

Américo Zuzunaga¹, Peter Ameluxen², Robert Maron³, Alejandro Jaque⁴

1. *CiDRA Minerals Processing, E.E.U.U.*
2. *Aminpro, Peru*
3. *CiDRA Minerals Processing, E.E.U.U.*
4. *CiDRA Minerals Processing, Chile*

En muchas plantas concentradoras los procesos de flotación y molienda son, en la mayoría de casos, analizados y optimizados de forma separada; a pesar de que el rendimiento del circuito de flotación es altamente influenciado por el tamaño de molienda.

En este artículo se van a explorar los efectos del circuito de clasificación y cómo la falta de instrumentación confiable en cada ciclón puede generar una falsa confianza en el sistema experto de la línea de molienda.

También se investigará el desarrollo y aplicación de una nueva tecnología desarrollada en E.E.U.U. Esta tecnología permite, al mismo tiempo, tener una muestra “consolidada” del overflow de la batería de ciclones y tener una muestra representativa del producto de cada overflow individual. Estas mediciones cuentan con una disponibilidad efectiva por encima del 95%, lo cual la hace ideal para su uso en lazos de control en los sistemas expertos del área de molienda.

Finalmente, se explorará cómo con el uso de las señales de este instrumento se puede optimizar el producto final hacia flotación, eliminando así la variabilidad de uno de los parámetros que más influencia tiene en la recuperación.

Introducción

Es frecuentemente olvidado que la molienda y la flotación son partes del mismo proceso de separación física, de la misma manera que la preparación del lenguado es fundamental para la producción de un buen ceviche (Figura 1). Si no fuera por la necesidad de flotación no necesitaríamos la molienda (por ejemplo, en el caso de la lixiviación de óxidos de cobre). Por lo tanto, debemos evaluar el proceso en base de los resultados (costo de producción, calidad de producto y recuperación), de la misma manera que evaluemos la calidad de algún restaurante (costo, sabor y tiempo).

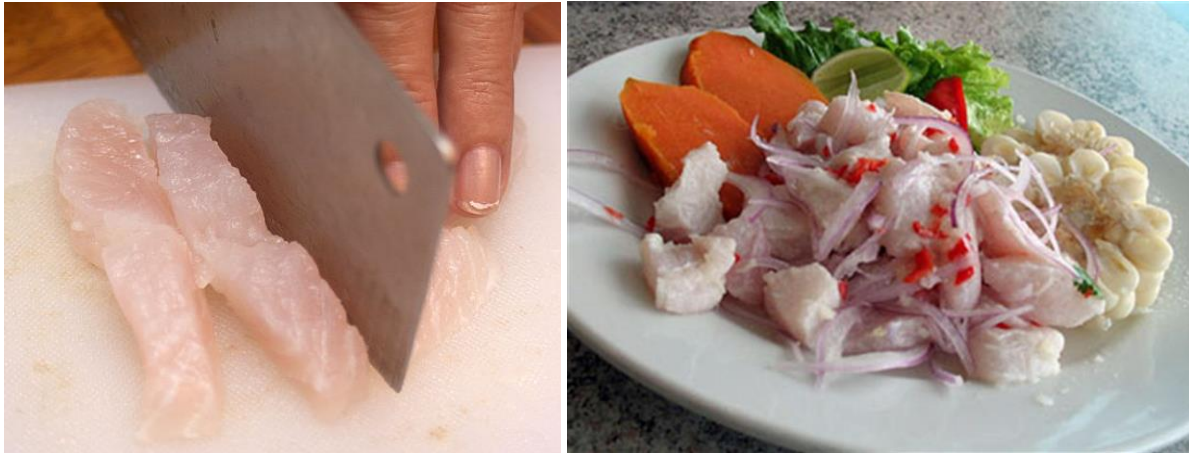


Figura 1 – La preparación del pescado es un aspecto crítico para la producción de un buen ceviche

Evaluando la molienda y la flotación, en este sentido, es obvio que el determinante del costo y calidad origina en el circuito de molienda y no el circuito de flotación. Es allí donde incurrimos la mayoría del consumo de energía, acero, costos de mantención y costos de capital. Típicamente el costo y requerimiento de energía del circuito de molienda son aproximadamente entre tres y seis veces más alto que los de flotación (Figura 2).

