

Optimización de proceso utilizando rastreo del material grueso en tiempo real en flujos overflow de ciclones individuales

Dylan Cirulis¹, Scott Dunford², Jennifer Snyder³, Erik Bartsch⁴, Paul Rothman⁵, Robert Maron⁶, David Newton⁷, Christian O'Keefe⁸, Joseph Mercuri⁹

1. Autor y presentador, Ingeniero Metalúrgico, CiDRA Minerals Processing, 50 Barnes Park North, Wallingford, CT 06492 USA, dcirulis@cidra.com
2. Coautor, Superintendente - Técnico, Rio Tinto Kennecott, 4700 W. Daybreak Parkway, South Jordan, UT 84095 USA, scott.dunford@riotinto.com
3. Coautor, Ingeniero Metalúrgico, Rio Tinto Kennecott, 4700 W. Daybreak Parkway, South Jordan, UT 84095 USA, jennifer.snyder@riotinto.com
4. Coautor, Gerente- Procesamiento, Tecnología e Innovación Rio Tinto, 4700 W. Daybreak Parkway, South Jordan, UT 84095 USA, erik.bartsch@riotinto.com
5. Coautor, Presidente, CiDRA Minerals Processing, 50 Barnes Park North, Wallingford, CT 06492 USA, dcirulis@cidra.com
6. Coautor, Director Gerente, CiDRA Minerals Processing, 50 Barnes Park North, Wallingford, CT 06492 USA, rmaron@cidra.com
7. Coautor, Ingeniero Senior de Desarrollo, CiDRA Minerals Processing, 50 Barnes Park North, Wallingford, CT 06492 USA, dnewton@cidra.com
8. Coautor, Director Tecnología, CiDRA Minerals Processing, 50 Barnes Park North, Wallingford, CT 06492 USA, cokeefe@cidra.com
9. Coautor, Gerente de Proyecto - PST, CiDRA Minerals Processing, 50 Barnes Park North, Wallingford, CT 06492 USA, jmercuri@cidra.com

RESUMEN

El objetivo de un circuito de trituración de mineral que incluya un molino de bolas operando en circuito cerrado con un grupo de hidrociclones de clasificación es alimentar el proceso aguas abajo con el tamaño de partícula deseado. Mantener el tamaño óptimo de partícula en la alimentación de la flotación puede mejorar de manera importante el flujo de caja de la planta. En particular, reducir la cantidad de material grueso es a menudo un desafío de gran envergadura. La instrumentación que existe para la medición del tamaño de partículas actualmente se considera como un equipo estándar en la mayoría de las plantas concentradoras modernas. Sin embargo, su nivel de disponibilidad es generalmente muy bajo, principalmente debido a los exigentes requerimientos de mantenimiento del analizador y los sistemas de muestreo asociados.

CiDRA Minerals Processing ha desarrollado dos tecnologías innovadoras y robustas que resuelven este inconveniente proporcionando sistemas con alto nivel de confiabilidad y muy bajo requerimiento de mantención para medición en línea del material grueso presente en el overflow de los hidrociclones individuales. El primer sistema es un sistema no invasivo y mide pebbles y piedras de más de 6 mm. Este documento se ha centrado en el segundo sistema que corresponde a un diseño de sensor de inserción reforzado sin partes móviles que entrega la tendencia del parámetro de tamaño de partícula deseado en la forma de porcentaje sobre 150 micrones.

Ambos sistemas tienen sistemas robustos y simples y miden el flujo overflow principal del hidrociclón individual. La medición en el hidrociclón individual permite la identificación de los hidrociclones con bajo rendimiento, además de proporcionar una medición representativa del conjunto completo de hidrociclones. Los sistemas no requieren muestreo ni circuitos de tubería de transferencia de muestras que tienden a obstruirse, evitándose así los exigentes requerimientos de mantención.

El sensor de inserción será descrito en detalle a continuación junto con la implementación realizada en un sólido esquema de control en una planta concentradora de gran tamaño en los EE.UU. de Norteamérica. Los datos de la planta demuestran que la altísima disponibilidad, lograda con muy poco mantenimiento, ha permitido mejorar el control del proceso y con ello mantener los rendimientos globales y el consumo de energía deseado en el molino de bolas y a la vez reducir el tamaño de partícula.

INTRODUCCIÓN

El yacimiento de Bingham Canyon propiedad de Rio Tinto Kennecott en Salt Lake City, UT, U.S.A. es un mineral de cobre porfídico con una distribución bastante uniforme de mineralización de sulfuros, predominantemente calcopirita. Generalmente la ley de cabeza del cobre está en el rango de 0,4 a 0,6 por ciento y el yacimiento además contiene molibdeno, oro y plata. La Concentradora de Río Tinto Kennecott está conformada por un circuito compuesto de molino SAG, molino de bolas y chancador de pebbles (SABC) con cuatro líneas de molienda para tratar una producción promedio de aproximadamente 168 kt/d. En el servicio rougher-scavenger se usan celdas Wemco con agitación mecánica y el concentrado rougher es tratado por medio de flotación en columna para producir concentrado en bruto. El concentrado en bruto es posteriormente procesado en un circuito de flotación de molibdeno para producir el concentrado de molibdeno, como producto comercializable y concentrado de cobre para la fundidora que está aguas abajo en el proceso.

En un concentrador de procesamiento de minerales la recuperación de mineral valioso está fuertemente relacionada con la distribución de tamaño de partícula del material producido en el circuito de molienda y enviado al circuito de flotación.

A través de una alianza de cooperación industrial, Río Tinto Kennecott y CiDRA desarrollaron una innovadora tecnología que mide el tamaño de partículas en las tuberías de overflow de los hidrociclones individuales.

CONTROL DEL CIRCUITO DE MOLIENDA

Uno de los desafíos clave que hoy enfrentan las plantas concentradoras de gran tamaño es optimizar los rendimientos globales y a la vez mantener el nivel de recuperación de mineral valioso. En la medida que la ley del mineral cae, las tasas de producción deben incrementarse para mantener los objetivos establecidos. Más aún, el depender de un número menor de circuitos de molienda para reducir los costos de capital ha producido un aumento en la sensibilidad ante los cambios del tipo de mineral y las tasas de alimentación. Mientras antes detecten los operadores estos cambios, menor será la alteración del proceso y el impacto sobre el rendimiento (Jones and Pena, 1999).

A menudo la alteración al proceso resultante de los cambios se manifiesta en la forma de una variación en el tamaño de partículas en el flujo overflow del hidrociclón. La alteración puede manifestarse como partículas levemente por sobre el tamaño óptimo de recuperación. En casos extremos, puede ser en forma de pebbles o piedras que aparecen en la flotación aguas abajo de la flotación.

El tamaño de partícula del flujo de producto proveniente del circuito de molienda es un indicador clave de rendimiento (KPI) pues está directamente relacionado con la recuperación de mineral, la eficiencia de la planta de molienda y los rendimientos globales de la planta. Para controlar el tamaño de molienda, éste debe ser medido. Los requisitos fundamentales de una medición útil incluyen:

- retroalimentación en tiempo real
- señales precisas y repetibles

- alta disponibilidad
- bajo requerimiento de mantención

Históricamente las plantas concentradoras han dependido de varios métodos para la medición y control de partículas. Por ejemplo:

- estimación del tamaño de partículas basada en el tipo de mineral, rendimiento histórico y condiciones de la planta
- ‘sensores livianos’ que son implementaciones empíricas de lo anterior
- medición de tamaño de partícula haciendo un análisis granulométrico a una muestra de material de alimentación de flotación
- toma manual de muestras del flujo overflow del ciclón para verificar en forma puntual el rendimiento del proceso
- estrategias de control basadas en un modelo de hidrociclón, sensor virtual o el uso de sólidos por porcentaje de overflow del ciclón como una muestra representativa del tamaño de partícula

Todo lo anterior ha funcionado hasta cierto punto, pero generalmente produce una actualización de datos lenta e intermitente y con resultados muy deficientes al largo plazo. Idealmente, la medición del tamaño de partícula del flujo overflow del ciclón debería permitir que el esquema de control del circuito de molienda fuera sostenible a largo plazo y permitir, además, realizar decisiones que relacionen y compensen la producción con el tamaño de partícula. Esta idea conceptual se representa gráficamente en el cuadro de tamaño de partícula vs. producción en la (Figura 1). Con el control habilitado podría producirse un cambio en la línea de operación, permitiendo la reducción a un tamaño de partícula a una producción global constante, o bien, un aumento del rendimiento a un tamaño de partícula constante.

