

## **Monitoreo de Flujo Perfeccionado para Mejorar la Eficiencia del Proceso por medio de Nueva Tecnología que utiliza Arreglos de Sensores Pasivos No Invasivos**

**Christian O'Keefe**

CiDRA Minerals Processing, Wallingford, CT, USA

**Robert Maron**

CiDRA Minerals Processing, Wallingford, CT, USA

**Paul Rothman**

CiDRA Minerals Processing, Wallingford, CT, USA

**RESUMEN:** El procesamiento industrial de minerales tiene algunos requerimientos muy exigentes en cuanto a medición de flujo que no han sido adecuadamente cubiertos por las tecnologías utilizadas por los medidores tradicionales, como es el caso de los flujómetros electromagnéticos y Doppler. Un nuevo principio de medición de flujo que supera muchas de las desventajas de los enfoques tradicionales ha sido descubierto y puesto en práctica en más de 152 plantas de procesamiento. Esta tecnología se basa en la combinación de un arreglo axial de sensores pasivos enrollados alrededor de la parte exterior de la cañería de proceso y algoritmos de procesamiento, que pueden determinar con precisión la tasa de flujo volumétrico de la mayoría de los fluidos incluyendo gases, líquidos y pulpas, así como también la líquidos y pulpas con contenido de aire arrastrado. A continuación se describirá el principio de operación junto con ejemplos de la capacidad del medidor para entregar mediciones de flujo precisas y confiables en las líneas de alimentación a hidrociclones/clasificadores, en detección de fugas en cañerías y la presencia de pulpa con contenido de mineral magnético, como la magnetita.

### **INTRODUCCIÓN**

La medición precisa y robusta del flujo volumétrico real es necesaria en muchas áreas críticas de la preparación de minerales. Entre estas áreas se incluye la detección de fugas en las líneas o tuberías de relaves, control de ciclones de medios densos e hidrociclones, la carga adecuada de los depósitos para separación de medios densos y de clasificadores, balance masico, carga de circuito de flotación y otros aspectos del monitoreo y control del proceso. El uso de la tecnología tradicional de los flujómetros electromagnéticos, de ultrasonido Doppler, diferencial de presión o Coriolis para obtener una medición del flujo real ha resultado ser un desafío para los ingenieros de control de proceso, dadas las muchas influencias existentes en el proceso. Estas influencias incluyen acumulación de residuos en la pared de la cañería, presencia de magnetita, cambio en las propiedades del fluido del proceso, variaciones de calibración y la presencia de burbujas de aire arrastrado. Ahora es posible, en la mayoría de los casos, realizar mediciones precisas del flujo en presencia de estas influencias por medio del uso de la última generación de tecnología de medición de flujo basada en el arreglo de sensores. Además, actualmente es posible obtener nuevas mediciones tales como la cantidad de burbujas de aire arrastradas en una pulpa o líquido. Esta última se usa para monitoreo de bombas, medición de flujo volumétrico real, corrección de densímetros nucleares para asegurar la operación a la gravedad específica deseada y para las mediciones de flujo de masa; y lo realiza con mucha precisión y confiabilidad, sin necesidad de hacer contacto con la pulpa. Esta tecnología fue inventada hace una década para la industria del gas natural y petróleo, y ha sido ampliamente adoptada en el procesamiento de minerales durante los últimos cinco años.

