

## El uso y valor de la medición de tamaño de partícula en cada ciclón

Peter Amelunxen, Aminpro, Peru  
Juan F. Medina, CiDRA Minerals Processing, USA  
Robert Maron, CiDRA Minerals Processing, USA  
Américo Zuzunaga, CiDRA Minerals Processing, USA\*

### ABSTRACTO

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 significativo 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 CYCLONEtrac 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.

## INTRODUCCION

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).

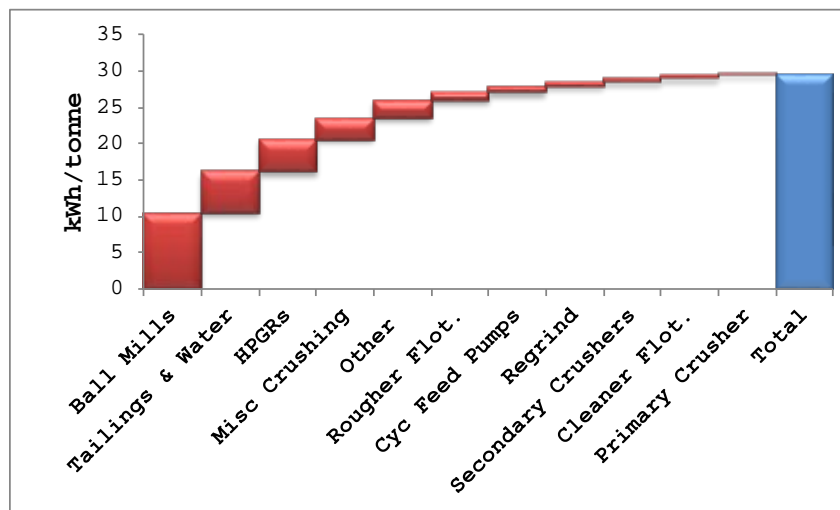


Figura 2 – Distribución de Energía en una planta concentradora (planta chilena)

## 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 ( $\text{CuFeS}_2$  y  $\text{MoS}_2$ ) 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).

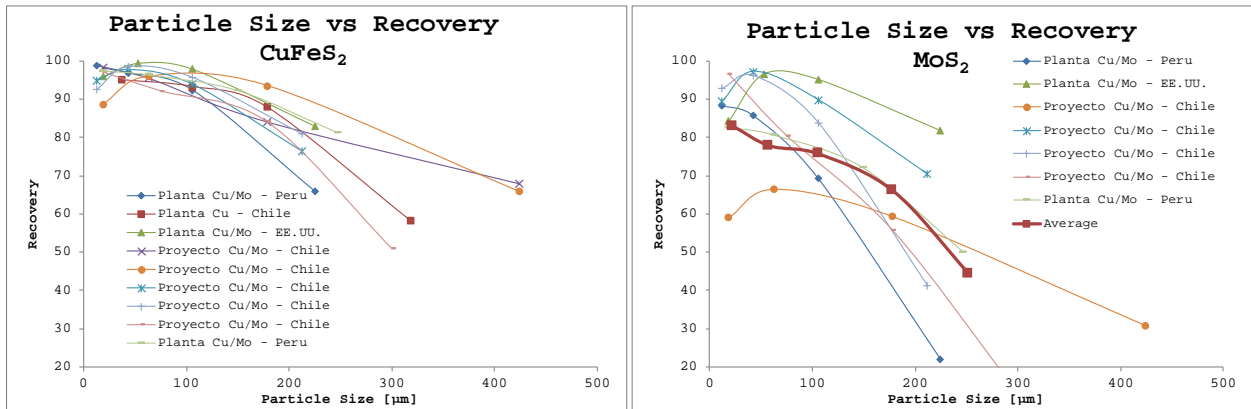


Figura 3 – Recuperación vs tamaño de partícula para algunas Plantas Cu/Mo en Perú y Chile

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 gruesos (más de 100 micrones).