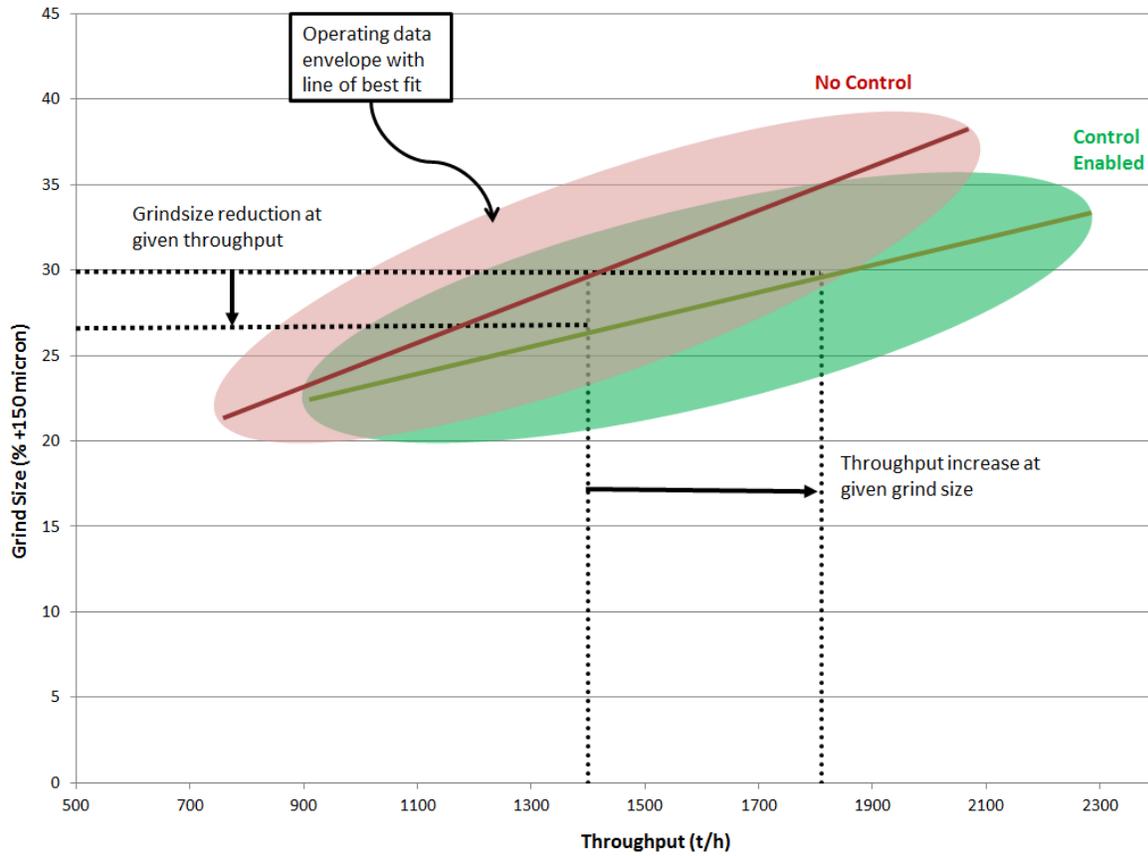


Figura 1 – Tamaño de Partícula vs. Producción Global

DESARROLLO DEL CONTROL

El concentrador de Río Tinto Kennecott utiliza un sistema de control distribuido (DCS) Emerson Delta V para el control regulatorio de proceso. El sistema Metso-Cisa Expert se usa para el control avanzado de proceso del circuito de molienda.

El sistema de rastreo de tamaño de partículas CYCLONetrac PST fue instalado originalmente sólo en uno de los nidos de ciclones de Río Tinto Kennecott. Se llevó a cabo una campaña para validar el rendimiento del sistema en la que el personal de CiDRA y de Río Tinto Kennecott trabajaron conjuntamente para manipular las condiciones de operación del hidrociclón y del circuito de molienda en un rango de diversos tamaños. Durante la campaña de validación se recolectaron más de 130 muestras de flujo overflow de hidrociclones individuales. Se realizó el análisis granulométrico de las muestras y los resultados fueron comparados con los del sistema CYCLONetrac 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). La recuperación de mineral valioso cae 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 sobre 150 micrones. Los detalles completos del sistema PST han sido publicados anteriormente por O'Keefe et al (2014).

Después de la validación del resultado del PST, los datos sin analizar obtenidos de los ciclones se recopilaron en un disco duro por un período de cinco meses. Estos datos se utilizaron para establecer la correlación entre la respuesta del sistema PST con las variables clave de la planta (por ejemplo, rendimientos del SAG, densidad de alimentación del ciclón, flujo de alimentación del ciclón, presión de operación del ciclón, etc.). Los resultados de la correlación pueden observarse en la Figura 2.

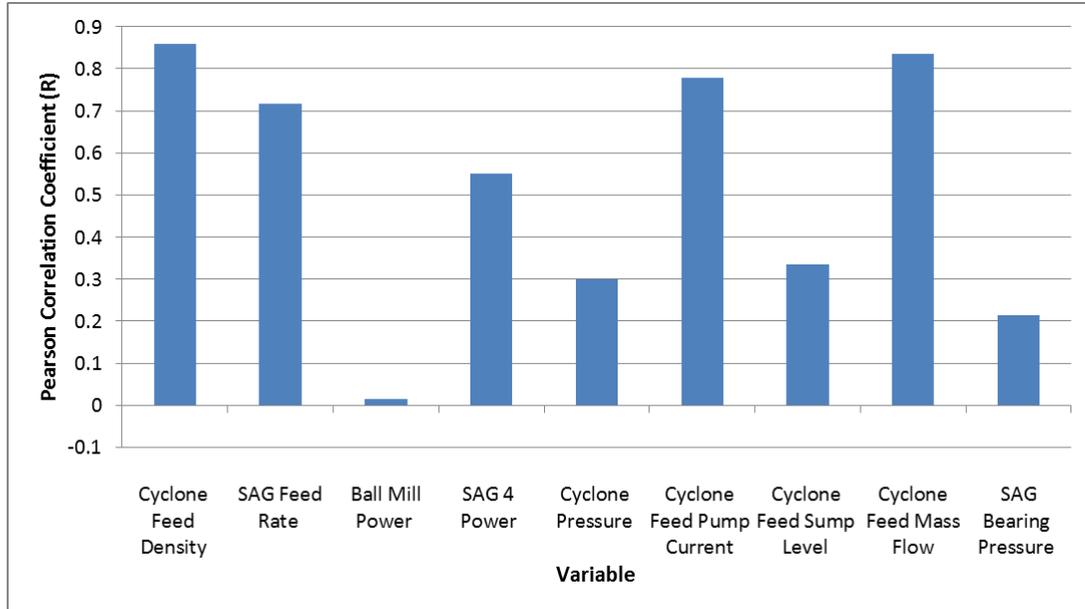


Figura 2 – Coeficiente de correlación de Pearson entre las variables de la planta y el promedio del sistema PST

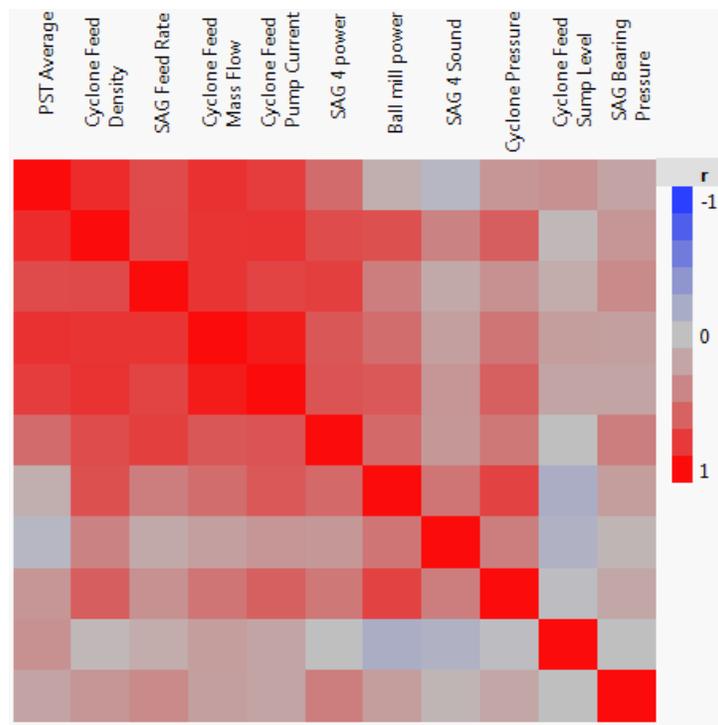


Figura 3 – Correlación cruzada entre variables del circuito

Basados en la respuesta del sistema, las variables con la mayor correlación fueron la densidad de alimentación del ciclón, el flujo de masa de alimentación del ciclón y la tasa de alimentación del SAG. Estas variables no son independientes como se muestra en el mapa de colores de las correlaciones cruzadas (Figura 3). Los medidores nucleares de densidad de alimentación del ciclón han pasado por un importante trabajo de calibración y ya se había implementado un esquema de control PID de restricciones múltiples en el DCS para permitir que los operadores alcanzaran el punto deseado de densidad de alimentación del ciclón. Sin embargo, la determinación del objetivo óptimo de densidad de alimentación del ciclón requiere una demandante atención del operador e interpretación objetiva de las condiciones reales de la molienda.

El sistema PST entrega la medición de tamaño de partícula en los ciclones individuales, proporcionando así el beneficio de identificar los ciclones con clasificación deficiente y medir en forma eficiente el flujo total sin necesidad de un sistema de muestreo. Esto, sin embargo, presenta una dificultad para efectos de control ya que no representa un proceso único de entrada y salida (SISO). Por lo tanto, una variación única en el circuito de molienda (por ej. cambio en la adición de agua) produce múltiples cambios en el nido de ciclones, y no todos ellos pueden correlacionarse en forma similar.

Más aún, en la medida que los ciclones del nido cambien de estado ON/OFF los valores de tamaño de partícula del overflow pueden también aparecer o desaparecer. Un valor *promedio* o *mediana* de todos los ciclones en servicio fueron las opciones que se consideraron. El análisis estadístico de los datos de calibración indicó que la media de todos los ciclones en servicio (en buenas condiciones) ofrecía el valor más preciso. Por lo tanto, se tomó la decisión de utilizar inicialmente la media del valor PST para el tamaño de partícula de todos los ciclones en operación. De una manera intuitiva con esto también se evitaría el efecto de posibles valores atípicos pues un ciclo de bajo rendimiento no sería el que rigiera el control del circuito.

La disponibilidad de una medición robusta del tamaño de partícula en línea permitió el desarrollo de un controlador de tamaño de partícula que ajuste la densidad de alimentación de ciclón que se requiere para

aproximarse al tamaño deseado. Esto permitió también que el operador ingresara el punto de ajuste del tamaño de partícula deseado.

En paralelo al desarrollo del control PST, se había formado un equipo de trabajo en la Concentradora para optimizar la eficiencia de la molienda utilizando más potencia instalada en el circuito de molienda (molino SAG más molino de bolas). El objetivo para los molinos de bolas era mantener la potencia dentro de los límites (92 a 95 por ciento de potencia de molienda) para evitar sus oscilaciones históricas de baja y sobrecarga. El control de la molienda demostró ser un elemento facilitador importante en este proyecto, como se muestra en la Figura 4 (O'Keefe et al, 2014). La tabla muestra un período de 12 horas en que el operador de la sala de control manipulaba el punto de ajuste del tamaño de partícula deseado en una línea de molino de bolas para lograr la potencia requerida en el molino.