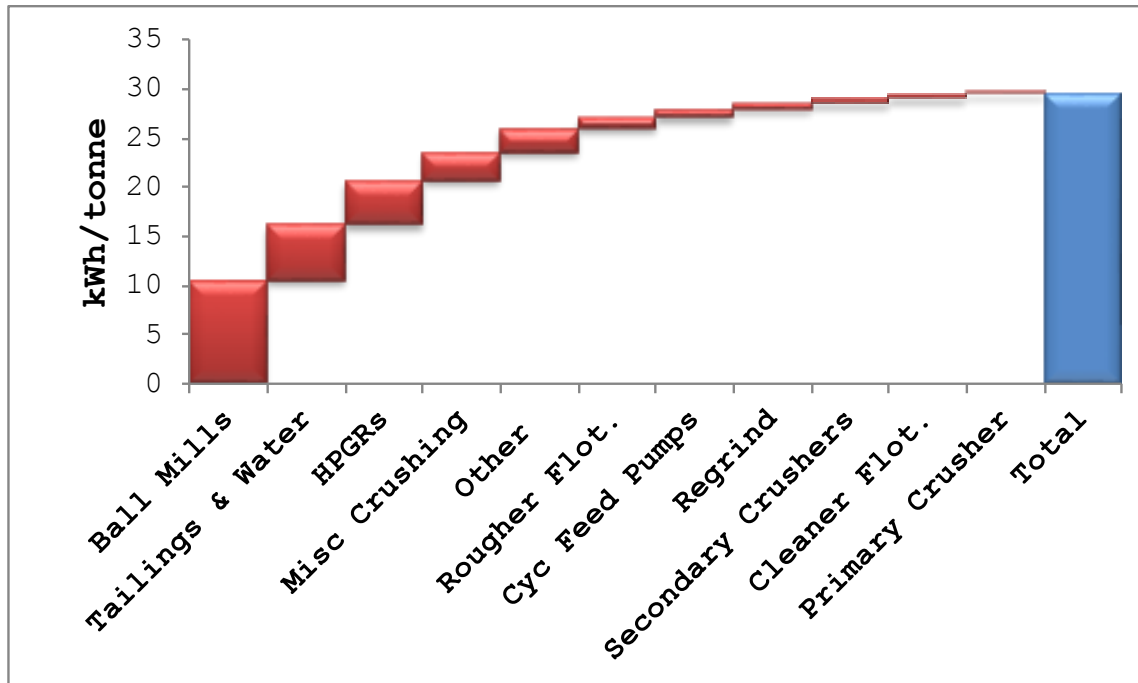


Figura 2 – Distribución de Energía en una planta concentradora (planta chilena)

Características del Mineral

Es conocido que la recuperación del mineral es función del tamaño de partícula, dado una mineralogía fija. La Figura 3 presenta las curvas de recuperación de dos minerales importantes (CuFeS_2 y MoS_2) versus tamaño para nueve plantas y proyectos importantes del Perú y Chile. Se puede apreciar que la recuperación se reduce principalmente en los ultra-finos (menos de 20 micrones) y en los gruesos (más de 100 micrones).

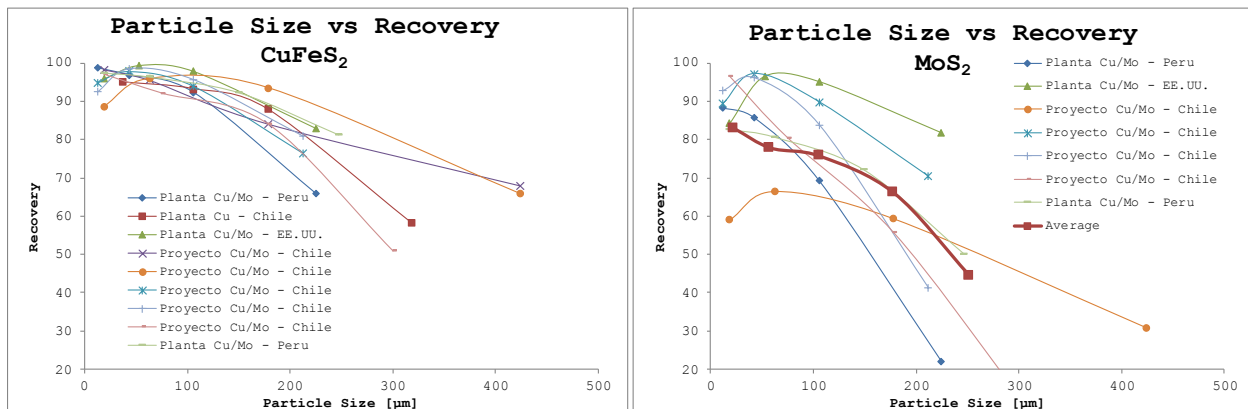


Figura 3 – Recuperación vs tamaño de partícula para algunas Plantas Cu/Mo en Perú y Chile

Es importante reconocer que, aunque la recuperación de metal es reducida para las clases de tamaño más gruesos, los minerales tienden a concentrar en las fracciones más finas y las fracciones gruesas resultan con menos ley (y menos valor). Por ejemplo, la Figura 4 muestra la ley de cabeza normalizada (es decir, como porcentaje

de la ley de cabeza promedio) en función de tamaño de partícula, para las mismas nueve plantas. Se nota que la ley de mineral es más alta en la clase intermedia (40 micrones a 80 micrones) y cae para los finos (menos de 20 micrones) y grueso (más de 100 micrones). Esto es significativo, porque muestreos en plantas industriales indican que para circuitos de molienda de configuración SAB o SABC (molienda autógena, semi-autógena), gran parte de la alimentación a la flotación ocurre en estas clases. La Figura 5 presenta 50 granulometrías de plantas industriales de la base de datos de los autores, todas colectadas en plantas industriales operando con circuitos de molienda autógenos o semi-autógenos. Es aparente que, para un P_{80} de aproximadamente 200 micrones, hay entre 5% y 15% de la alimentación a flotación más de 300 micrones y entre 10% y 40% menos de 20 micrones. La granulometría ideal a flotación es una granulometría con 100% de las partículas con diámetro igual al grano de mineralización. Dado que la granulometría ideal no es lo mismo que la granulometría óptima (de punto de vista económica), cualquier mejora que se puede aplicar para reducir la cantidad de finos y gruesos en la alimentación a flotación (flechas azules en la Figura 6) genera los siguientes beneficios para la operación del circuito de molienda-flotación:

1. Más alta recuperación de metal por reducción de pérdidas en los ultra-finos.
2. Más alta recuperación de metal por reducción de pérdidas en los gruesos.
3. Mejor ley de concentrado, por reducción de recuperación por arrastre hidráulico de finos.
4. Reducción en el consumo de energía específico, por reducir la sobre-producción de finos.
5. Reducción en el consumo de acero (medios de molienda).
6. Reducción en el desgaste de bombas y cañerías, por la reducción de ultra-gruesos.
7. Reducción en el tiempo requerido para la flotación y la energía requerida en el circuito de remolienda.