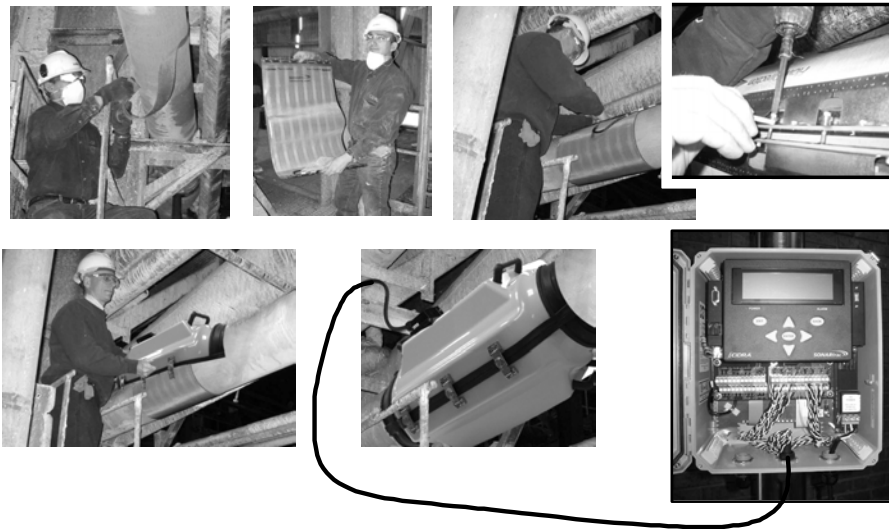
### **PRINCIPIO DE OPERACIÓN**

#### **General**

Los flujómetros de este tipo operan utilizando un arreglo de sensores sonares pasivos con algoritmos de procesamiento para detectar, rastrear y medir las velocidades medias de las perturbaciones coherentes que viajan en la dirección axial de una cañería. Estas perturbaciones se agrupan en tres categorías mayores: turbulencias transportadas por el flujo, ondas acústicas en el fluido y las vibraciones transmitidas por medio de las paredes de la cañería. Cada clase de perturbación viaja a una cierta velocidad. Por ejemplo, el flujo transportará remolinos turbulentos, variaciones de densidad u otras características de fluido a la tasa del flujo del fluido. Los flujos con contenido principalmente líquido pocas veces exceden los 9 m/s. Generalmente las ondas acústicas en el fluido tendrán una velocidad mínima de 80 m/s y una máxima de 1500 m/s. El tercer grupo, las vibraciones de cañerías, viaja a velocidades que son varias veces mayores que las ondas acústicas. Así, cada clase de perturbación puede ser claramente identificada y medida con precisión.

### Accesorios del Arreglo Pasivo

En la representación comercial de este principio de medición, se enrolla y aprieta una banda flexible de sensores pasivos alrededor de la cañería. Este es un ajuste en seco y no requiere gel u otros acopladores porque no se utilizan ondas de ultrasonido. La banda del sensor siempre tiene 50 cm. de longitud en la dirección axial de la cañería y en la dimensión ortogonal es igual a la circunferencia de la cañería. En la **Figura 1** se describe el procedimiento de instalación típica y los accesorios. Primero se limpia la cañería y se arenan o liman las irregularidades para eliminarlas. Segundo, la banda flexible del sensor se enrolla alrededor de la cañería y se aprieta contra la cañería con una serie de tornillos imperdibles o cautivos. Cada tornillo usa un grupo de golillas de resorte para permitir la expansión y contracción de la cañería y además asegurar una fuerza de apriete sin necesidad de usar llaves de torque o destornilladores. Tercero, sobre la banda del sensor se instala una cubierta protectora con elementos electrónicos de diagnóstico y acondicionamiento de señal y se conecta a los elementos electrónicos de la cubierta. Cuarto, se instala el cable que va desde la cabeza del sensor al transmisor y se conecta con el transmisor. Quinto, el menú del panel frontal del transmisor es muy fácil de usar y se utiliza para configurar el transmisor.



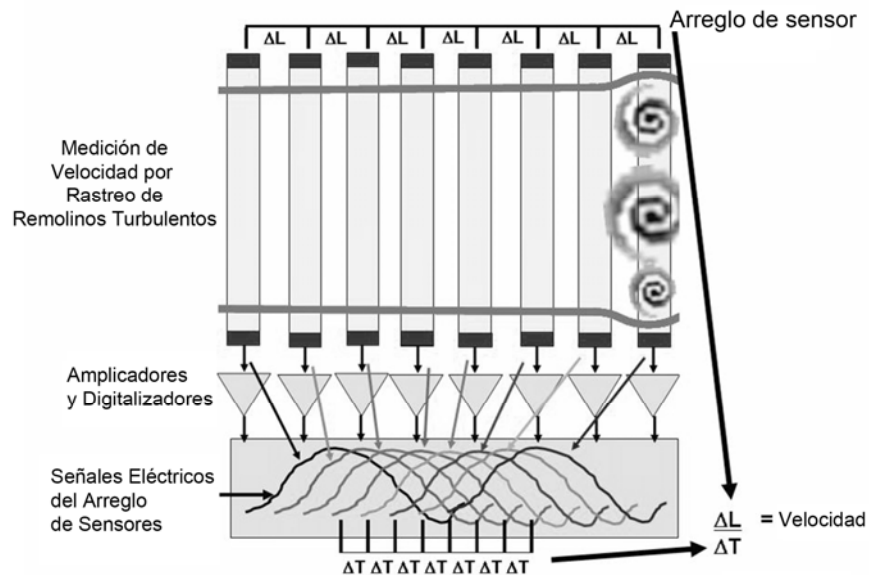
**Figura 1. Procedimiento de la instalación desde la preparación de la cañería (superior izquierda) hasta la limpieza de la cañería y arenado suave hasta el montaje de la banda del sensor que es flexible y de bajo peso (superior centro y superior derecha), hasta la instalación de la cubierta del sensor y conexión de la cubierta con el transmisor a través de un cable tenso ((inferior centro e inferior derecha)**