Aprovechando la condición del exceso de capacidad del molino de bolas, como se indica en el objetivo establecido para potencia consumida señalado anteriormente, se observó en el circuito una reducción de aproximadamente el 30 por ciento en el porcentaje en tamaños superiores a 150 micrones con poco impacto sobre la tasa de alimentación del molino SAG.

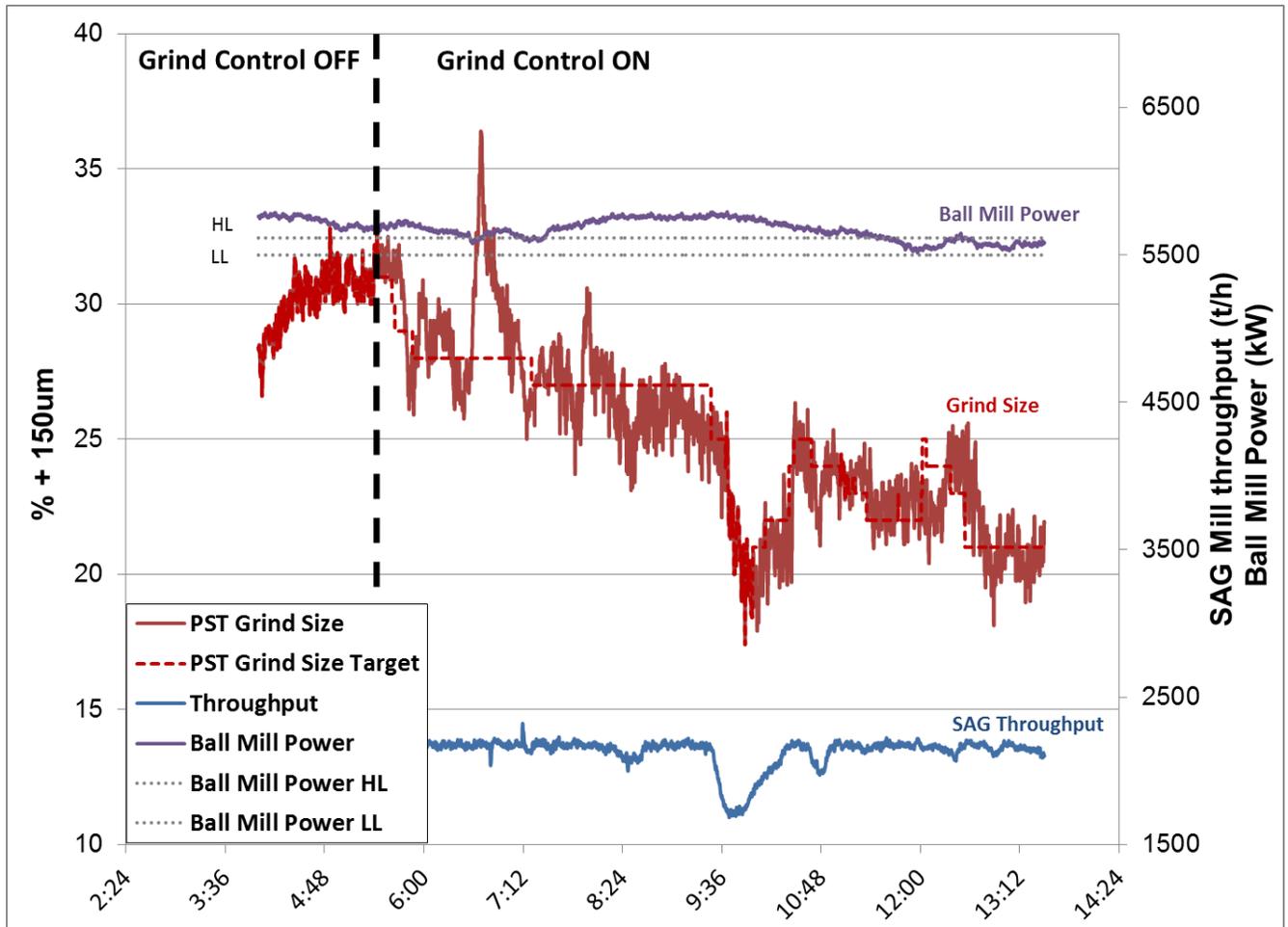


Figura 4 – Control de Tamaño de Partícula en el Molino de Bolas 8

Luego del satisfactorio resultado obtenido en las pruebas, como se muestra en la Figura 4, se desarrolló un esquema de control de variables múltiples que ajustaba el tamaño de partícula deseado dentro de los

límites aceptables (20 a 35 por ciento sobre 150 micrones) para lograr el consumo de potencia dentro de un rango objetivo de potencia de la molienda (92 a 95 por ciento). El esquema de control incluido restringe por ejemplo los límites altos del flujo de masa de alimentación del ciclón (indicación de la carga de recirculación) y los límites del nivel del sumidero de la alimentación del ciclón que tendrían efecto sobre la adición de agua de dilución.

El esquema de control descrito anteriormente fue implementado en Sistema Experto (monitoreo) que envía los puntos de ajuste apropiados a los controladores basados en sistemas subyacentes de control distribuido (DCS); incluyendo el controlador de densidad de alimentación del ciclón mencionado anteriormente. Esta arquitectura (Figura 5) sigue los principios del diseño de esquema jerárquico de control donde los sistemas de alto nivel determinan los puntos de ajuste de los controladores de nivel inferior. Se implementó en el DCS una versión simplificada del esquema de control supeditado a la pérdida de comunicación con el sistema experto.

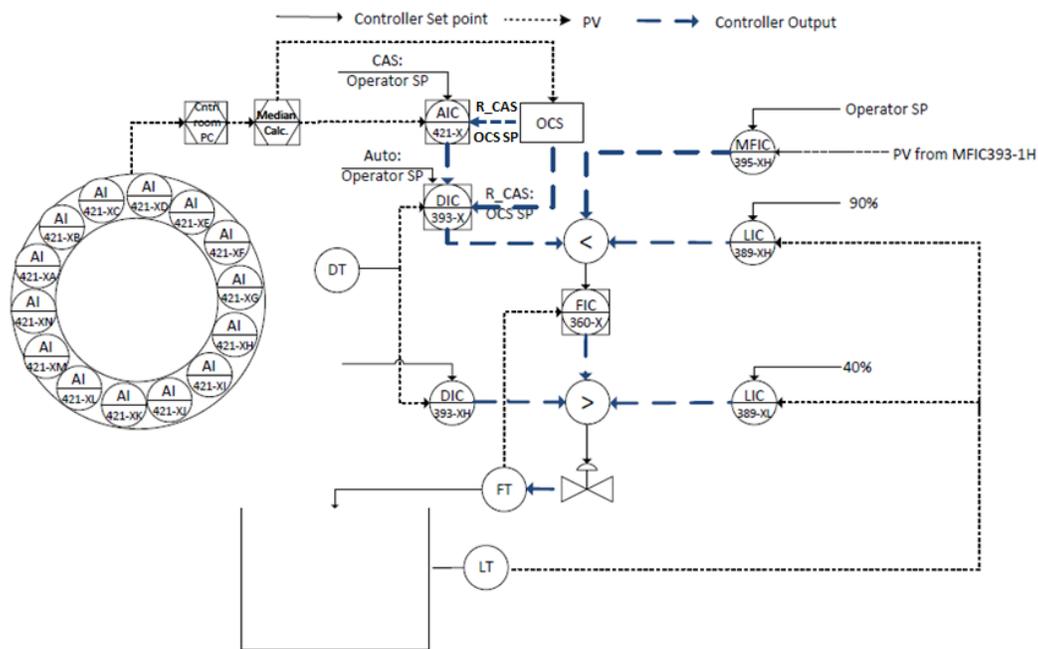


Figura 5 – Arquitectura de control del circuito de molino de bolas

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Como se describió anteriormente, se utilizó una línea de molino de bolas para desarrollar y llevar a cabo las pruebas de la nueva lógica de control. Cuando se concluyó el desarrollo, se aplicaron los cambios a las siguientes siete líneas restantes de molino de bolas en la concentradora. La Figura 6 muestra el uso del control desde el 1 de Enero al 1 de Junio de 2014. Se puede observar que en Mayo la utilización en todas las líneas estaba por sobre el 80 por ciento.

