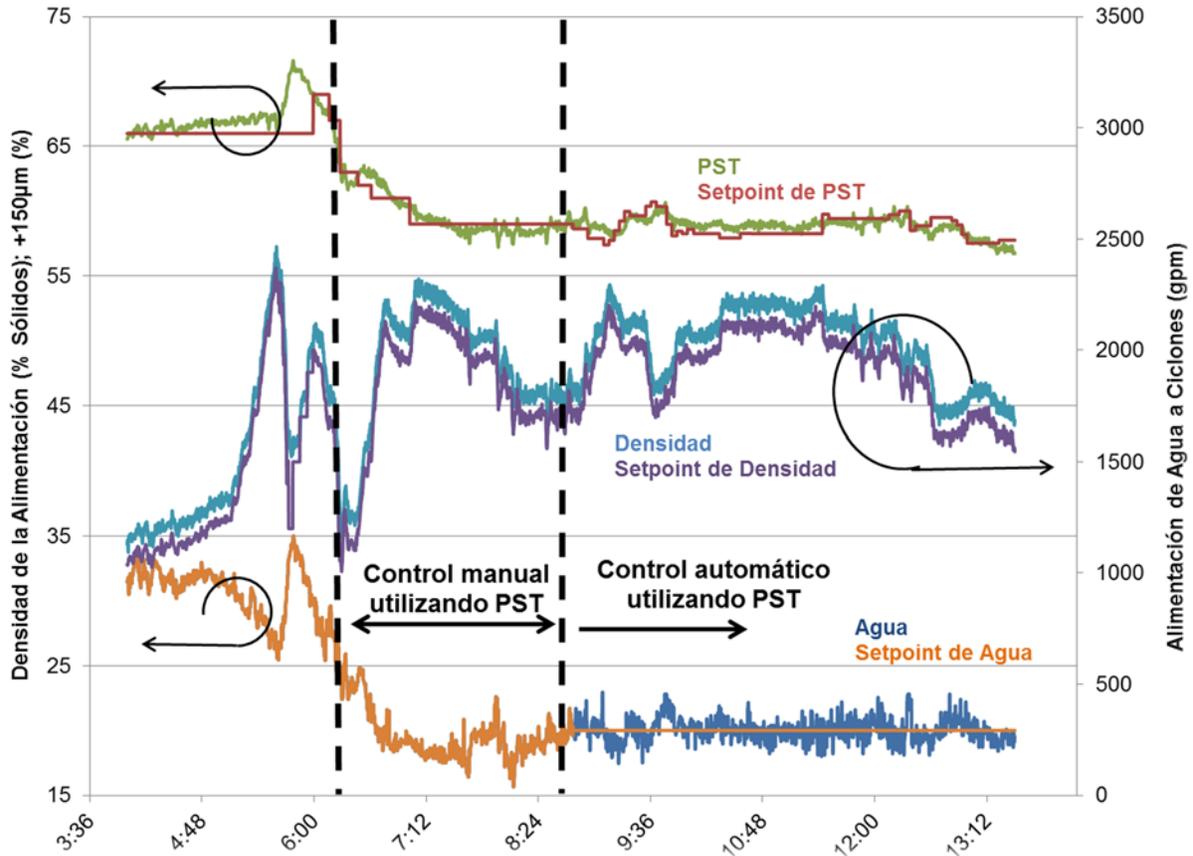


Figura 8 Manipulación de densidad para control con PST

El esquema de control de tamaño de molienda por lazo cerrado puede usarse ahora para mantener el consumo de potencia objetivo del molino de bolas y recircular la carga de modo de conseguir la máxima eficiencia de la molienda y evitar las sobrecargas del molino de bolas y las condiciones de acordonamiento en el hidrociclón. Los ensayos han probado que es posible mantener el rendimiento y el consumo de potencia objetivo del molino de bolas y a la vez reducir el tamaño de molienda. La Figura 9 muestra de qué forma el tonelaje del molino SAG se mantiene constante mientras el porcentaje de overflow de la batería de hidrociclones de +150 micrones cae significativamente y al mismo tiempo se mantiene el consumo de potencia deseado. El facilitador clave para la reducción del tamaño de molienda en este caso fue la subutilización del molino de bolas indicado por un consumo de potencia por sobre el objetivo. Una vez que la densidad de alimentación se redujo para aumentar la carga de recirculación, tanto la potencia del molino como el tamaño de partícula del overflow del ciclón disminuyeron.