### Medición de Velocidad de Flujo

La velocidad del flujo puede determinarse enfocándose en las interferencias que son transportadas por el flujo. Estas interferencias pueden corresponder a variaciones de densidad, variaciones de temperatura, remolinos turbulentos u otros fenómenos. Dentro de la mayoría de los procesos industriales, la interferencia más común en el flujo es la turbulencia. El flujo turbulento está compuesto de remolinos, también conocidos como vórtices o remolinos turbulentos, que serpentean y se arremolinan en forma totalmente aleatoria dentro de la cañería. La velocidad media general de las interferencias es igual a la velocidad del flujo. Estos remolinos turbulentos se crean continuamente. Una vez creados, los remolinos se disgregan en cada vez más pequeños vórtices hasta que se hacen tan diminutos que son disipados en forma de calor a través de los efectos viscosos del fluido. En diferentes diámetros de cañerías de flujo descendente, estos vórtices permanecen coherentes y retienen su estructura y tamaño antes de disgregarse en vórtices menores. Los vórtices en una cañería tienen un amplio rango de tamaños que están limitados por el diámetro de la cañería en los más grandes y por las fuerzas de la viscosidad en los vórtices más pequeños. Estos vórtices se distribuyen a través de la sección cruzada de la cañería y, por lo tanto, a través del perfil de flujo. Así, la velocidad promedio del fluido puede ser determinada rastreando las velocidades axiales promedio de todo el conjunto de vórtices.

La medición de las velocidades axiales promedio de un grupo de vórtices o de las variaciones de densidad se obtiene a través de la combinación de un arreglo de sensores pasivos y el arreglo sonar de algoritmos de proceso. La secuencia de eventos que se produce para que esta medición sea posible es la siguiente:

- El paso de los remolinos turbulentos o las variaciones de densidad crea un leve cambio de presión en el interior de la pared de la cañería
- Este pequeño cambio de presión resulta en una presión dinámica de la pared misma (En la parte derecha de la Figura 2 se muestra una ampliación)
- La señal de presión dinámica mecánica se convierte en una señal eléctrica a través de un sensor pasivo que está enrollado parcial o totalmente alrededor de la cañería - no se requiere líquidos ni gel para acoplar el sensor a la cañería
- Esta señal eléctrica es detectada por cada elemento del arreglo de sensores. Estos sensores están espaciados entre sí por una distancia precisamente determinada a lo largo de la dirección axial de la cañería.
- La señal eléctrica de cada elemento sensor es interpretada como una marca característica de los componentes de frecuencia y fase de la interferencia bajo el sensor.
- Un arreglo de algoritmos de proceso combina la información de fase y frecuencia de la característica de los elementos del grupo sensor para calcular la velocidad de la marca característica anterior cuando se propaga bajo el arreglo de sensores. En la mayoría de las aplicaciones se requiere de una tasa de flujo mínima de 0,9 m/s (3 f/s) para medir la velocidad de flujo



**Figura 2. Ilustración de la presión inducida en las paredes de la cañería al pasar los remolinos turbulentos que resultan en señales similares detectadas por los elementos del sensor con diferencias de tiempo o fase y que conducen a la medición de la velocidad**

Existen muchos desafíos al realizar esta medición en un ambiente industrial. El más difícil es distinguir las interferencias vorticales de relativo bajo nivel de los relativamente altos niveles de ruido. Este ruido incluye acústica y vibraciones generadas en las bombas de gran tamaño y las válvulas. La fortaleza del algoritmo de procesamiento del arreglo es su capacidad de aislar y medir las velocidades de los componentes vorticales de bajo nivel dentro del flujo.

Estas mediciones de velocidad han sido demostradas en muchos tipos de cañerías con una amplia variedad de revestimientos. Las cañerías incluyen acero, PVC, HDPE (polietileno) y fibra de vidrio. Las cañerías pueden ser revestidas o no. En el caso de las cañerías con revestimiento, esto ha sido demostrado en revestimientos de goma, uretano, cemento, basalto y Teflón, así como también, en aquellas con acumulación de residuos.

### Medición de velocidad del sonido y fracción vacía de gas (Burbujas de aire arrastrado)

La tecnología basada en el arreglo de sensores también puede utilizarse para rastrear las ondas acústicas que viajan en el fluido. En la mayoría de las plantas de procesamiento de minerales existe abundancia de ondas acústicas que se propagan dentro de las cañerías de proceso. Estas ondas acústicas son naturalmente generadas a partir de diferentes fuentes. Estas fuentes incluyen las bombas, el flujo que atraviesa los cambios geométricos de las cañerías y las burbujas dentro del fluido que generan ondas acústicas a través de sus oscilaciones naturales. Estas ondas acústicas son de baja frecuencia (en el rango audible) y circulan en dirección axial en la cañería con longitudes de onda mucho mayores que las burbujas de aire arrastrado.