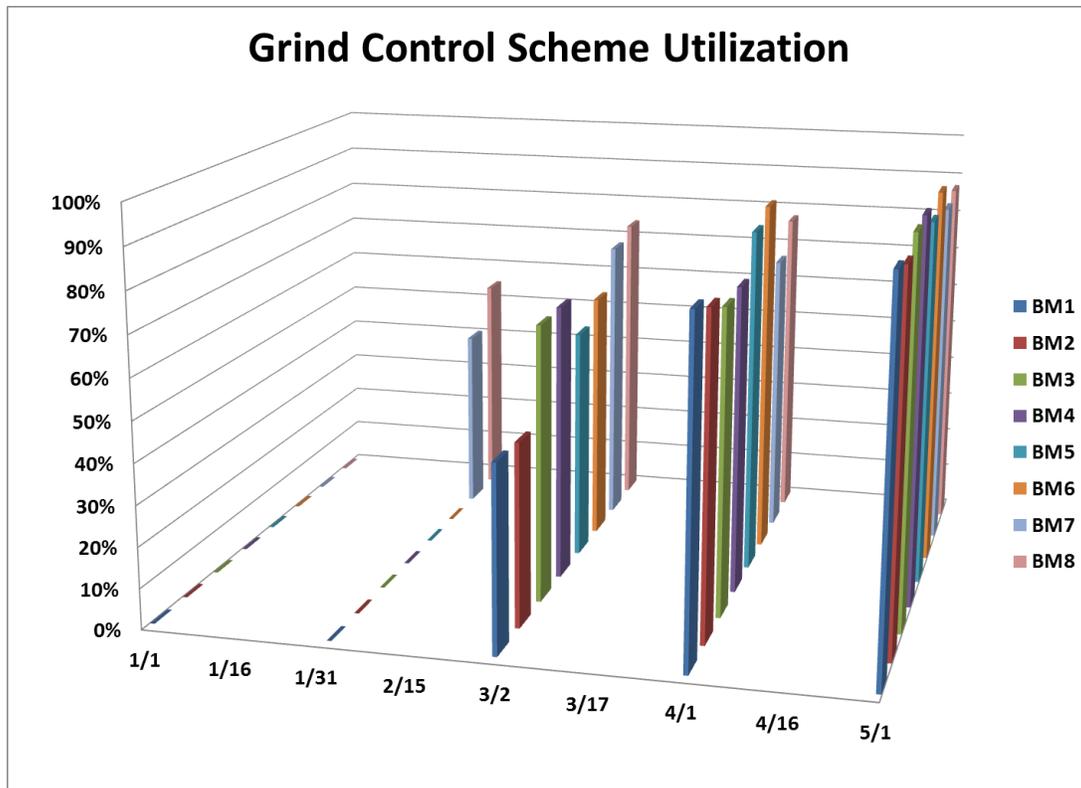


Figura 6 – Uso del Esquema de Control

Debido al éxito de la implementación y su rápida adopción, se realizó una prueba no oficial de condición ON/OFF durante el desarrollo del control. Por lo tanto, el período de cinco meses comprendido entre el 1 de Enero y el 1 de Junio de 2014, fue sometido a análisis para evaluar el efecto del nuevo esquema de control. La Figura 6 muestra que este período está claramente dividido en dos, cuando se usó el control y cuando éste no se usó.

Tamaño de Partícula vs. Producción

Como se describió anteriormente, la estrategia de control de la planta es no mantener un producto de tamaño de partícula constante proveniente de los ciclones, pero sí mantenerlo dentro de un rango aceptable (20 a 35 por ciento sobre 150 micrones). Por lo tanto, analizar el efecto del control es más complejo que la sola identificación de la distribución o varianza de un tamaño específico de partícula. Al observar la relación entre la producción y el tamaño de partícula, se puede examinar el rendimiento por modo de control de cada circuito de molienda. Las Figuras 7 hasta la Figura 14 muestran la señal del PST vs. los rendimientos globales por modo de control. La información utilizada corresponde a 1 hora de promedio y los datos fueron filtrados para incluir:

- rendimiento del molino SAG mayor a 900 t/h
- potencia de molino de bolas por sobre 3500 kW
- valores de PST superiores a un 9% sobre 150 micrones

El rendimiento global del molino SAG y el filtrado de potencia del molino de bolas tienen el objetivo de eliminar las condiciones anormales de operación tales como arranque y detención y/o restricciones graves

aguas arriba/abajo del proceso. El filtro de valor en el PST se debe al piso de ruido del sensor cuando los ciclones están operando con agua solamente.

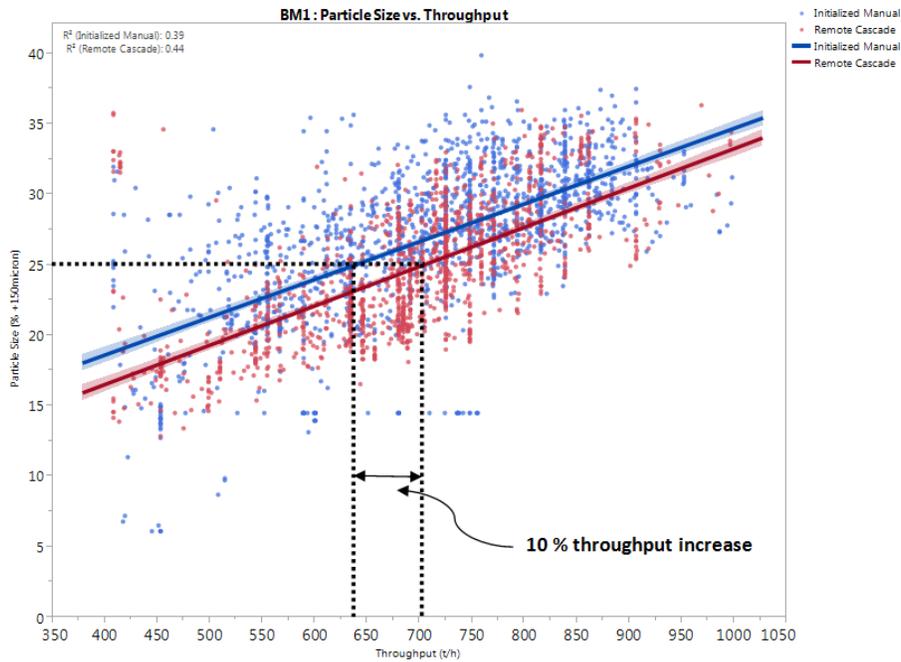


Figura 7 – Molino de Bolas 1, Tamaño de Partícula vs. Producción del Molino de Bolas por Modo de Control

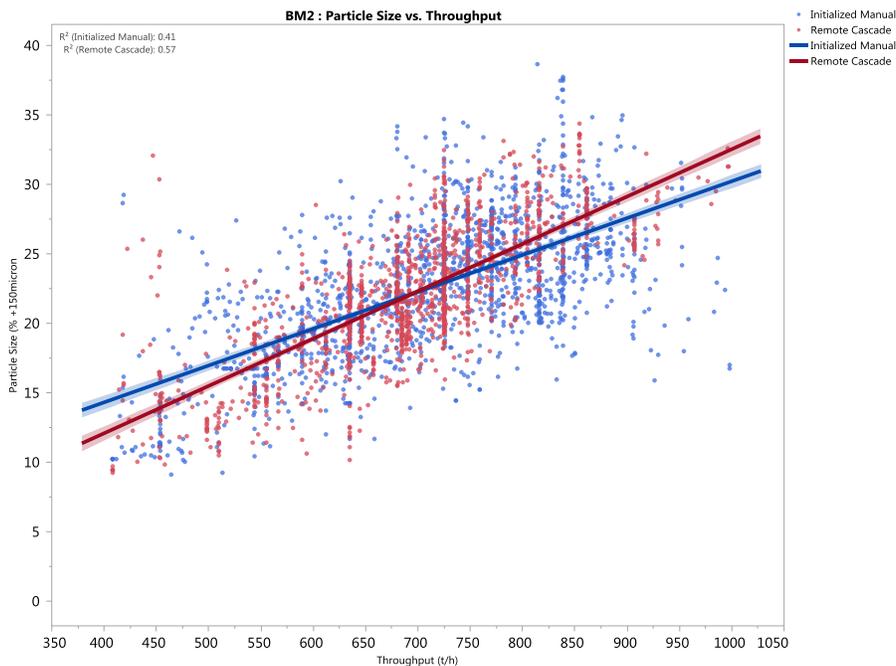


Figura 8 – Molino de Bolas 2, Tamaño de Partícula vs. Producción del Molino de Bolas por Modo de Control

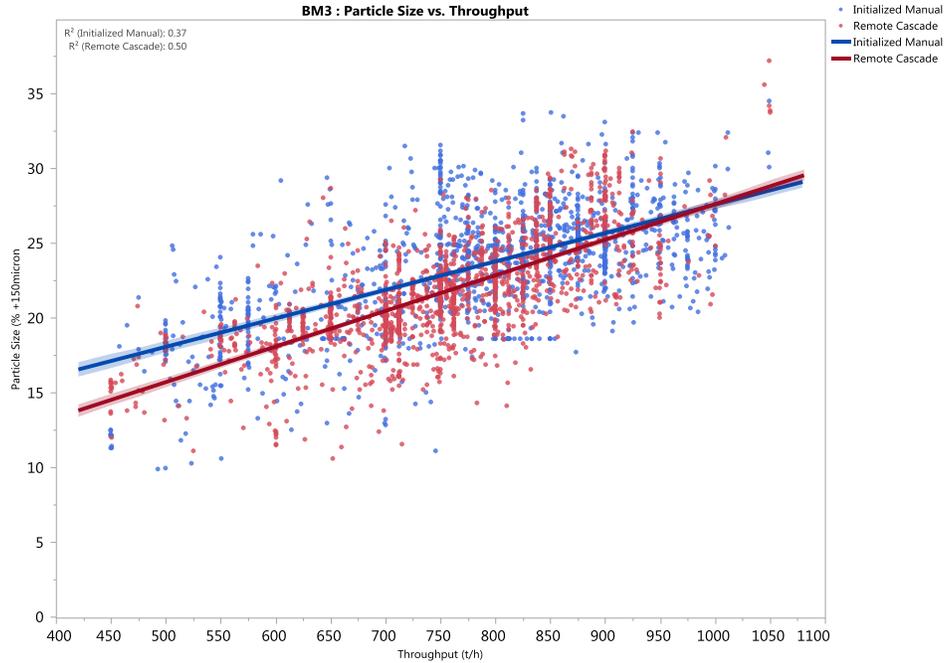


Figura 9 – Molino de Bolas 3, Tamaño de Partícula vs. Producción del Molino de Bolas por Modo de Control