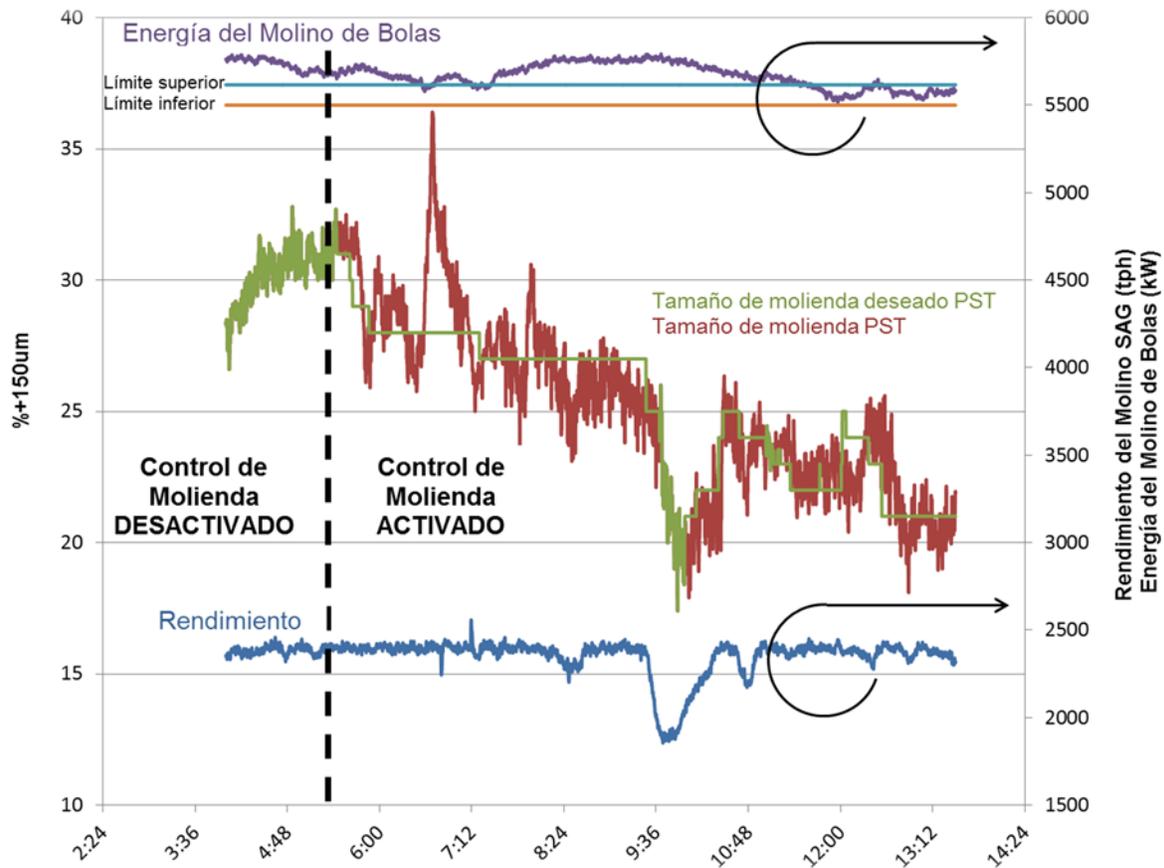


Figura 9 Reducción del tamaño de molienda con TPH constante y consumo de potencia objetivo del molino

Para mantener el tamaño de partícula y el consumo de potencia objetivos, se manipula la densidad de la alimentación del ciclón y el tamaño de partícula. La Figura 10 a continuación muestra los cambios tanto en el tamaño de partícula como en la densidad de alimentación del ciclón para mantener la eficiencia del molino.