En los fluidos de fase múltiple que consisten en un gas mezclado con un líquido o pulpa, la velocidad acústica puede ser utilizada para determinar la cantidad de gas arrastrado (fracción vacía del gas) cuando hay gas en la forma de burbujas que están bien mezcladas dentro del líquido o pulpa (Wood, 1930). Dado que las longitudes de onda de las ondas acústicas son mucho mayores que el tamaño de la burbuja, se produce una relación compleja que transforma la velocidad acústica en una función de la fracción vacía del gas. La velocidad del sonido es proporcional a la raíz cuadrada de la razón de la compresibilidad y la densidad, las cuales resultan muy influenciadas por el contenido de aire. En la Figura 3 se muestra un ejemplo de la relación resultante. Los valores particulares descritos por la curva de esta figura son influenciados por otros factores, especialmente la presión. Así, debe medirse o calcularse la presión en el punto de ubicación del instrumento con arreglo de sensores. Una vez determinada la presión, el instrumento se utiliza para medir en forma precisa la velocidad del sonido, y la relación entre velocidad de sonido y contenido de aire arrastrado se utiliza para cuantificar con exactitud la cantidad de aire arrastrado.

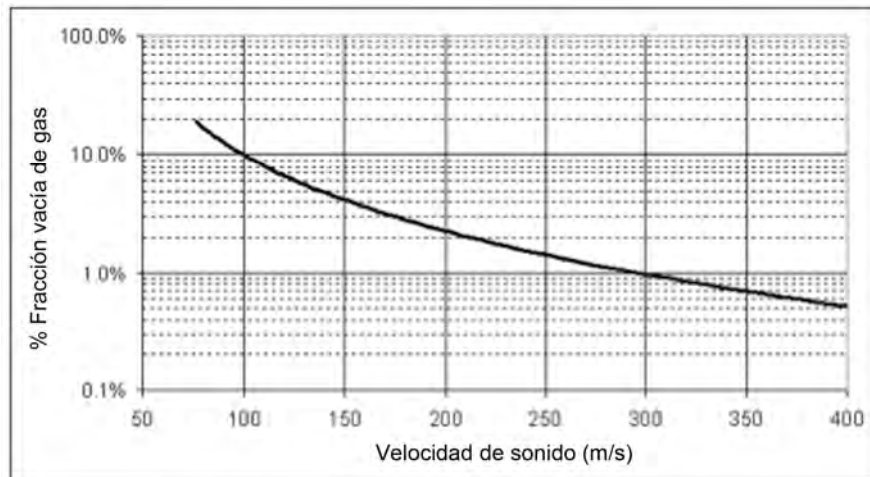


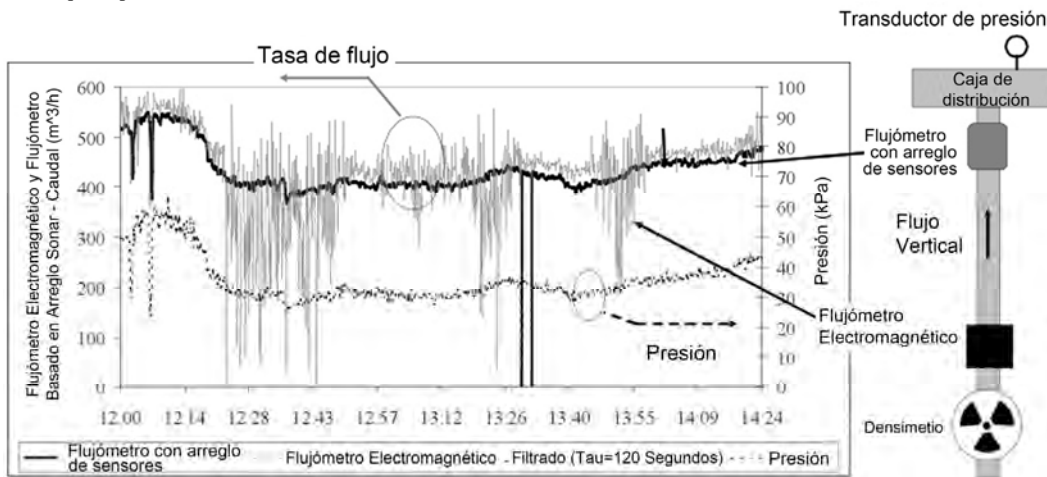
Figura 3. Ejemplo de una relación entre fracción vacía de gas (burbujas de aire arrastrado) y velocidad del sonido