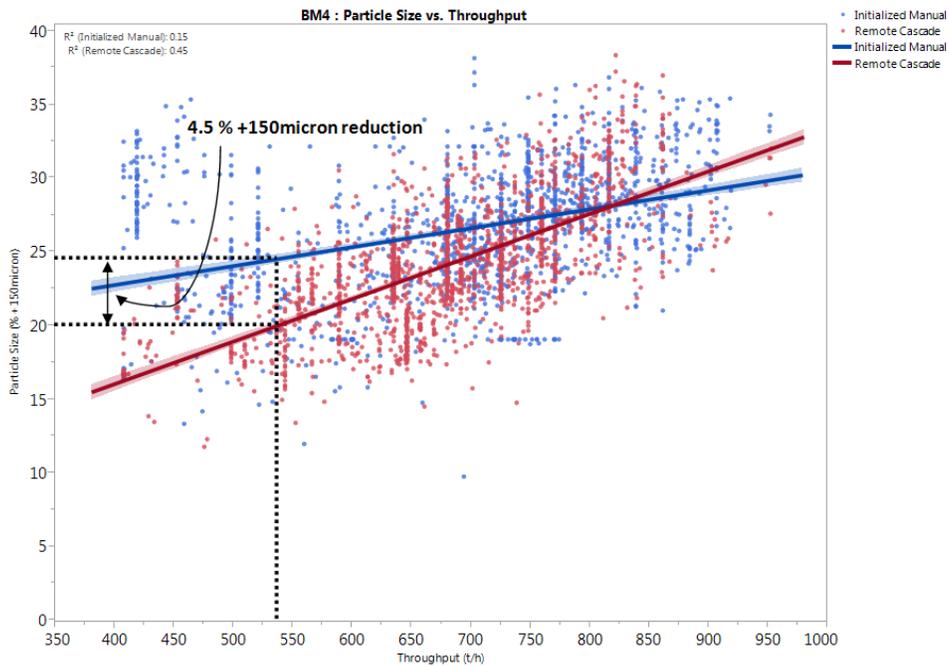


Figura 10 – Molino de Bolas 4, Tamaño de Partícula vs. Producción del Molino de Bolas por Modo de Control

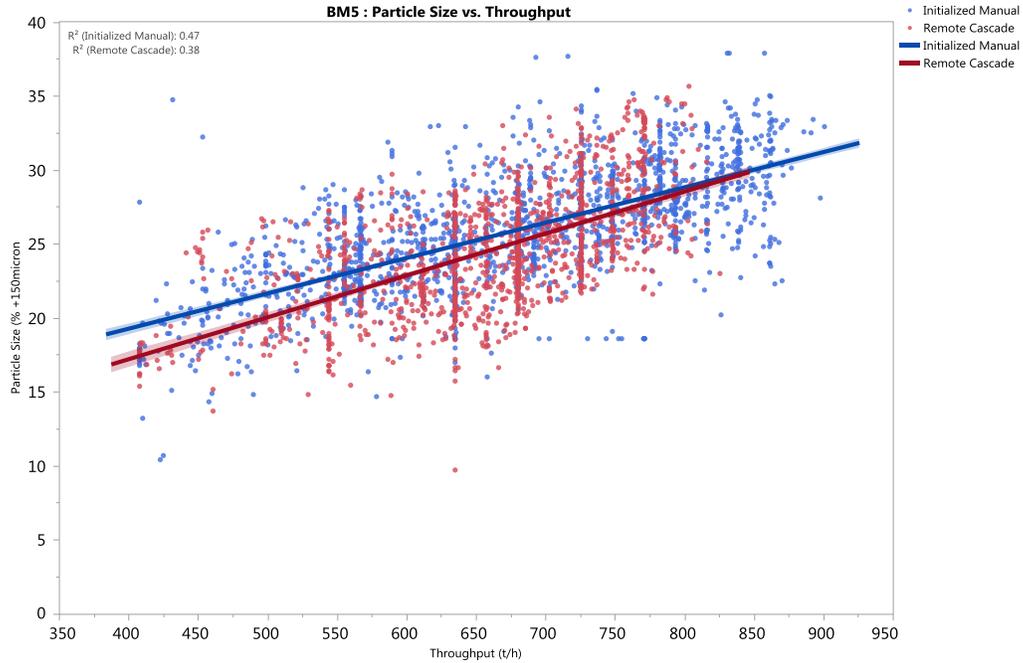


Figura 11 – Molino de Bolas 5, Tamaño de Partícula vs. Producción del Molino de Bolas por Modo de Control

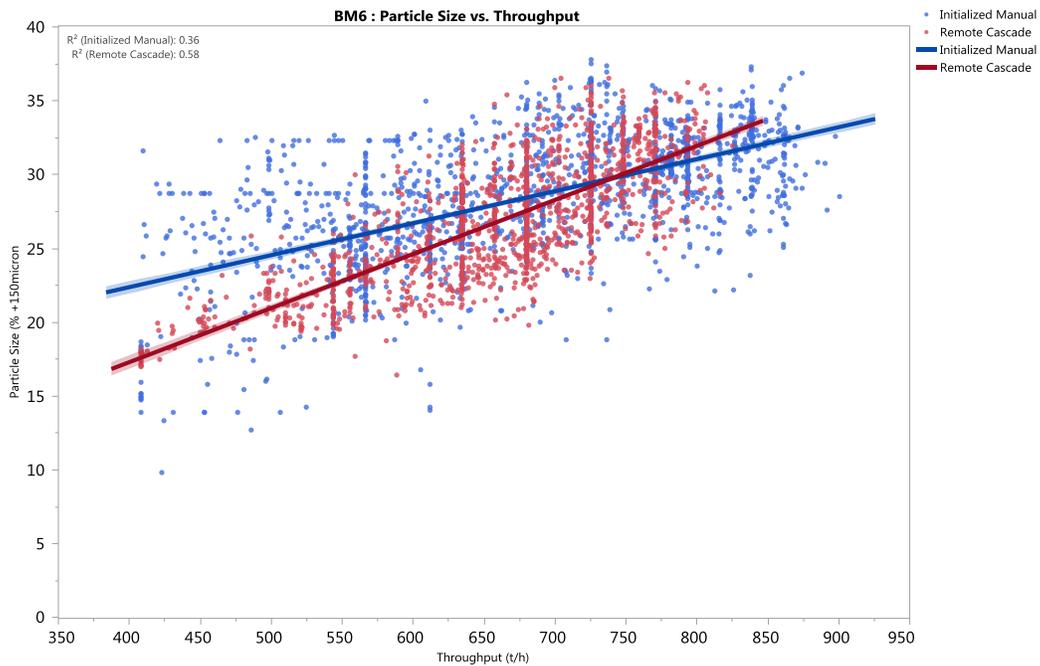


Figura 12 – Molino de Bolas 6, Tamaño de Partícula vs. Producción del Molino de Bolas por Modo de Control

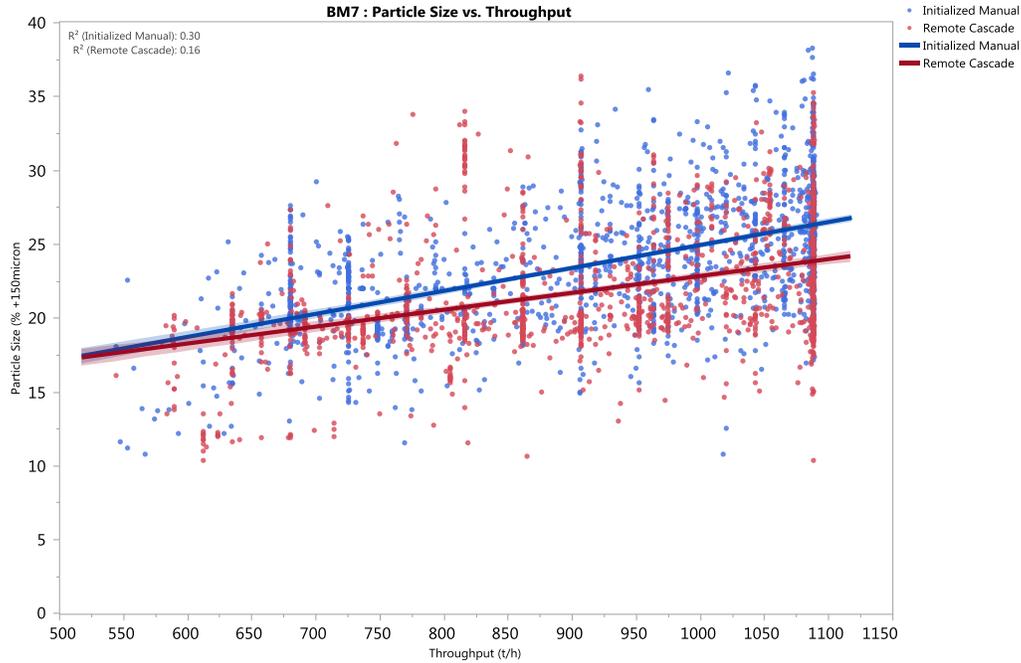


Figura 13 – Molino de Bolas 7, Tamaño de Partícula vs. Producción del Molino de Bolas por Modo de Control

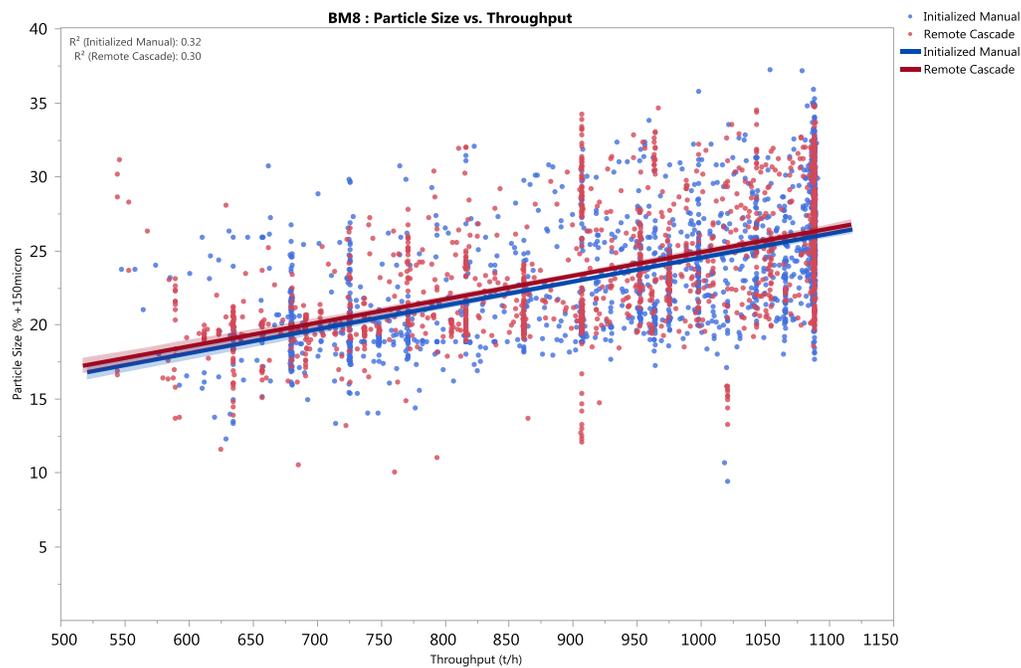


Figura 14 – Molino de Bolas 8, Tamaño de Partícula vs. Producción del Molino de Bolas por Modo de Control