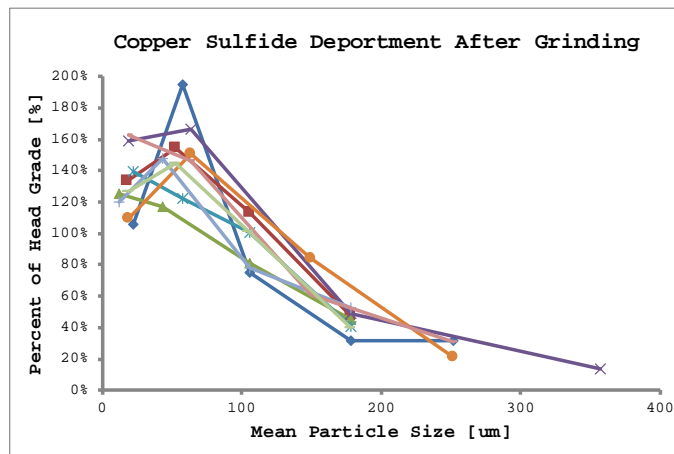


Figura 4 – Ley de cabeza normalizada versus tamaño de partícula, después de molienda

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 recolectadas 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.

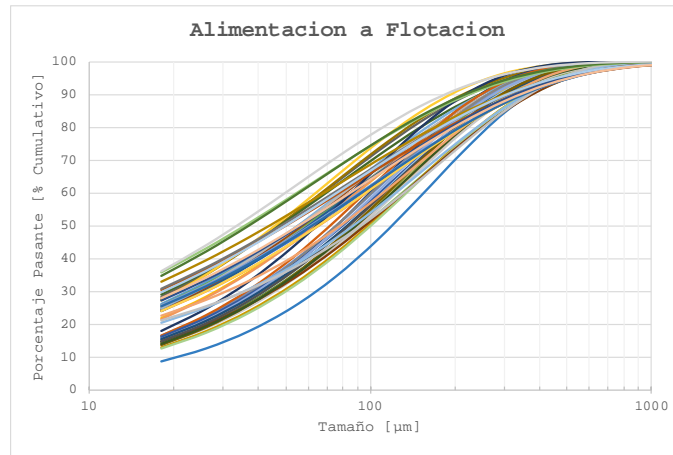
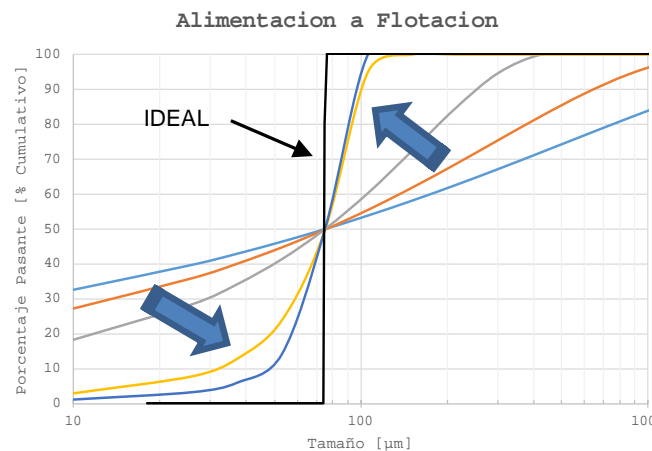


Figura 5 – Granulometría de la alimentación a flotación para tres circuitos de molienda SAG, 50 muestreos

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

La tecnología CIDRA CYCLONEtrac 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 ciclones), generado como producto del circuito de molienda una granulometría más cercana a la ideal.