### ESTUDIOS DE CASOS OPERACIONALES

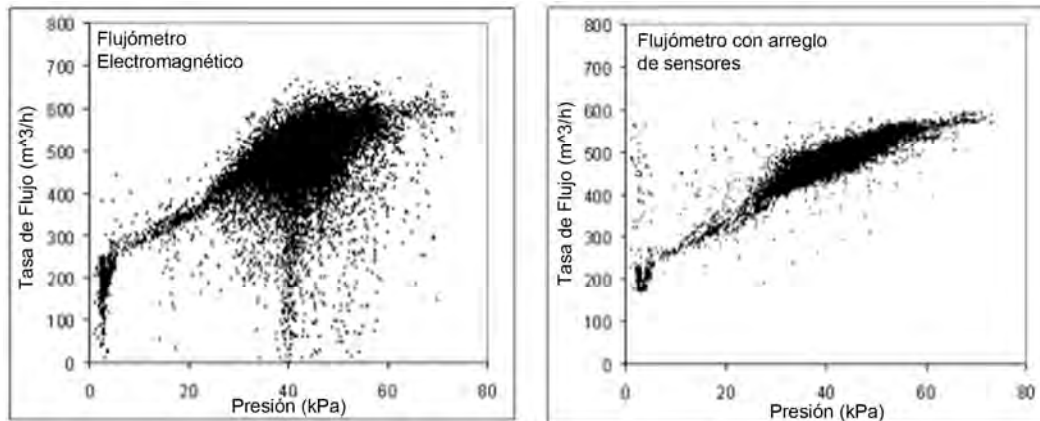
Cada tecnología de flujómetro tiene un ámbito de aplicaciones en los que entrega un valor claro al cliente. En los flujómetros pasivos estas aplicaciones incluyen algunas con mineral magnético, como es el caso de la magnetita, pirrotita y arsenopirita; o bien situaciones con acumulación de residuos, flujos abrasivos o corrosivos, flujos de pulpa, líquidos o pulpas con aire arrastrado; situaciones en las que no es recomendable detener el flujo, líneas de alta presión, operaciones que necesitan precisión a largo plazo, y situaciones en las que las fugas pueden provocar un problema de seguridad. Algunas de éstas se discutirán en este documento.

**Alimentación a Batería de Hidrociclones y Clasificador: Comparación de Lecturas de Presión entre Flujómetro con Arreglo de Sensores y Flujómetro Electromagnético**

En las instalaciones de una mina en plena faena de procesamiento de minerales se comparó la precisión y comportamiento ante el ruido del flujómetro con arreglo de sensores con respecto del flujómetro electromagnético. Ambos flujómetros fueron instalados en una sección vertical de una cañería de polietileno de 300 mm como se ilustra a la derecha de la **Figura 4**. El flujo pasaba a través de ambos flujómetros y luego subía a una caja de distribución que estaba equipada con un transductor de presión. Se registraron las lecturas de ambos flujómetros, el transductor de presión, un densitómetro nuclear, un sensor de nivel del colector y la velocidad de la bomba en intervalos de cinco segundos. Durante el período de obtención de datos, la densidad y el nivel del colector fueron bastante constantes, así, de los resultados obtenidos de los flujómetros sólo se compararon la presión y la velocidad de la bomba. Dado que el flujo descargaba de la caja de distribución a través de una serie de válvulas a presión atmosférica, las lecturas del transductor de presión se usaron como una forma de medición de presión diferencial del flujo. La presión es una función del número de válvulas abiertas y sus posiciones, la densidad de la pulpa y el cuadrado de la velocidad. Con condiciones de válvula y densidad constantes, se asume que la presión variará sólo como una función del cuadrado de la velocidad.