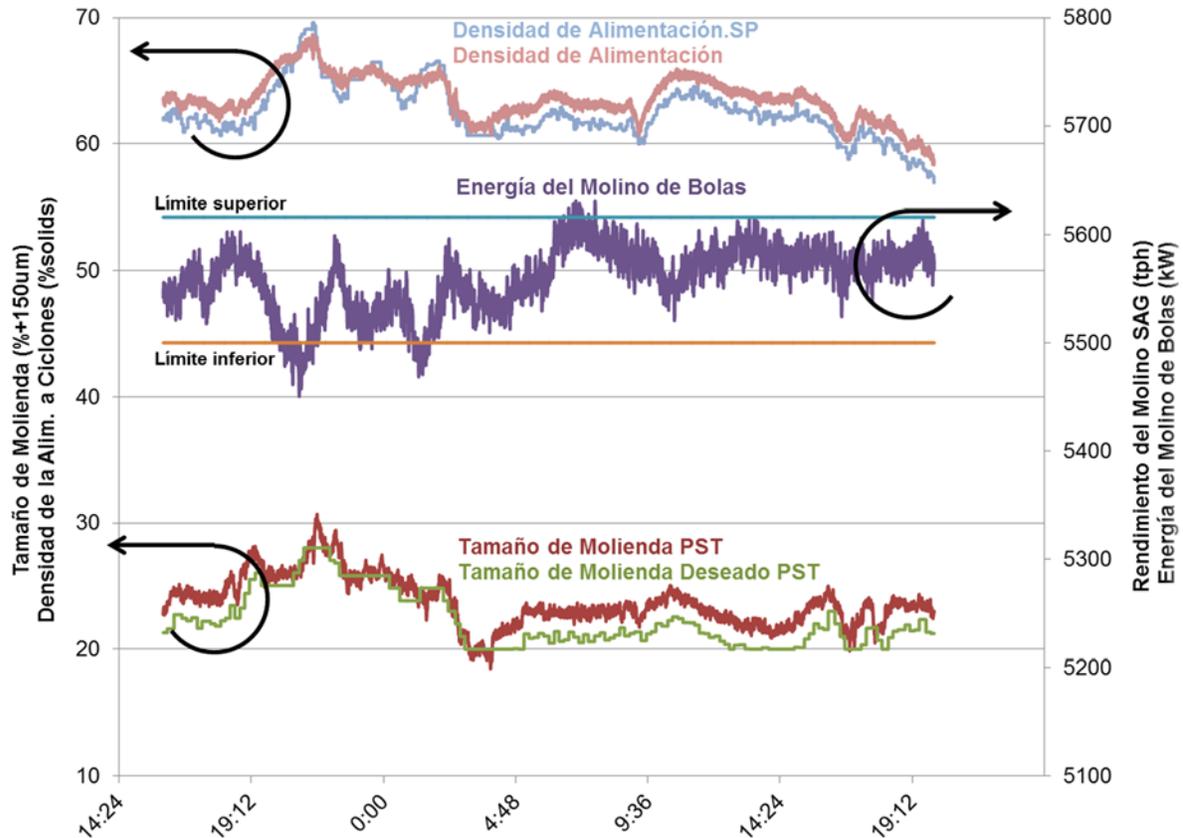


Figura 10 Ejemplo de seguimiento de tamaño de partícula que condujo a los cambios en el punto de referencia de la densidad y del consumo de potencia en el molino

3.3 Sistema de Sensor – Control de Molienda Posibilitado por CYCLONEtrac PST

3.3.1 Descripción del Sistema de Sensor

El sistema CYCLONEtrac PST instalado en Río Tinto Kennecott consiste en 88 conjuntos de cabezales de sensor como se observa en la Figura 11 (uno para cada hidrociclón), ocho cajas de conexiones (una para cada batería), y una computadora para la sala de control, como se muestra en la Figura 12. El cabezal del sensor está compuesto de una sonda reforzada de diseño registrado que se introduce en la tubería de overflow y hace contacto con el flujo de overflow y con un conjunto de electrónicos integrado que está protegido 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, ésta efectivamente “escucha” los impactos de las partículas individuales. La respuesta al impacto es procesada por un conjunto de elementos electrónicos integrados para inferir la distribución del tamaño de partículas en el flujo de pulpa. El conjunto de cabezal del sensor es alimentado por 24V y se comunica con una caja de conexiones por medio del protocolo MODbus.