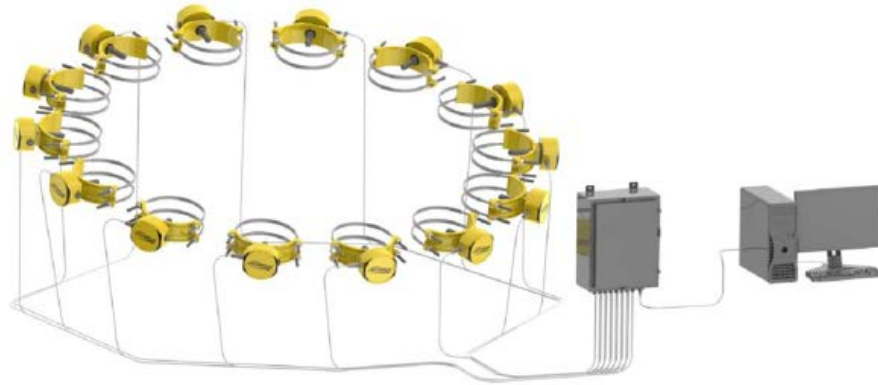
A continuación detallamos la tecnología y mostramos un ejemplo del uso en una planta industrial.

### **DESCRIPCIÓN 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 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 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 TECNOLOGÍAS**

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.

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

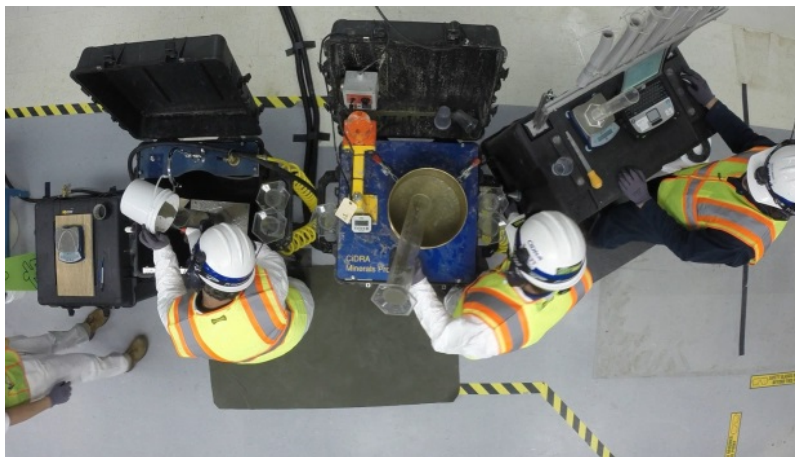
Tabla 1 – Comparación de tecnologías de medición de tamaño de partículas

## CALIBRACIÓN DEL SISTEMA

Los métodos de dimensionamiento de partículas en líneas de flujo de overflow, ya sea por medio de difracción, ultrasonido, calibre 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 calibre “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 9 se muestra una foto del equipo portátil con el agitador diseñado a la medida.



*Figura 9 – 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. De las dieciocho muestras se observó una diferencia media de 0,35 puntos de porcentaje y una desviación estándar de 2,3 puntos.

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 10 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.

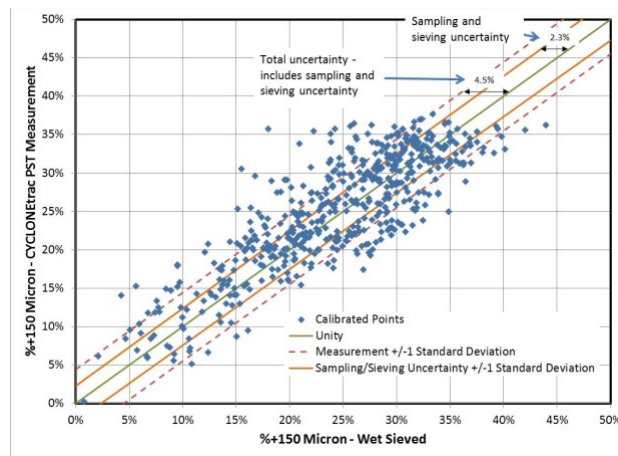


Figura 10 - Comparación del resultado de % +150 micrones obtenido por los sensores del CYCLONetrac PST versus los % +150 micrones de las muestras de tamizado de tamaño único por vía húmeda (porcentaje de sólidos retenidos en una malla de 150 micrones)