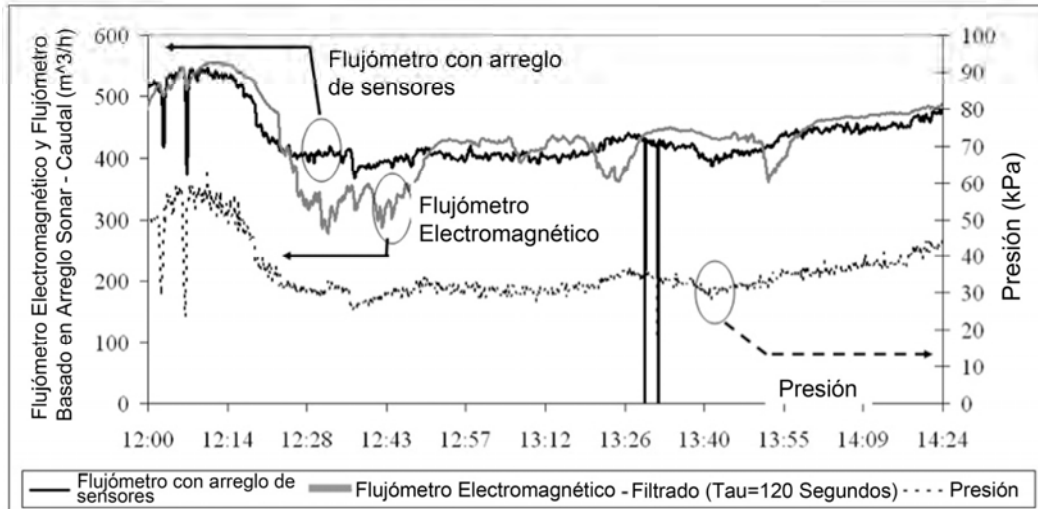


**Figura 4:** Comparación de lecturas obtenidas del flujómetro de arreglo de sensores, el flujómetro electromagnético y el transductor de presión



**Figura 5. (Izq.)** Trazado transversal de las lecturas del flujómetro electromagnético versus la presión. **(Derecha)** Trazado transversal de las lecturas del flujómetro con arreglo de sensores versus la presión

De forma similar la velocidad reportada por cada flujómetro debería variar como una función de la raíz cuadrada de la presión, como se ilustra en una comparación de las lecturas del flujómetro con arreglo de sensores versus las lecturas de la presión, según se muestra en la sección derecha de la **Figura 5**. Debido a la inconsistencia de las lecturas obtenidas del flujómetro electromagnético, es difícil determinar con estas lecturas la variación, como se aprecia en la sección izquierda de la **Figura 5**. Después de la aplicación de filtros a la lectura del flujómetro electromagnético, se puede observar en la **Error! Reference source not found.** una tendencia general relativa a las lecturas del transductor de presión y los flujómetros con arreglo de sensores. Las mediciones erróneas en las lecturas del flujómetro electromagnético no pueden ser atribuidas al material magnético que pasa a través del flujómetro o al material que golpea los electrodos. En contraste, el flujómetro con arreglo de sensores muestra una excelente concordancia con la lectura de la presión.

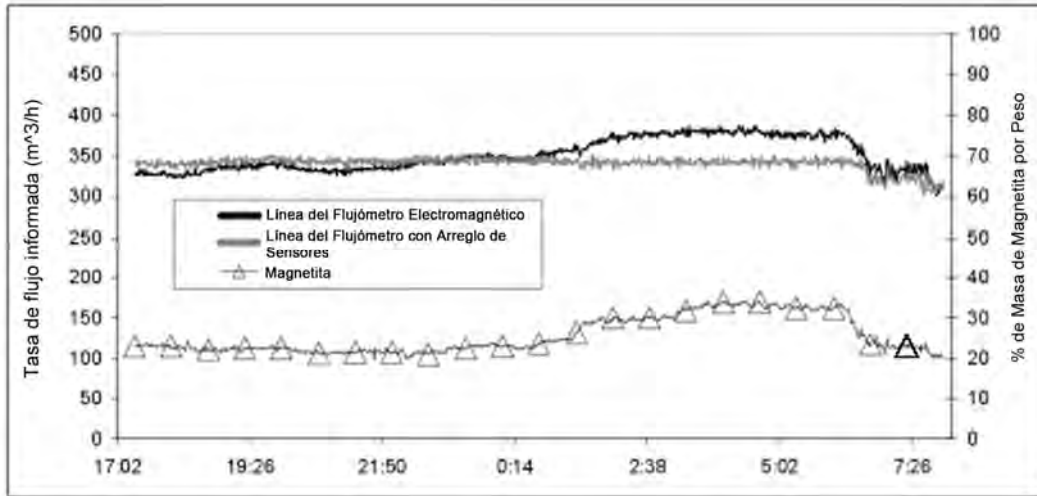


**Figura 6. Comparación de lecturas entre el flujómetro con arreglo de sensores y las lecturas de la presión junto con la lectura filtrada del flujómetro electromagnético (filtro de primer orden de 120 segundos aplicado al flujómetro electromagnético)**

#### Medición de flujo en la presencia de magnetita u otro mineral magnético

La magnetita es usada comúnmente en procesos de separación de medios densos, pero implica algunos retos para la medición de flujo con flujómetros electromagnéticos. La magnetita, incluso en cantidades pequeñas, cambia el campo magnético dentro del medidor electromagnético y puede causar que el flujómetro registre una tasa de flujo mayor que la real, o que introduzca una gran cantidad de ruido en la medición de la tasa de flujo. Los fabricantes de flujómetros electromagnéticos han intentado evitar el impacto del mineral magnético con una tercera bobina, con mediciones magnéticas en terreno y ajustes manuales basados en muestras de laboratorio de la pulpa típica. Estos métodos han producido resultados mixtos en los que, en muchas ocasiones, la calibración o el ajuste cambian, dependiendo de la cantidad de magnetita presente.