Las tablas muestran que se ha producido un cambio en la relación tamaño de partícula-producción de la línea de operación entre la condición OFF del control y la condición ON. En general, esto representa la capacidad de lograr rendimientos mayores a un tamaño de partícula dado (rango) o un tamaño menor de partícula (rango) a una producción dada. Además del cambio en las líneas de operación, la información es también menos variable por la mayor correlación de las líneas con mejor condición, lo que sugiere que el proceso es más estable y está más controlado. Las tres excepciones corresponden a los molinos 5, 7 y 8. En el molino de bolas 5 probablemente se deba a una mayor distribución de puntos de datos a través del rango de rendimiento global en el estado de control ON. Los valores al cuadrado de R 0.32 (OFF) y 0.30 (ON) del molino de bolas 8 están muy cercanos lo que se debe a que el molino 8 es el molino de prueba para el desarrollo de control. La razón por la cual los modos de control no muestran esto se debe a que fue probado en forma manual por medio de un operador desde la sala de control. Así también, tanto para el molino 7 como para el molino 8 las correlaciones son bajas debido por la gran cantidad de puntos a producción máxima.

En el caso de los molinos de bola 3, 4, 5 y 6 el cambio de línea de operación es más evidente en las producciones más bajas. Esto podría explicarse porque la estrategia de control toma ventaja del exceso de capacidad en los molinos de bolas en producciones más bajas y asegura que la potencia del molino de bolas se mantenga dentro del rango objetivo. Históricamente, en escenarios con producciones más bajas (por ej. con mineral limitado) se puede suponer un tamaño de partícula menor, aunque podría existir la capacidad de realizar una molienda en forma más eficiente todavía.

La nueva estrategia de control ha demostrado hasta un 4,5 por ciento de disminución absoluta de tamaño de partícula sobre los 150 micrones (equivalente a ~30 micrones de reducción en P80) a la misma producción (Figura 10). Para el mismo tamaño de partícula se ha demostrado una diferencia de tamaño del 10 por ciento en la producción (Figura 7).

Consumo de Energía

La nueva estrategia ha demostrado una reducción de hasta 0,95 kwh/t en el consumo específico de energía en el mismo tamaño de partícula (Figura 15). Si fuera sostenido en todos los molinos de bolas, basándose en los rendimientos globales de la planta y la disponibilidad, esto podría llegar a ahorros en consumo de energía por sobre los 450 MWh al año. El mecanismo para esta mejora es evitar los bajos niveles de carga para asegurarse de que la energía consumida se está utilizando en la reducción de tamaño del mineral. Las Figuras 15 a la 22 muestran el consumo específico de energía (kW/t de alimentación fresca) y el tamaño de partícula PST por modo de control en el período comprendido entre el 1 de Enero de 2014 y el 1 de Junio de 2014.

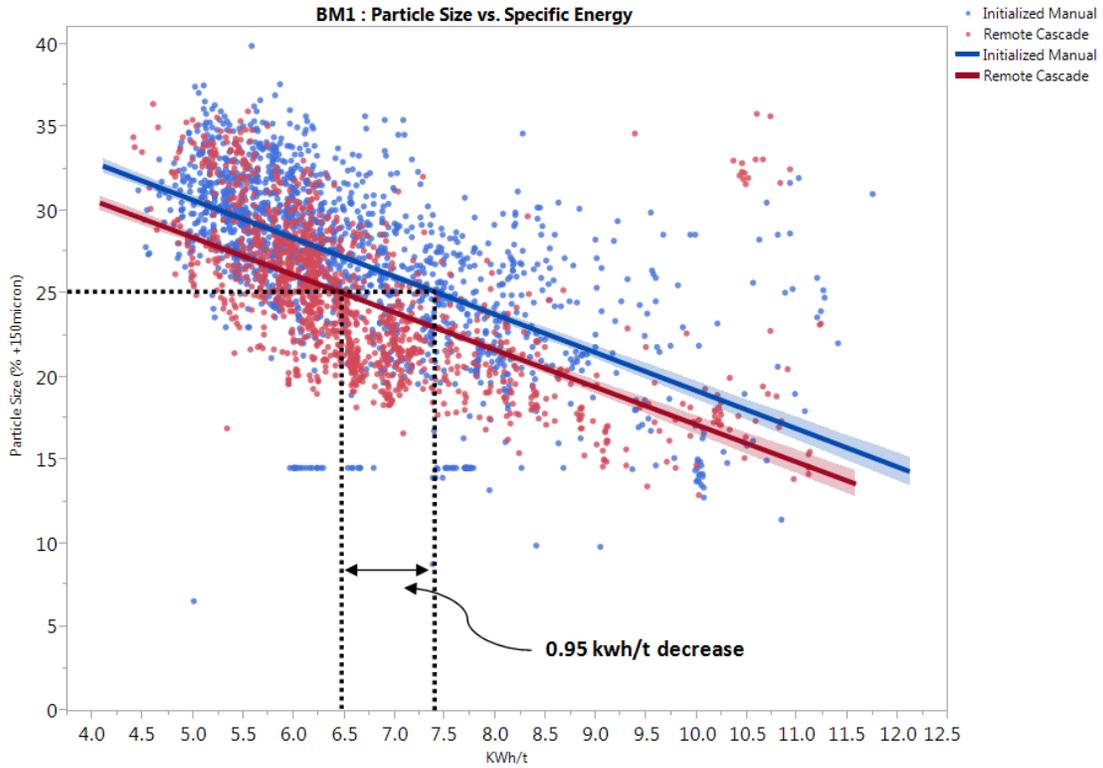


Figura 15 – Molino de Bolas 1, Tamaño de Partícula vs. Energía Específica por Modo de Control

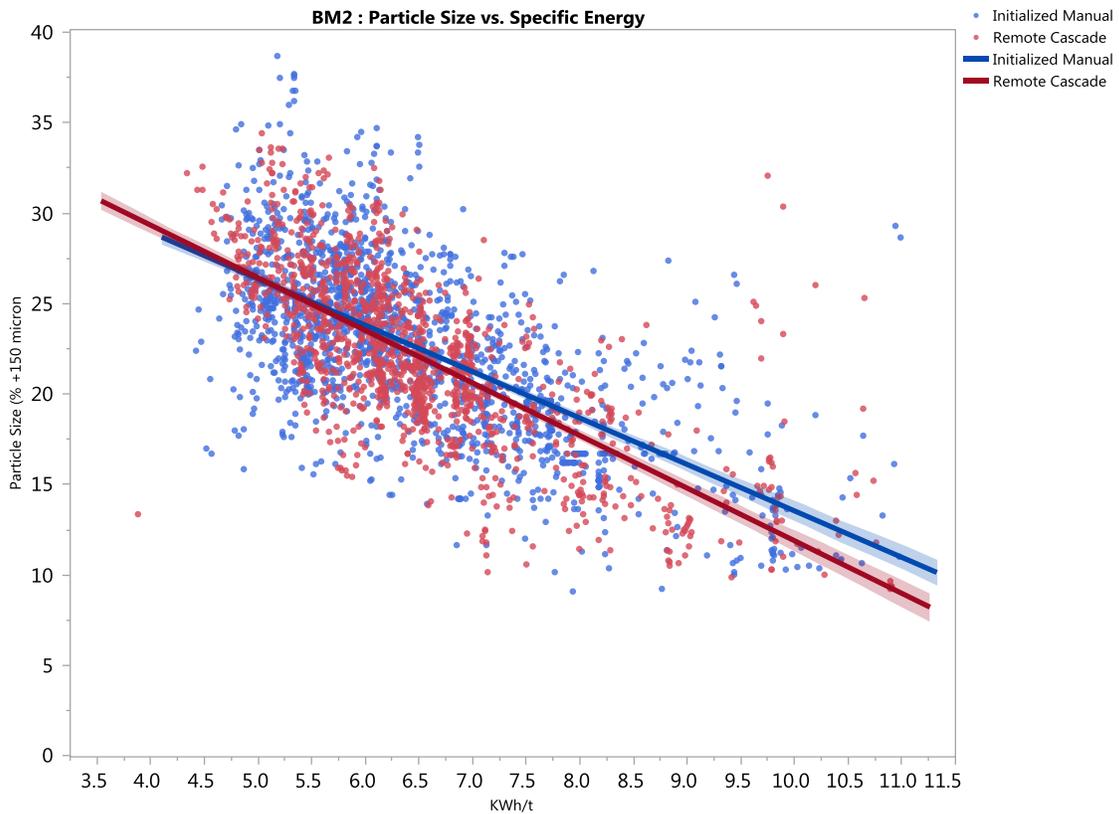


Figura 16 – Molino de Bolas 2, Tamaño de Partícula vs. Energía Específica por Modo de Control