## 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.

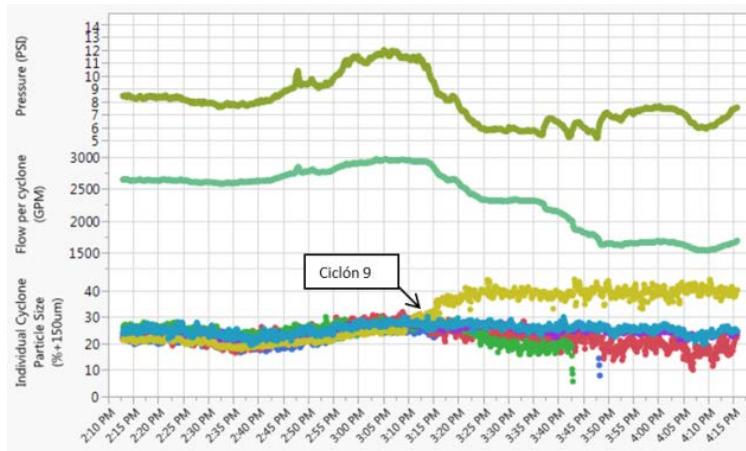


Figura 11 Ejemplo 1 – Datos de proceso de circuito de molienda

En la Figura 11, 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 másico 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.

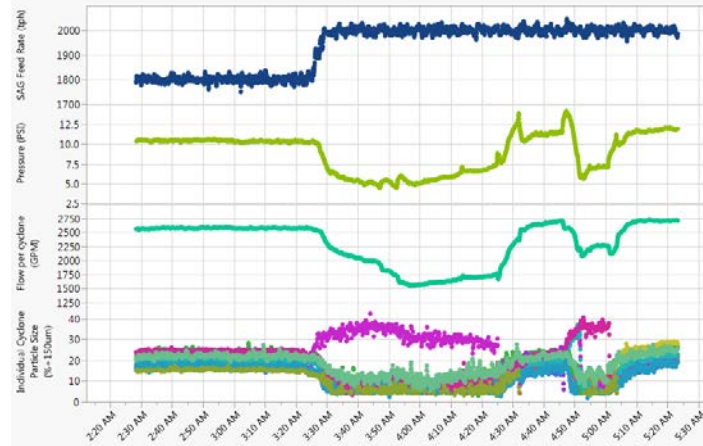


Figura 12 Ejemplo 2 – Datos de proceso del circuito de molienda

La Figura 12 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.

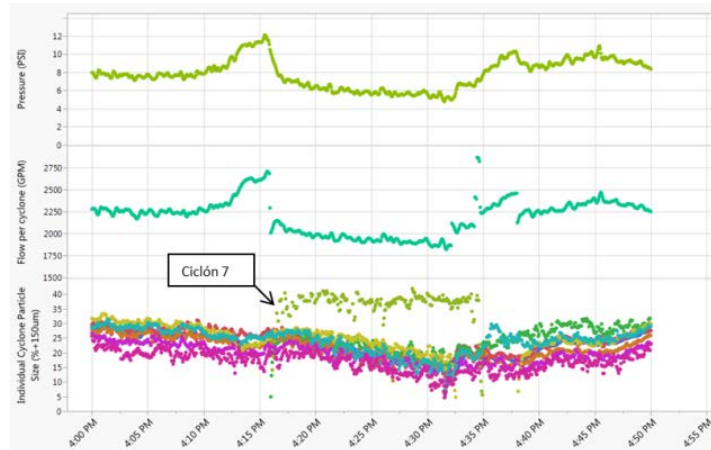


Figura 13 Ejemplo 3 - Datos de proceso del circuito de molienda

El control de abrir/cerrar del ciclón está en un lazo de retroalimentación con la presión del ciclón. La Figura 13 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 ápex 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).