Figura 11 Izquierda, sensor del CYCLONetrac PST. Derecha, sensor del CYCLONetrac PST instalado en la tubería

Baterías de Hidrociclones

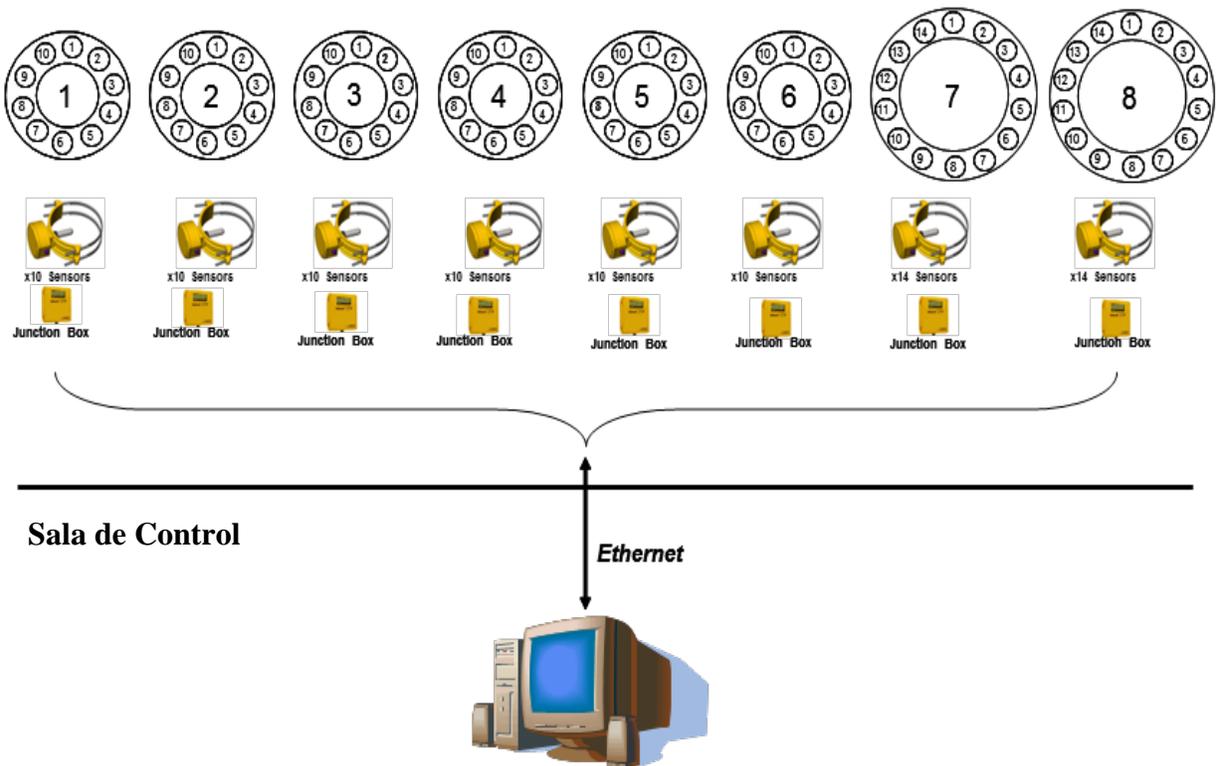


Figura 12 Diagrama del sistema CYCLONetrac PST instalado en Río Tinto Kennecott

Cada caja de conexiones tiene capacidad para conectar hasta 16 conjuntos de sensores, tanto a la corriente continua (DC) como a los sistemas de comunicación. La caja de conexiones toma el protocolo de comunicaciones MODbus de cada conjunto de sensores y lo traduce a información en una red Ethernet industrial y luego la transmite a una computadora en la sala de control. La computadora de la sala de control recolecta las mediciones de cada dispositivo y las traspasa al Sistema de Control Distribuido (DCS) de Río Tinto Kennecott a través de un túnel OPC.

3.3.2 Validación del Sistema de Sensor – Control de Molienda Facilitado por CYCLONEtrac PST

Después de que el sistema CYCLONEtrac PST fue instalado en Río Tinto Kennecott, se llevó a cabo una campaña de muestreo para validar el funcionamiento del sistema. El personal de CiDRA y Río Tinto Kennecott trabajaron en estrecha colaboración para detectar las condiciones de operación de los hidrociclones y del circuito de molienda dentro de un rango de tamaños de molienda. Durante la campaña de validación se recolectaron más de 130 muestras de overflow de hidrociclones individuales. Se realizó el análisis granulométrico de las muestras y los resultados fueron comparados con los del sistema PST. El tamaño específico de distribución de partícula que le interesa a Río Tinto Kennecott es el porcentaje de material sobre 150 micrones (100 mallas). Como se indicó anteriormente, la recuperación de mineral valioso cayó significativamente en tamaño de molienda superior a 150 micrones. Así, el sistema PST fue ajustado a la medida de la necesidad para proporcionar una indicación directa en tiempo real del porcentaje por peso del flujo +150 micrones.