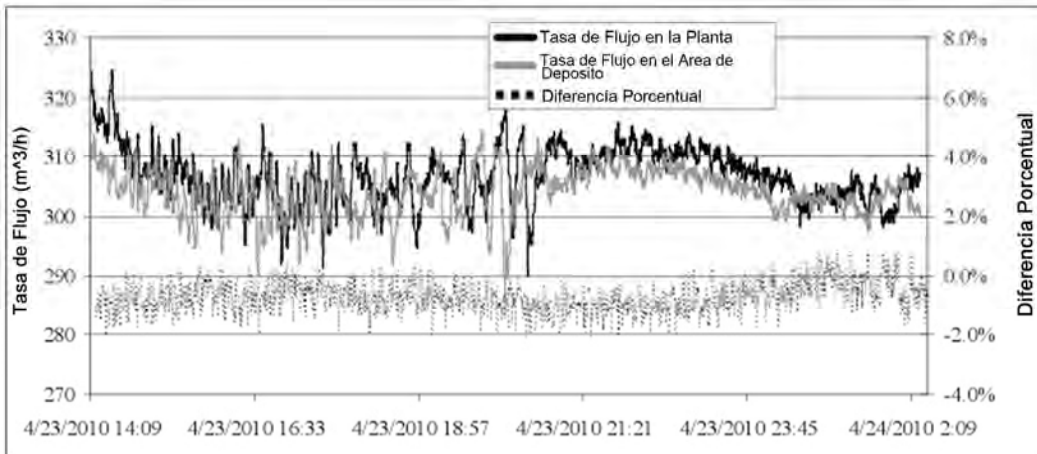
Una mejor solución es usar una tecnología de medición de flujo que no sea afectada por la presencia de magnetita. Dado que la tecnología de arreglo de sensores utilizada en el sistema de monitoreo de flujo no depende del uso de ningún campo magnético, es totalmente inmune a los efectos de la magnetita. En la **Figura 7** se ilustra un ejemplo en el que se compara un flujómetro de arreglo de sensores con un flujómetro electromagnético. En esta prueba, la tasa de flujo se mantuvo constante desde el comienzo del período mostrado en la figura hasta aproximadamente la hora 06:00. En la figura se puede apreciar que en la medida que aumenta la densidad del mineral magnético, el flujómetro electromagnético erróneamente informa una mayor tasa de flujo, mientras que el flujómetro de arreglo de sensores continúa informando correctamente que no hay cambio en la tasa de flujo.



**Figura 7** El flujoímetro electromagnético responde erróneamente a la magnetita mientras que el flujoímetro con arreglo de sensores informa las lecturas en forma correcta.

#### Detección de Fugas en Cañerías

Debido a la preocupación por el cuidado ambiental y el deseo de detectar la pérdida de concentrado, la detección de filtraciones es un aspecto importante en la operación de las cañerías. Hasta ahora, pocas cañerías podían utilizar el método de contabilización volumétrica, también conocido como detección de fugas de flujo de masa, dado el alto ruido y descalibraciones ocurridos en las tecnologías más antiguas, como es el caso de los flujoímetros de ultrasonido Doppler y los electromagnéticos. La tecnología del flujoímetro basada en un arreglo de sensores, como el sistema de monitoreo de CIDRA, ha permitido el uso de métodos de contabilización volumétrica para la detección de filtración. En la **Figura 8** se muestra un ejemplo de cómo se aplicó a una línea de relaves de desechos de carbón. La línea negra representa la señal obtenida del flujoímetro con arreglo de sensores instalado en el extremo de la planta de una cañería de polietileno de 10" (250mm) y la línea gris es la señal de un flujoímetro con arreglo de sensores instalada en el extremo de descarga de la misma cañería, a una distancia aproximada de 1500 m entre ambas cañerías. La línea punteada es el porcentaje de diferencia entre las dos lecturas y generalmente se mantiene entre +/- 2%. Este nivel generalmente puede conseguirse si los flujoímetros están apropiadamente instalados en los puntos adecuados y si la cañería se opera en forma correcta.