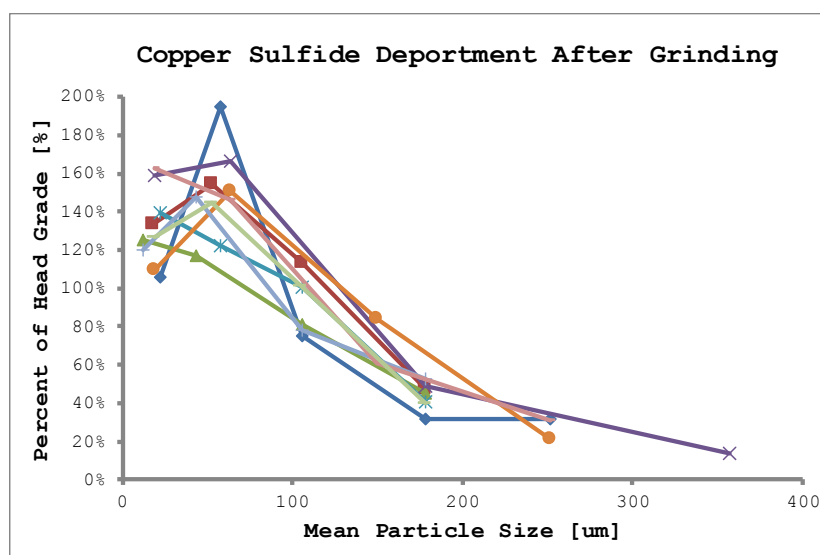


Figura 4 – Ley de cabeza normalizada versus tamaño de partícula, después de molienda

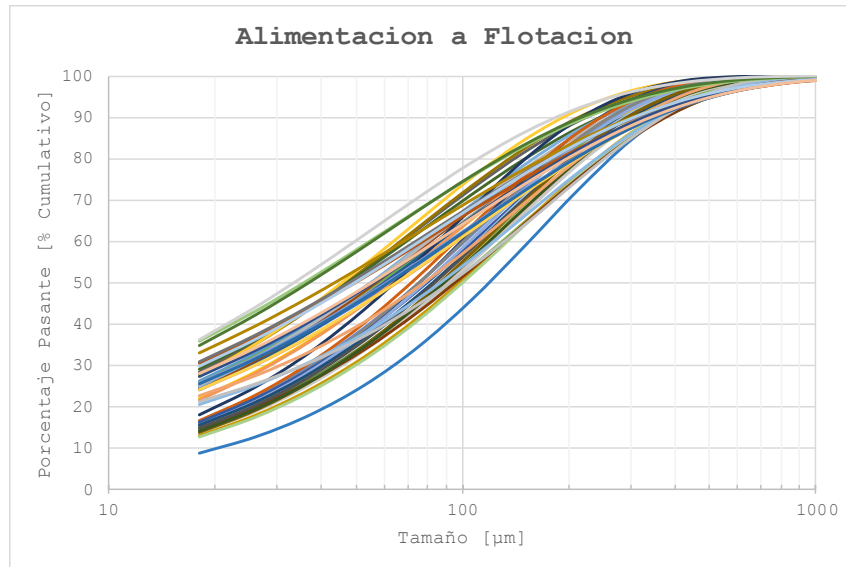


Figura 5 – Granulometría de la alimentación a flotación para tres circuitos de molienda SAG, 50 muestreos

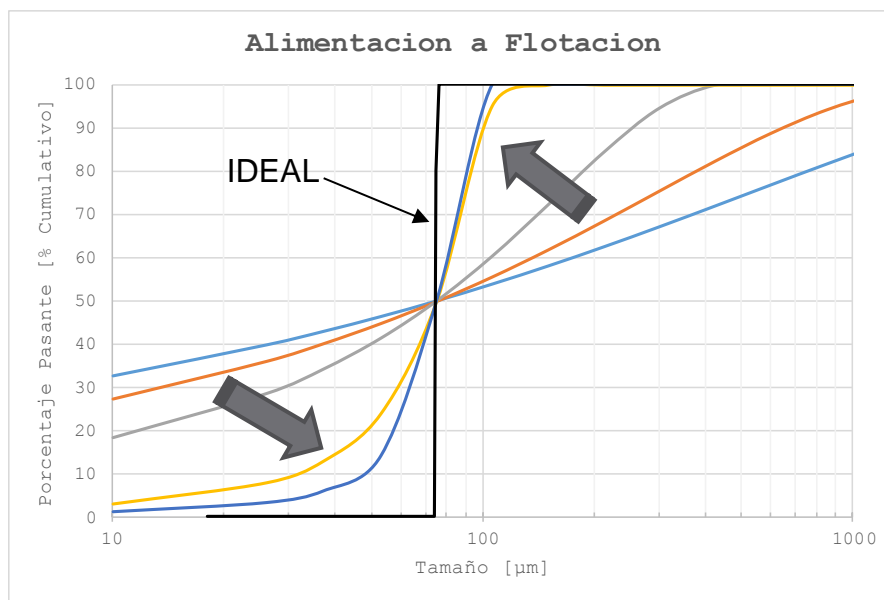


Figura 6 – Granulometría óptima de la alimentación a flotación (asumiendo grano de mineral de 75 micrones)

La tecnología CiDRA PST es capaz de lograr estos beneficios. La tecnología consiste en sensores acústicos instalados en cada ciclón de una batería de ciclones y por este detecta y mide la granulometría de *cada ciclón*. En combinación con un sistema experto (o acciones del operador), la medición es usada para activamente cerrar ciclones que están produciendo mineral grueso, reduciendo la variabilidad de granulometría entre los ciclones. El efecto es bajar el promedio de la granulometría, permitiéndole al operador subir el tonelaje (para mantener el mismo P_{80} de operación en los demás ciclones). Esta estrategia de control tiene el efecto de reducir la cantidad de gruesos (por cerrar el ciclón grueso) y la cantidad de ultra-finos (por engruesar la granulometría de los demás

cyclones), generado como producto del circuito de molienda una granulometría más cercana a la ideal.