La Figura 13 muestra la señal en tiempo real recibida del sistema CYCLONEtrac PST con las muestras de validación superpuestas. Durante la campaña de validación, la variabilidad del muestreo se determinó como $\pm 3.1\%$ absoluto. Esta variabilidad se indica en la Figura 13 con las barras de error. La Figura 14 muestra las 130 muestras de validación comparando el porcentaje de análisis granulométrico de +150 micrones con las lecturas del PST. La campaña de validación ha demostrado que el sistema PST es capaz de predecir el porcentaje +150 micrones con una incerteza absoluta de $\pm 6.3\%$. Tomando en consideración la variabilidad del muestreo y la precisión del análisis granulométrico, los resultados de la campaña de validación aseguran a CiDRA y Río Tinto Kennecott que pueden confiar en que el sistema PST les proporcionará una medición de tamaño de molienda en tiempo real que puede usarse para una toma de decisión basada en el valor y control del proceso.

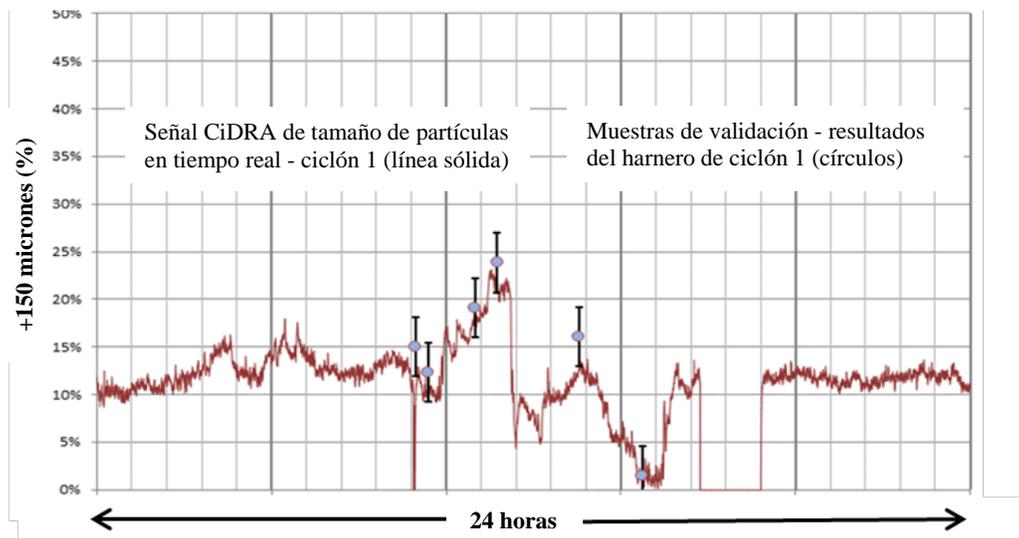


Figura 13 Hidrociclón 1 – Señal CiDRA vs Muestras de Validación

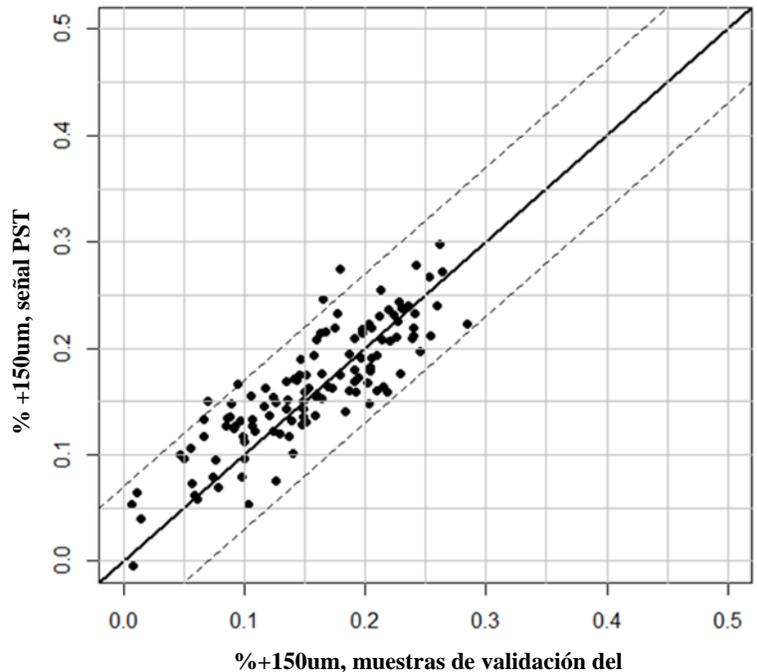


Figura 14 Porcentaje Fracción Másica +150 micrones, Señal PST vs Muestras de Validación

3.4 Conclusión – Control de Molienda Facilitado por CYCLONetrac PST

El sistema de control de molienda desarrollado por Río Tinto Kennecott utilizando el sistema CYCLONetrac PST de CiDRA ha probado ser muy eficaz en facilitar el control del circuito de molienda en Río Tinto Kennecott y ha conducido a la implementación de estrategias de control basadas en el valor al incorporar las ventajas comparativas de la capacidad de producción, tamaño de partícula y recuperación. Las mejoras en la eficiencia del circuito de molienda obtenidas del nuevo sistema de control de molienda han producido una reducción del tamaño de molienda de aproximadamente 30% con la misma capacidad de producción, o cuando el flujo aguas arriba no pone restricciones al circuito del molino de bolas, se ha conseguido un aumento de capacidad de producción de hasta el 10% con el mismo tamaño de molienda.

4. CONCLUSIÓN – GENERAL