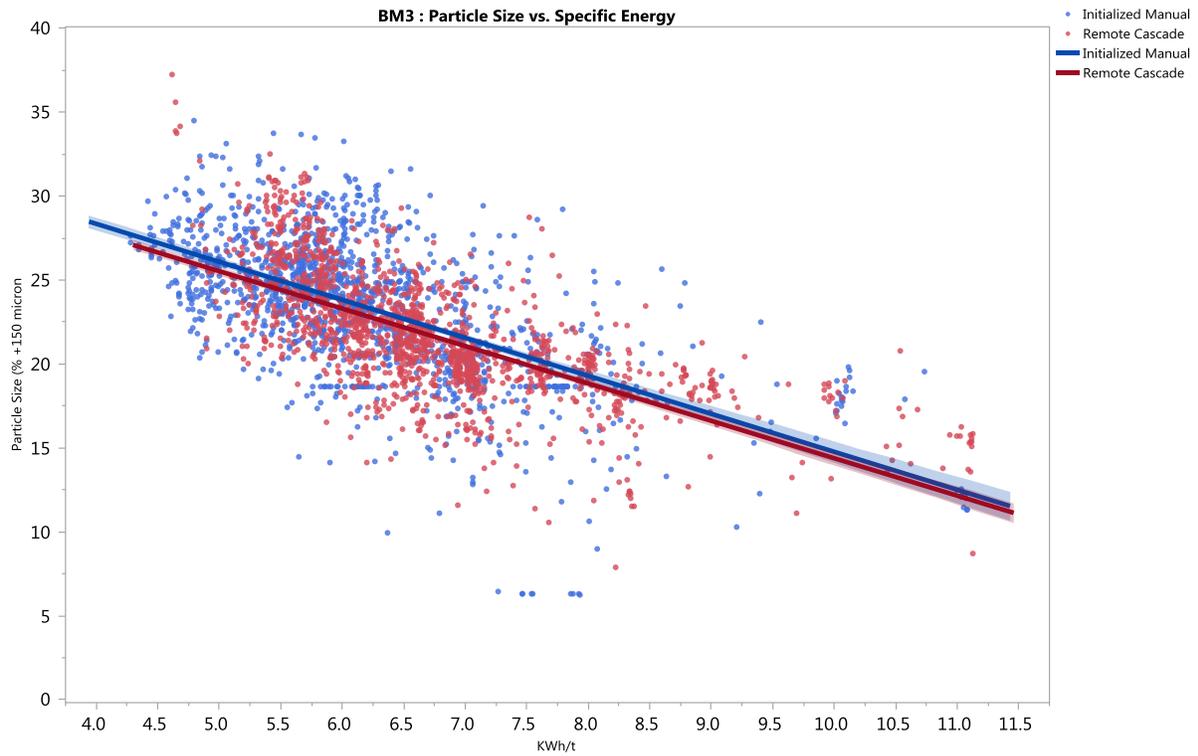


Figura 17 – Molino de Bolas 3, Tamaño de Partícula vs. Energía Específica por Modo de Control

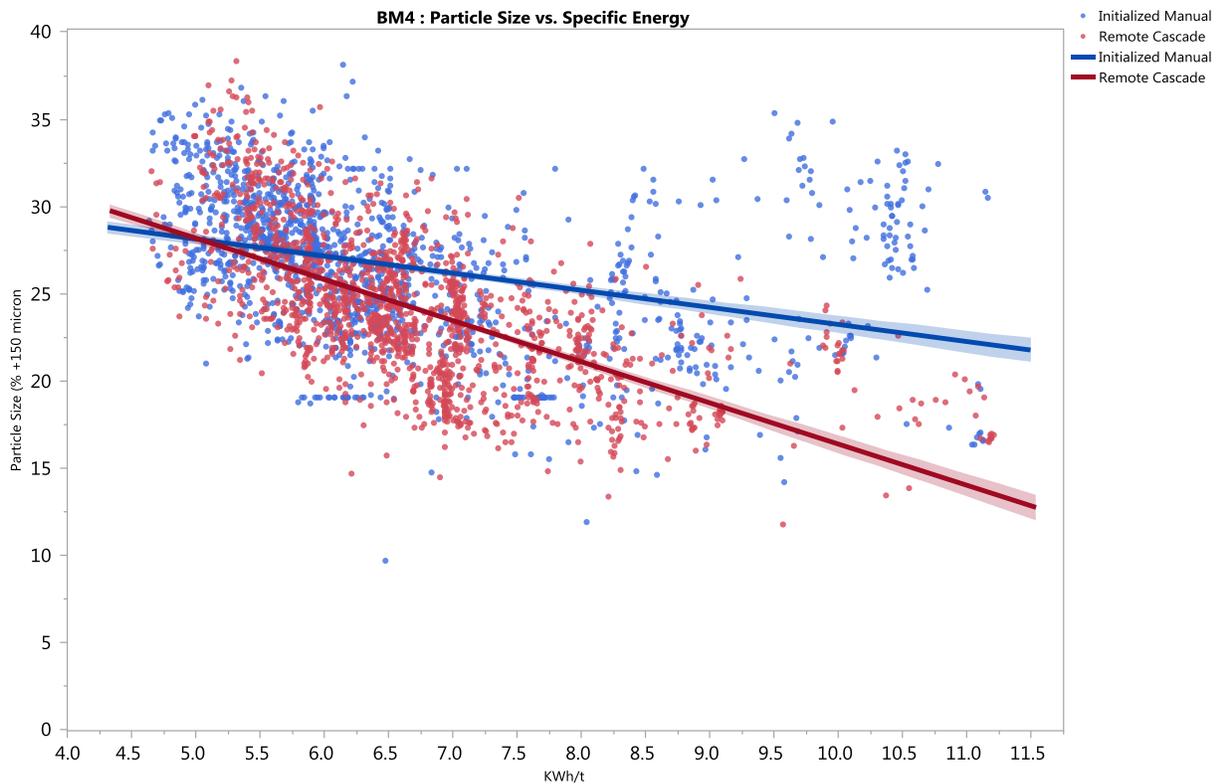


Figura 18 – Molino de Bolas 4, Tamaño de Partícula vs. Energía Específica por Modo de Control

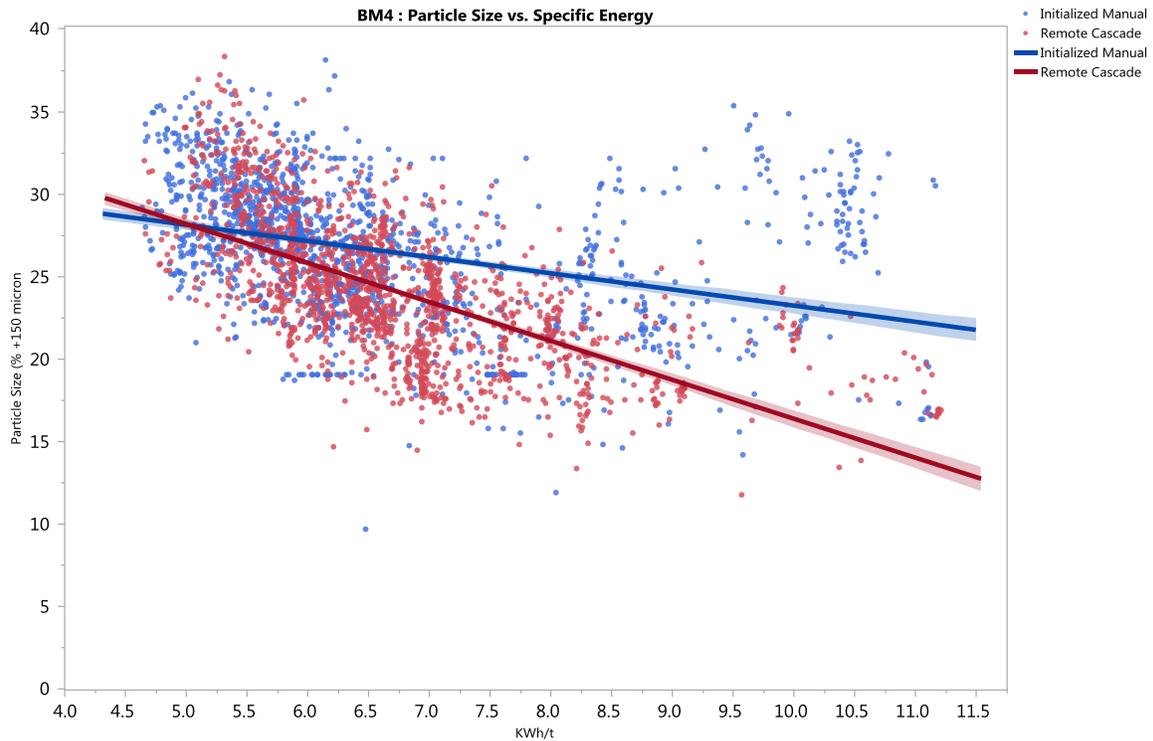


Figura 19 – Molino de Bolas 5, Tamaño de Partícula vs. Energía Específica por Modo de Control