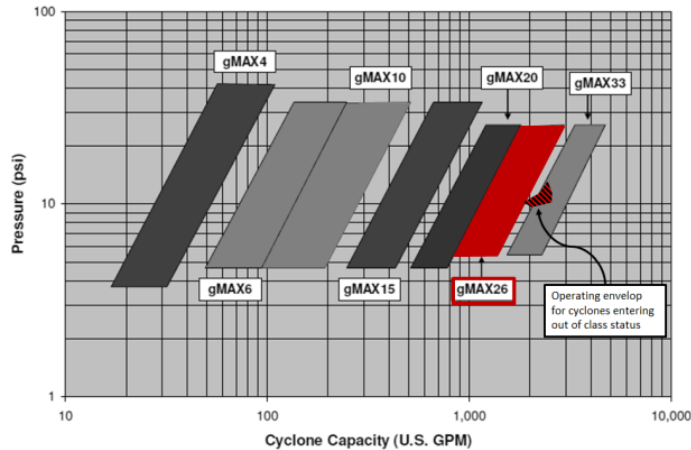


Figura 14 – Curvas de capacidad del FLSmidth Krebs gMAX (FLSmidth)

La capacidad del ciclón está definida por la presión, flujo y las dimensiones del ciclón. La Figura 14 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 14 y corresponden al área resaltada. 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 imposibles 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.

El sistema CYCLONEtrac PST, además de reducir el P80 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 significado cuando uno toma en cuenta la cantidad de metal perdida en esta fracción (Figura 15 muestra un ejemplo de pérdidas en función de tamaño para una planta peruana).

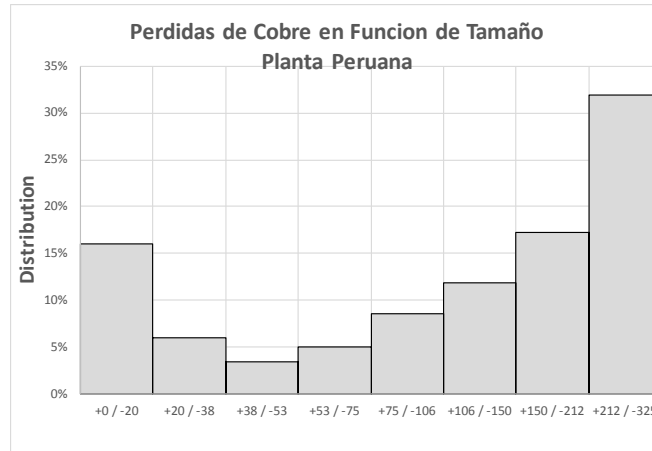


Figura 15 – Contribución a las pérdidas de Cu en función de tamaño de partícula, planta peruana

Considerando los beneficios del monitoreo del rendimiento de clasificación individual por cada ciclón y la optimización de las estrategias de control, CYCLONetrac PST debería transformarse en la instrumentación estándar para la clasificación por ciclones en la industria del procesamiento de minerales. 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; Maron, R; Medina J; O’Keefe C; ‘Survey of Real-Time Individual Cyclone Particle Size Tracking (PST) In Multiple Concentrators’, *Automining 2016 30 November-1 December*, Antofagasta, Chile, Gecamin.
- Cirulis, D; Dunford, S; Snyder, J; Bartsch, E; Rothman, P; Maron, R; Newton, D; O’Keefe, C; Mercuri, J (2015). ‘Process Optimization Using Real-Time Tracking of Coarse Material in Individual Cyclone Overflow Streams’, *MetPlant 2015 7-8 September 2015*, Perth, Western Australia, The Australasian Institute of Mining and Metallurgy, pp 93-109.
- 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’, *11<sup>th</sup> International Minerals Processing Conference – Procemin 2015, 21-23 October 2015*, Santiago, Chile. Gecamin.
- FLSmidth, *FLSmidth Krebs gMAX Capacity Curves- English Units*. <http://www.flsmidth.com/~media/PDF%20Files/Liquid-Solid%20Separation/Hydrocyclones/gMAXCapacityCurveEnglishUnits.ashx>. 5 May 2017.
- Outotec Oyj. PSI®300 On-line Slurry Particle Size Analyzer. 2009. [http://new.outotec.com/globalassets/products/analyzers-and-automation/ote\\_psi300i\\_particle\\_size\\_analyzer\\_eng.pdf](http://new.outotec.com/globalassets/products/analyzers-and-automation/ote_psi300i_particle_size_analyzer_eng.pdf) 10 May 2017.