**Figura 8.** Detección de filtración en cañería de relaves de carbón con resultados obtenidos en ambos flujoímetros de sensores y la diferencia de las lecturas expresada en porcentaje

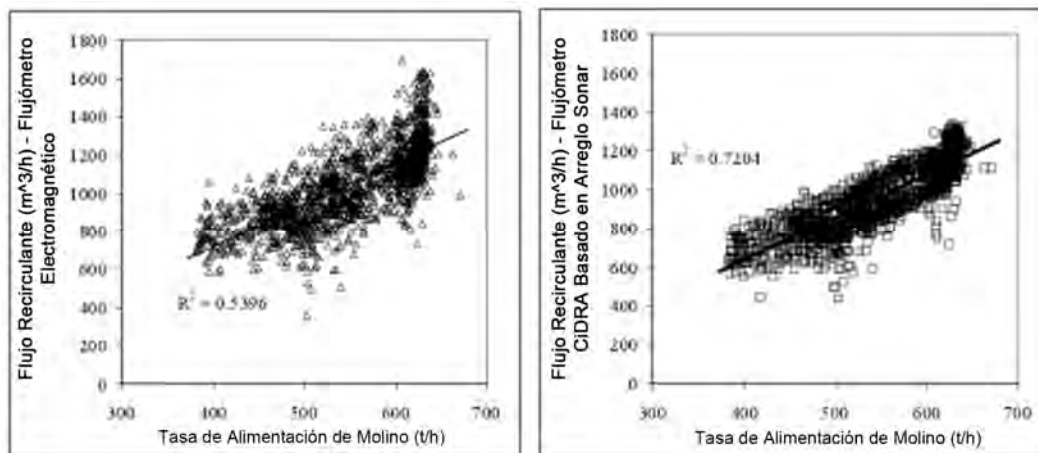
### Control de Flujo de Alimentación del Clasificador utilizando Flujómetro con Arreglo de Sensores

El flujo de alimentación del clasificador se utiliza generalmente para efectos de control con el objetivo de administrar la carga circulante a manera de optimizar la tasa de alimentación al molino, mientras que, a la vez, evita la sobrecarga y maximiza el rendimiento. En una aplicación particular se instrumentó una línea de alimentación de 400mm con un flujómetro electromagnético y un flujómetro con arreglo de sensores.

A altas tasas de alimentación de molino es flujómetro electromagnético tiende a inestabilizarse y producir ruido por causa del aire arrastrado y el impacto de los sólidos en los electrodos. La medición del flujo ruidoso provoca que el sistema de control reaccione y reduce la linealidad entre la alimentación del molino y la carga circulante. El resultado es que la carga circulante no puede ser usada como limitador del molino y el rendimiento resulta entonces reducido.

Al aplicar la tecnología basada en arreglo de sensores a la cañería de alimentación del clasificador del molino para medir el flujo volumétrico y el aire arrastrado, se ha implementado una estrategia de control efectivo para mantener la linealidad entre la carga circulante y la alimentación al molino. A la izquierda de la **Figura 9** se observa una representación de la carga circulante versus la tasa de alimentación al molino de la forma en que es medida por el flujómetro electromagnético. Un ajuste lineal de estos datos produce un  $R^2$  de 0,53. A la derecha de la **Figura 9** se observa una reproducción de la carga circulante versus la tasa de alimentación medida por el flujómetro con arreglo de sensores. Un ajuste lineal de estos datos produce un  $R^2$  de 0,72.

La tecnología de arreglo de sensores y el principio fundamental de medición lo hace insensible al alto contenido de sólidos y de aire arrastrado dentro del flujo de proceso. Esto permite al operador maximizar el rendimiento del circuito de molienda. Además del control del rendimiento del circuito de molienda, también se puede optimizar el funcionamiento del clasificador. Esto se logra utilizando la lectura de aire arrastrado para corregir la medición de densidad en la alimentación al clasificador.



**Figura 9. (Izq.) Tasa de flujo circulante versus tasa de alimentación al molino medida por el flujómetro electromagnético. (Der.) Tasa de flujo circulante versus tasa de alimentación al molino medida por el flujómetro de CIDRA con arreglo de sensores**

### RESUMEN

La tecnología de flujómetro con arreglo de sensores ha sido probada en el campo y cuenta con la experiencia de años de operación sin necesidad de mantención en plantas concentradoras y cañerías en todo el mundo. El uso de esta tecnología resuelve problemas de rendimiento y mantenimiento de largo plazo en la medición de flujo. Estos problemas incluyen la medición confiable y repetible en la presencia de pulpas abrasivas, pulpas con cambio continuo de contenido de sólidos, cañerías con acumulación de residuos, minerales magnéticos y flujos de concentrado con alto contenido de aire. Esta capacidad perfeccionada para la medición de flujo permite a los operadores controlar con mayor precisión los procesos críticos. Entre tales procesos se incluye la producción de los molinos al controlar la carga circulante, el balance de masas del circuito de flotación y la contabilización del concentrado final al medir el flujo y corregir la medición de la densidad, además de la administración de la cañería por medio de una medición robusta del flujo. Esta tecnología que cuenta con una capacidad de monitoreo remoto integrado pensado para la mina del futuro, está siendo usada actualmente en más de 700 aplicaciones en monitoreo de flujo de procesamiento de minerales en 22 países.