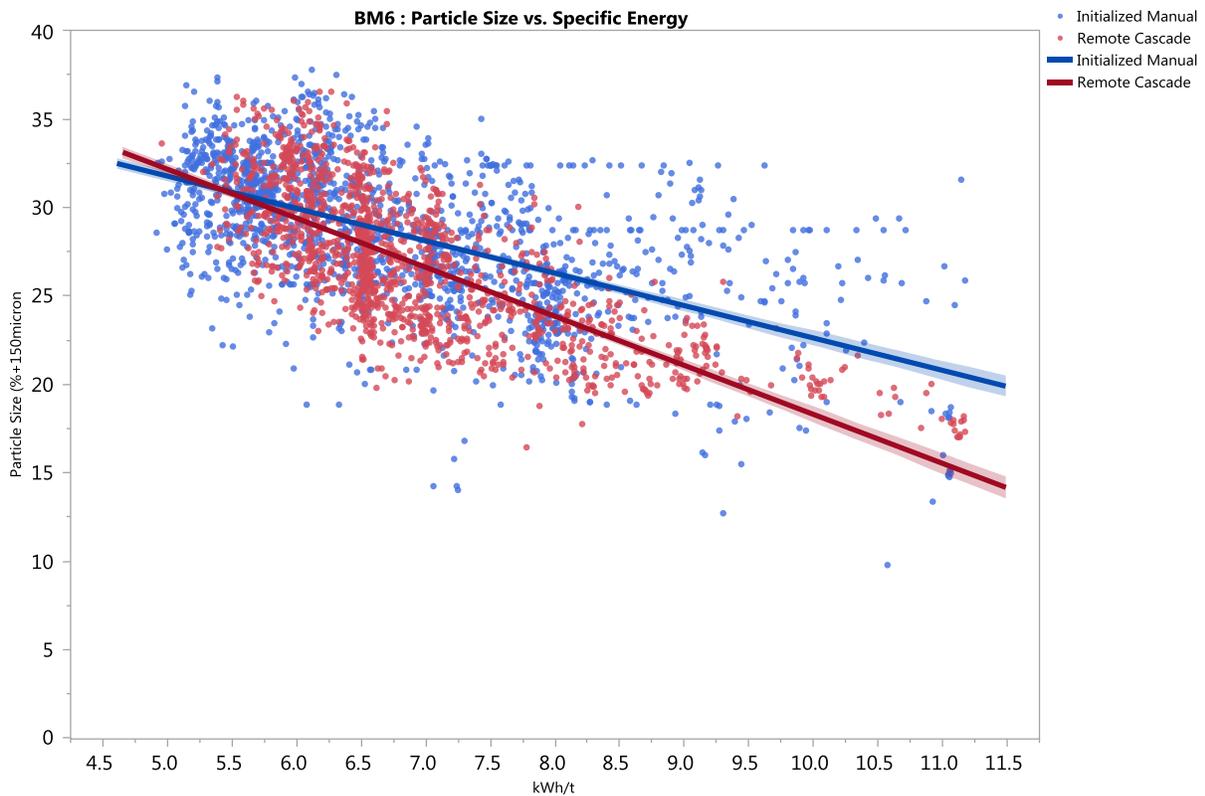


Figura 20 – Molino de Bolas 6, Tamaño de Partícula vs. Energía Específica por Modo de Control

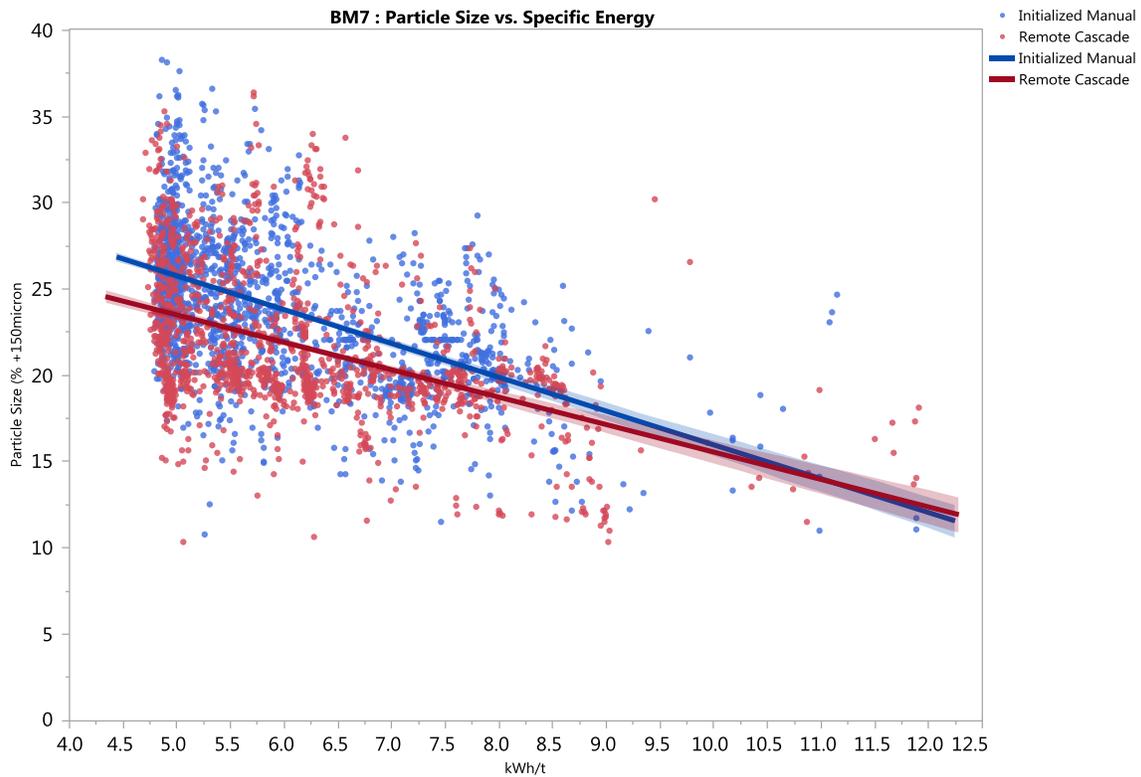


Figura 21 – Tamaño de Partículas vs. Energía Específica por Modo de Control

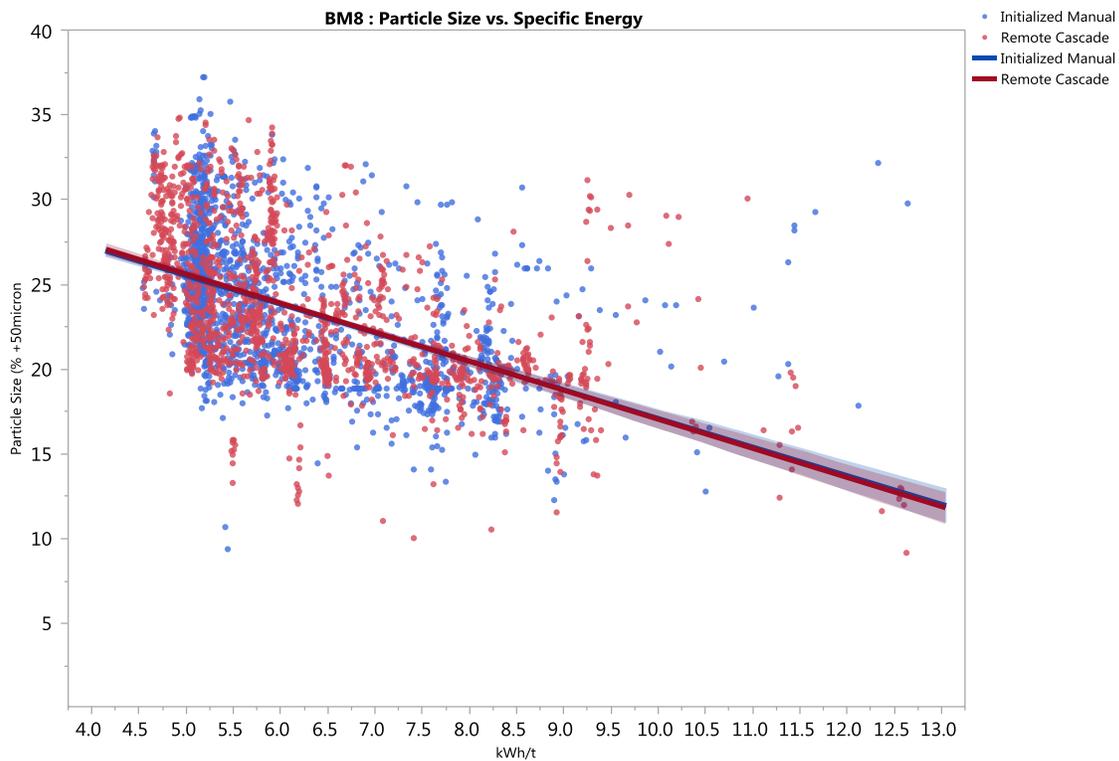


Figura 22 – Molino de Bolas 8 Tamaño de Partícula vs. Energía Específica por Modo de Control

CONCLUSIONES

Río Tinto Kennecott ha implementado una nueva estrategia de control en el circuito de molinos de bolas utilizando una nueva tecnología de medición de tamaño de partículas.

La estrategia fue desarrollada en un período de 3 meses y fue adoptada rápidamente por el personal de operaciones. La naturaleza jerárquica del diseño del esquema de control así como la incorporación de controles automáticos de restricción ha resultado en un 80 a 90 por ciento de utilización del esquema de control. La información de planta ha demostrado las siguientes mejoras de funcionamiento:

- El tonelaje procesado se incrementó en 10% mientras se mantuvo el mismo porcentaje de partículas con un tamaño mayor a 150 micrones.
- El porcentaje de partículas con un tamaño mayor a 150 micrones se redujo en 4,5% mientras se mantuvo el mismo tonelaje procesado.
- Reducción de 0,95 kwh/t del consumo de energía específica mientras se mantuvo el mismo porcentaje de partículas con un tamaño mayor a 150 micrones.

AGRADECIMIENTOS

El equipo de trabajo a cargo de este esfuerzo conjunto conformado por personal de CiDRA y Río Tinto Kennecott agradece la cooperación recibida del personal de operaciones de la planta concentradora durante el desarrollo, implementación y fases operativas de esta trabajo. La rápida adopción de este desarrollo fue clave en la captura inmediata de valor para la empresa. El equipo encargado del desarrollo conjunto de este trabajo también quisiera agradecer a la gerencia de la concentradora por su permanente apoyo durante la ejecución del proyecto. Su apoyo es fundamental para establecer una solución que signifique una captura de valor para la empresa que sea sostenible en el largo plazo.

REFERENCIAS

Jones, S.M. and Pena, R.F., 1999. Milling for the millenium, in *Proceedings of Copper 99-Cobre 99 International Environment Conference*, Volume II - Mineral Processing/Environment, Health and Safety, pp 191-204 (The Minerals, Metals & Materials Society)

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.