A continuación detallamos la tecnología y mostramos un ejemplo del uso en una planta industrial.

Descripción de la tecnología

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 7 – Izquierda, sensor CYCLONEtrac PST. Derecha, sensor CYCLONEtrac PST instalado en la tubería.

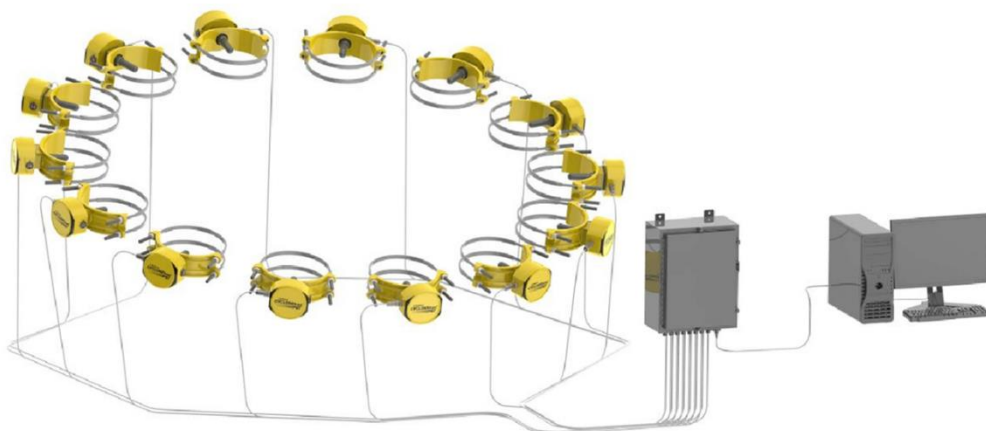


Figura 8 – Sistema CYCLONEtrac PST

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 traspassa 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 (O'Keefe *et al*, 2014).

El sistema CYCLONetrac PST lleva instalado cerca de dos años y medio en una planta concentradora en E.E.U.U. y casi un año en una batería de hidrociclones en una planta en Chile. En cada planta, el sistema CYCLONetrac PST se ha comportado excepcionalmente bien, manteniendo una disponibilidad de la señal de control por encima del 99% en la planta en E.E.U.U y del 100% en la planta en Chile.

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 (Cirulis *et al*, 2016).

Ejemplo del uso de la tecnología

A fin de obtener los beneficios en la flotación mencionados anteriormente, se necesita de un sistema con una alta tasa de actualización de datos y sostenible en el largo plazo. Esto con el objetivo de permitir tomar decisiones que relaciones y compensen el tonelaje procesado con el tamaño de partícula. Esta idea se representa gráficamente

en la Figura 9 – Tamaño de Partícula vs. Producción Global. Con la señal del PST es posible producir un cambio en la línea de operación, priorizando la producción (tonelaje procesado) o el tamaño de partícula.

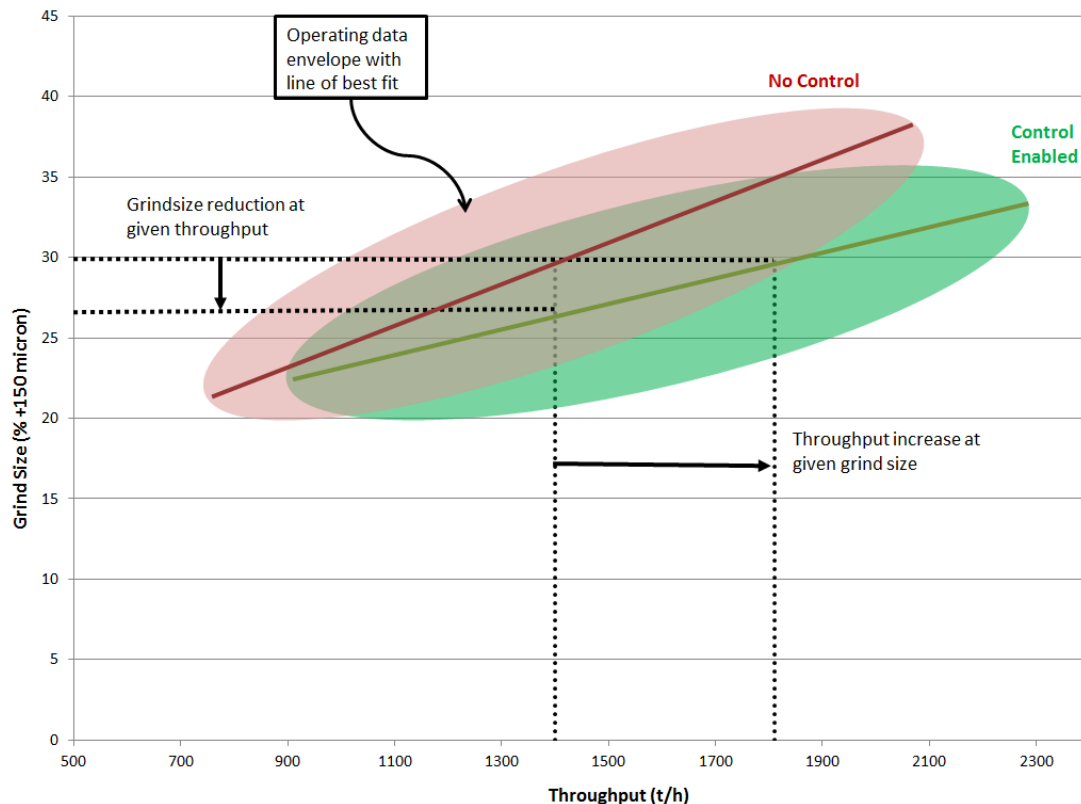


Figura 9 – Tamaño de Partícula vs. Producción Global

Para obtener resultados óptimos en el funcionamiento y uso de la señal del sistema PST es necesario integrar la señal a un lazo de control automático, lo que conlleva al desarrollo del mismo en la planta concentradora ubicada en E.E.U.U.