Río Tinto Kennecott ha implementado soluciones para abordar dos importantes problemas de larga data relacionados con el material grueso presente en los flujos de overflow de los hidrociclones. Ambas soluciones son sistemas completos, basados en tecnologías de instrumentación de última generación que han sido desarrolladas y validadas en conjunto por Río Tinto Kennecott y CiDRA a lo largo de varios años. La primera solución habilitada por el sistema CYCLONetrac OSM proporciona información en tiempo real que ha sido utilizada para desarrollar prácticas de operación que han eliminado las detenciones del circuito de flotación producidas por el bloqueo de las celdas. La segunda solución facilitada por el sistema CYCLONetrac PST ha sido utilizada para desarrollar la primera generación de control lógico de lazo cerrado que regula el porcentaje de alimentación de flotación +150 micrones a un tamaño más fino de molienda, mientras se mantiene la producción deseada de la línea de molienda. Esto se ha usado para optimizar la eficiencia de la molienda del molino de bolas, equilibrar la molienda en toda la planta y tomar decisiones entre producción y recuperación de mineral basadas en el valor. Se ha

presentado información de la planta con ejemplos operacionales que demuestran la forma en que se usan los sistemas para entregar valor.

AGRADECIMIENTOS

CiDRA agradece la cooperación recibida de Río Tinto Kennecott y de la gran cantidad de miembros del personal durante el desarrollo, implementación y en la fase operativa de este trabajo.

REFERENCIAS

Cirulis, D. & Russell, J. (2011) 'Cyclone Monitoring System Improves Operation at KUC's Copperton Concentrator', *Engineering and Mining Journal*, Dec. 2011, pp. 44-49

Gysling, D.L., Loose, D.H. & van der Spek, A.M. (2005) 'Clamp-on, sonar-based volumetric flow rate and gas volume fraction measurement for industrial applications', *Flomeko*, Jun. 6-9.

O'Keefe, C., Maron, R. & Gajardo, L. (2007) 'Application of passive sonar technology to minerals processing applications', *Proceedings of the 4th International Meeting on Mining Plant Maintenance*, Gecamin, Viña del Mar, Chile, 5-7 Sept.

Wills, B.A. (1988) 'Technical Note: A Rapid Method for Measurement of Fineness of Grind', *Minerals Engineering*, Pergamon Press plc, vol. 1, no. 1, pp. 81-84.