La primera etapa del lazo de control consistió en simplificar la señal proveniente del sistema. Ya que cada sonda se instala en el overflow de cada ciclón a fin de obtener una muestra representativa del flujo total, se cuentan con, en el caso de la planta de E.E.U.U., 14 señales individuales por batería.

Las señales de los ciclones encendidos no representan un proceso único de entrada y salida (SISO), por lo cual se evaluó el uso del promedio vs. la mediana de los ciclones encendidos. Debido a la resiliencia a valores extremos inherente en el cálculo de la mediana, se optó por utilizar esta medición como única señal de entrada, en efecto siendo esta señal la muestra “consolidada” del overflow de cada batería de hidrociclones.

La robustez y alta disponibilidad de esta señal permitió en primera instancia el desarrollo de un lazo de control del tamaño del partícula; el cual ajusta la densidad de

la alimentación a la batería de ciclones para aproximarse al tamaño deseado, junto con también permitir al operador ingresar manualmente el tamaño de partícula deseado.

Como se puede observar abajo en la Figura 10 – Control de tamaño de partícula en un molino de bolas, durante un periodo de 12 horas el operador en cuarto de control ingreso manualmente el tamaño de partícula deseado, logrando una reducción de aproximadamente 30% en el porcentaje de partículas sobre 150 µm, manteniendo estables al mismo tiempo un consumo de potencia en el molino de bolas y el tonelaje en el molino SAG.

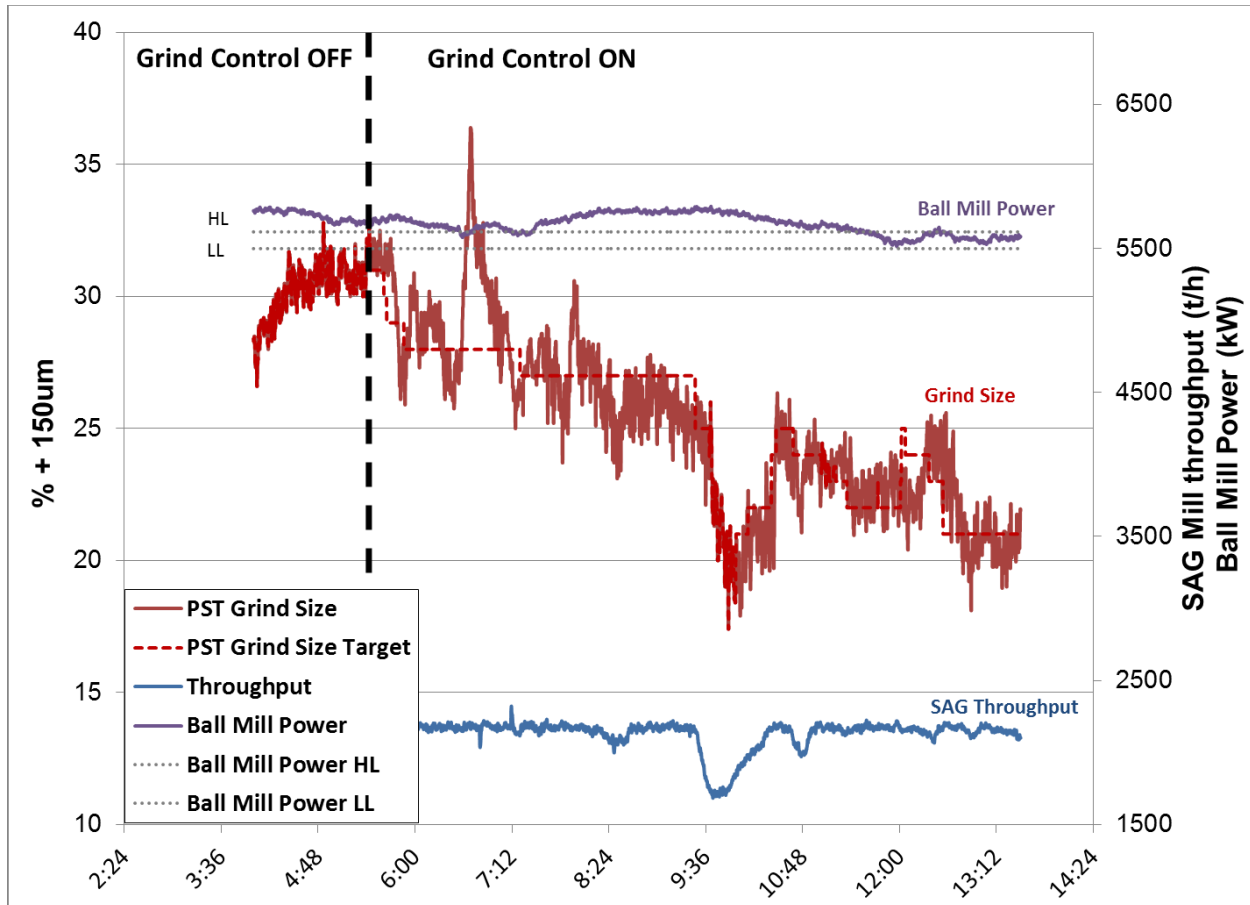


Figura 10 – Control de tamaño de partícula en un molino de bolas

Debido a los buenos resultados obtenidos con este lazo de control, se desarrolló un esquema de control de variables múltiples que mantienen el tamaño de partícula dentro de un rango específico para lograr un consumo de potencia de los molinos de bolas dentro de un rango objetivo (Cirulis *et al*, 2015)

Resultados

A fin de evaluar el rendimiento del esquema de control y por lo tanto la señal entregada por el sistema PST, se realizó un análisis no oficial de 5 meses de datos, en donde se

comparó el rendimiento del sistema con control encendido vs. control apagado (Cirulis *et al*, 2015).

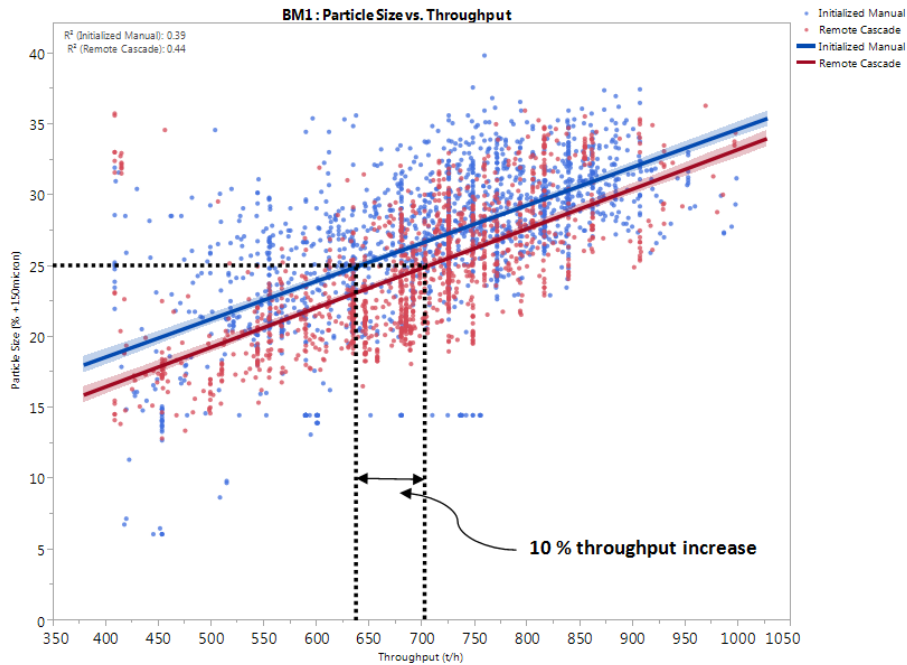


Figura 11- Molino de Bolas 1, Tamaño de Partícula vs. Producción del Molino de Bolas por Modo de Control

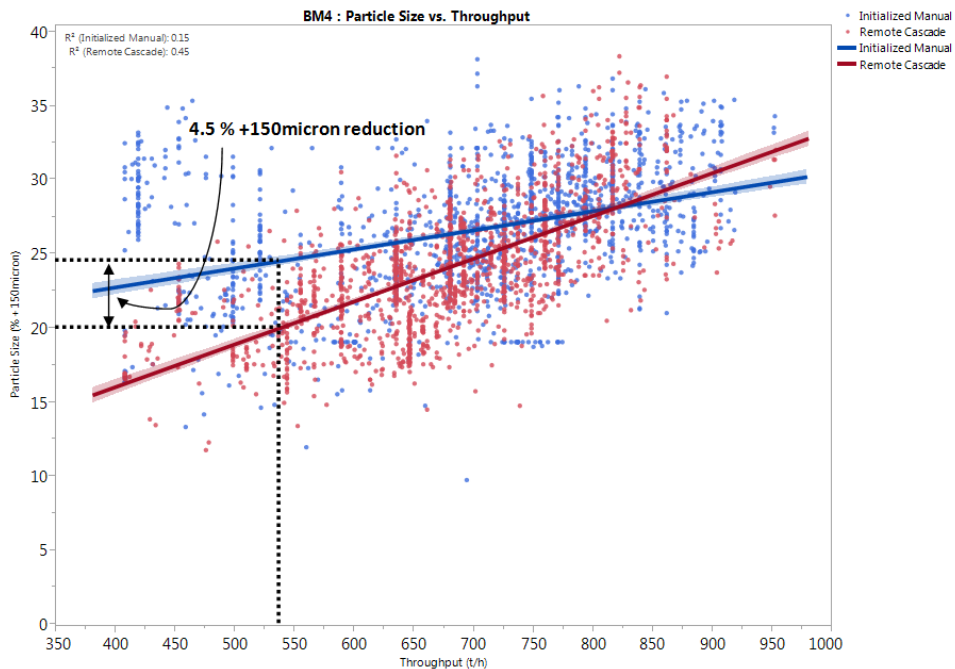


Figura 12 – Molino de Bolas 4, Tamaño de Partícula vs. Producción del Molino de Bolas por Modo de Control

En la Figura 11 podemos observar cómo se logró incrementar hasta en 10% el tonelaje procesado manteniendo el mismo tamaño de partícula hacia flotación. Así mismo, en la Figura 12 se puede observar que se logró reducir el tamaño de partícula hacia flotación hasta en 4.5%, manteniendo el tonelaje procesado constante.

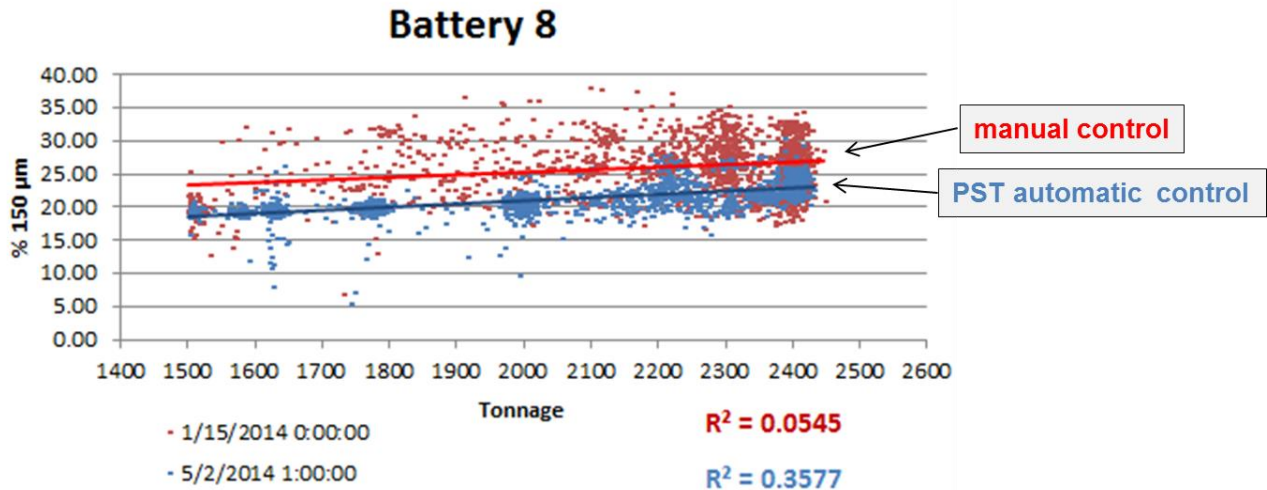


Figura 13 - Comparación de dos semanas de operación bajo diferente control

En la Figura 13, se muestra dos semanas de operación de la planta, con la semana del 15 de enero del 2014 en control manual, y la semana del 2 de mayo del 2014 en control automático. Como se puede observar que, en adición a una diferencia en el % +150 malla, *el tamaño de partícula tiene una menor dispersión cuando se está usando la señal del PST en el sistema de control experto.*

Esta disminución de variabilidad también se puede observar en los otros molinos durante el mismo periodo de evaluación de 5 meses, como se puede observar en la Figura 14. No solo es menor la dispersión en el tamaño de partícula, también se disminuyó el tamaño de partícula a través de todo el rango de operación.

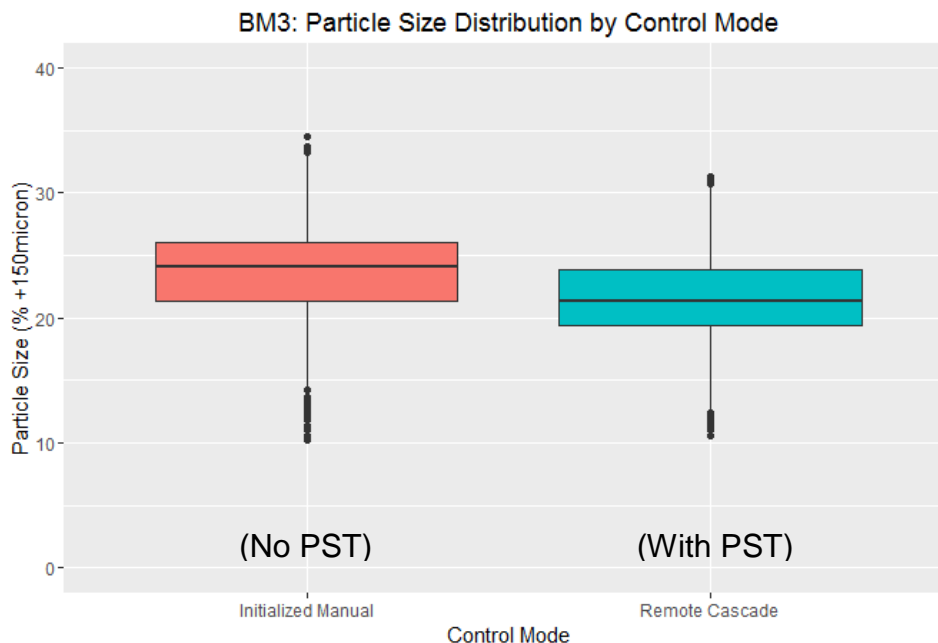


Figura 14 - Gráfica de caja de la distribución del tamaño de partícula según modo de control

Según la Figura 13, podemos observar que el uso del sistema PST como señal de control aportó una reducción en el P_{80} de aproximadamente 20 micrones, además de reducir las pérdidas en recuperación debido a partículas ultrafinas (aun no cuantificadas). La representación gráfica de esta significativa mejora en la alimentación a flotación se puede observar en la Figura 15.

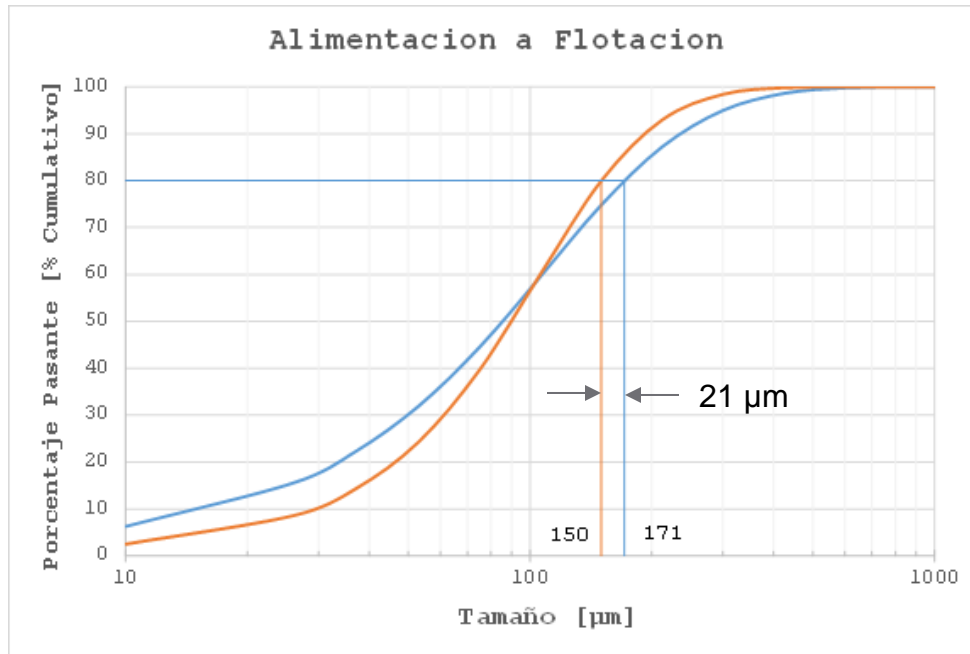


Figura 15 - Distribución del tamaño de partícula a flotación según modo de control

Se puede concluir de este análisis que el cambio en la alimentación al circuito de flotación no solo es un desplace paralelo en la curva del tamaño de partícula, es *también un ajuste fino de la pendiente*, aproximándonos aún más a nuestra granulometría ideal de la alimentación a flotación como representada en la Figura 6.

Conclusiones

La ley de mineral más alta en flotación se encuentra en las partículas entre 40 y 80 micrones, lo que implica que reducciones de partículas fuera de este rango hacia flotación generan amplios beneficios en toda la planta. El sistema CYCLONetrac PST, por primera vez, es capaz de lograr estos beneficios al hacer posible una medición confiable y de alta disponibilidad del tamaño de partícula en el overflow de cada ciclón de una batería.

Esta señal, junto con un lazo de control automático, permite una reducción del P_{80} equivalente a 20 micrones (en un ejemplo), o un aumento en el tonelaje de hasta 10% (en otro ejemplo).

Además de reducir el P_{80} y la cantidad de gruesos, también reduce la cantidad de ultra-finos generados por el circuito de molienda—es decir, la variabilidad de la granulometría. Aunque este efecto no fue cuantificado para los ejemplos mencionados,

pensamos que podría ser significativo cuando uno toma en cuenta la cantidad de metal perdida en esta fracción (Figura 16 muestra un ejemplo de pérdidas en función de tamaño para una planta peruana).

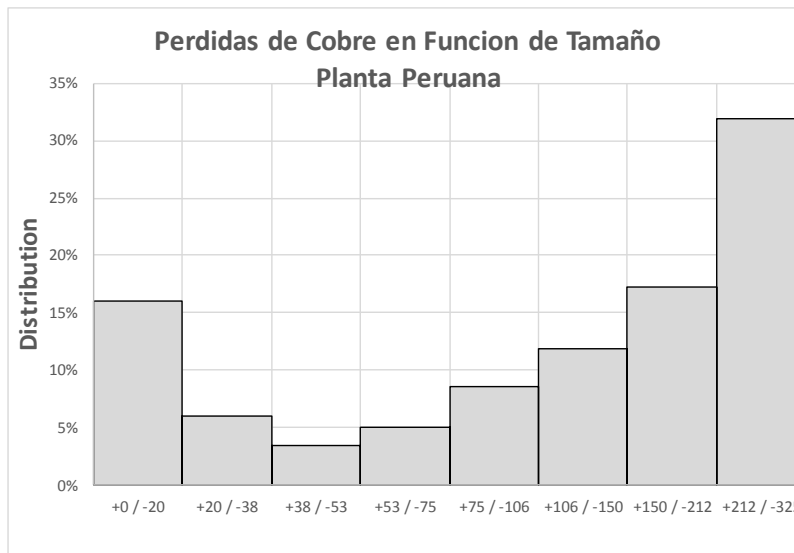


Figura 16 – Contribución a las pérdidas de Cu en función de tamaño de partícula, planta peruana

Para resumir, este artículo ha demostrado el uso del sistema CYCLONEtrac PST para mejor optimizar la cantidad de gruesos y finos en la alimentación a un circuito de flotación. Volviendo de nuevo al análogo anterior, podríamos decir que es una manera de “afilarse el cuchillo” de la clasificación de los ciclones; optimizando así la preparación de nuestro pescado para obtener el resultado que todos queremos: un excelente ceviche.

Referencias

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., O’Keefe, C., Medina, F., and Maron, R., 2016. The value of real-time particle size tracking on individual cyclones in *MineExcellence 2016 Conference Proceedings*, Santiago, Chile, 30 March – 1 April

O’Keefe, C., Cirulis, D., Holdsworth, M., Rothman, P., Maron, R., Newton, D. and Mercuri, J., 2014. Grind Circuit Optimization at Rio Tinto Kennecott using real-time measurement of individual hydrocyclone overflow stream particle size enabled by novel CYCLONEtracSM technology, in *Proceedings of COMMINUTION 2014: 9th International Comminution Symposium*, Cape Town, South Africa, 7-10 April.