

FELIX, J., O'KEEFE, C. y MARON, R. Tecnología basada en un arreglo no invasivo y su aplicación en las mediciones de flujo en el procesamiento de mineral de hierro. *Conferencia de Metalurgia de Minerales de Hierro y Manganese*, Instituto Sudafricano de Minería y Metalurgia, 2011.

# Tecnología basada en un arreglo no invasivo y su aplicación en las mediciones de flujo en el procesamiento de mineral de hierro

J. FELIX\*, C. O'KEEFE† y R. MARON†

*\*Felix Project Management and Consulting Services*

*†CiDRA Minerals Processing*

La medición precisa y repetible de las tasas de flujo volumétrico en las plantas de procesamiento de mineral de hierro es particularmente difícil. Esto podría deberse a las variaciones del proceso e ineficiencias, pero también al uso de instrumentación inadecuada. La separación por medios densos (SMD) es una de las técnicas utilizadas en el proceso de beneficio del mineral de hierro. El medio denso o transportador utilizado en estas plantas de SMD generalmente está compuesto por materiales como la ferrosilicona (FeSi), pero ocasionalmente también se usa magnetita triturada como medio de transporte. Este medio de transporte magnético ha demostrado tener una influencia poco deseable sobre las mediciones entregadas por flujómetros del tipo electromagnético. En los procesos de flotación las burbujas de aire arrastrado también crean problemas para los flujómetros tradicionales, incluyendo altos niveles de ruido, pérdida de señal y desviaciones en las lecturas de las tasas de flujo. El transporte del mineral de hierro a través de las diversas rutas de tuberías dentro de una planta puede, debido a la naturaleza altamente abrasiva del mineral, desgastar por roce la pared de la tubería e incluso destruir los instrumentos instalados en la línea y particularmente los flujómetros, como es el caso de los flujómetros electromagnéticos o los flujómetros que trabajan con presión diferencial. Las fracciones gruesas existentes en la pulpa e incluso los desechos que pasan por los orificios de los clasificadores pueden impactar los instrumentos instalados en la línea y crear una rotura o una elevación inaceptable del ruido en las señales del flujómetro electromagnético.

Estos y otros problemas relacionados con las mediciones de la pulpa ahora han sido resueltos con la introducción de la última generación de tecnología para flujómetros – la tecnología de arreglo no invasivo. El elemento sensor se enrolla alrededor del exterior de la tubería y nunca entra en contacto directo con la pulpa, aumentando así enormemente su confiabilidad y eliminando cualquier necesidad de mantenimiento o reemplazo que pudiera deberse al desgaste o corrosión de los sensores. Es un instrumento pasivo, es decir, no induce ninguna energía dentro de la tubería, a diferencia de los flujómetros de ultrasonido que pierden poco a poco la confiabilidad en la medida que factores como la densidad de pulpa varían en el transcurso del tiempo. No es influenciado por las propiedades de la pulpa existente en la tubería, por lo tanto, los sólidos o la pulpa magnética no tienen efecto sobre la confiabilidad de la medición. Este documento describe los elementos básicos de la tecnología de este flujómetro junto con sus aplicaciones en el procesamiento de mineral.

## Introducción

La medición precisa y robusta del flujo volumétrico real es necesaria en muchas áreas críticas del procesamiento de minerales. Estas áreas incluyen balance másico, contabilidad metalúrgica y monitoreo y control del proceso. Dadas las muy adversas influencias que actúan sobre la instrumentación de medición que existe, obtener una medición verdadera del flujo ha resultado ser una tarea llena de desafíos para los metalurgistas e ingenieros de control de proceso e instrumentación que utilizan flujómetros con tecnologías tradicionales como es el caso de los electromagnéticos, los que operan con presión diferencial y los con tecnología de ultrasonido. Estas influencias adversas incluyen la acumulación de residuos en las paredes de la tubería, la presencia o ausencia de mineral magnético o ferrosilicona, el cambio en las propiedades del fluido de proceso, y las variaciones del nivel de

aire arrastrado. En la mayoría de los casos es actualmente posible 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. Esta tecnología no invasiva entrega una medición de flujo precisa en prácticamente todo tipo de fluido dentro de cualquier tipo de tuberías sin hacer contacto con el fluido y asegurando entonces una confiabilidad sin precedentes.

Además, generalmente se usan medidores de densidad para determinar el contenido de sólidos en un flujo de pulpa, pero el aire arrastrado en la pulpa les causa confusión. Una segunda medición que puede obtenerse de esta tecnología con arreglo de sensores es la medición de la cantidad de aire arrastrado en la forma de burbujas dentro de la pulpa o del flujo líquido. Esta medición de aire arrastrado se combina con los resultados de un medidor de densidad nuclear para entregar la densidad verdadera y desde ahí el contenido en masa. Existen muchas aplicaciones en las plantas de procesamiento de minerales a través de las cuales las estrategias de control de proceso pueden mejorarse y reducirse los costos al aplicar esta tecnología.

## **Principio de Operación**

El principio de medición se basa en el uso de un arreglo de sensores ultra sensibles acoplados con avanzados algoritmos de proceso (previamente utilizados en la medición SONAR) para detectar, rastrear y calcular la velocidad de cualquier interferencia que se mueva en la dirección axial de la tubería. Estas interferencias se agrupan en tres categorías mayores:

- Perturbaciones transportadas por el flujo, por ejemplo remolinos, variaciones de densidad u otras características de fluido que se muevan a la tasa del flujo dentro de la tubería, lo que para flujos a base de líquidos rara vez exceden los 9 m/s
- Ondas acústicas en el fluido, generadas por bombas, etc., que generalmente tendrán una velocidad mínima de 80 m/s y máxima de 1.500 m/s
- Vibraciones transmitidas a lo largo de las paredes de la tubería que se han detectado pueden viajar a velocidades varias veces superiores a las de las ondas acústicas.

Así, al utilizar las diferencias en estas interferencias y sus respectivas velocidades y seleccionando sólo aquellas áreas de interés, se hace una clara distinción entre cada categoría y su medición particular.

## ***Accesorios del Arreglo Pasivo***

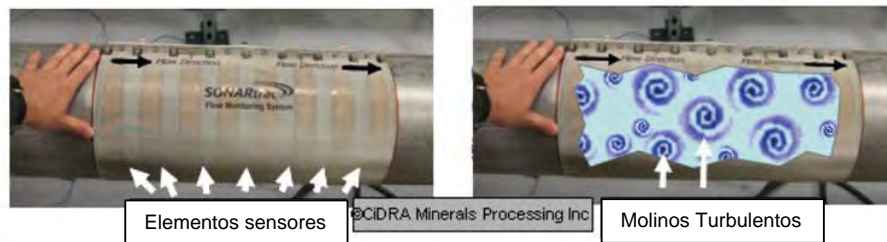
En la representación comercial de este principio de medición, se enrolla y aprieta una banda flexible de sensores pasivos alrededor de la tubería. Este es un ajuste en seco y no requiere gel ni otros acopladores porque no se utilizan ondas de ultrasonido. La Banda de sensores siempre tiene 50 cm de longitud en la dirección axial de la tubería y en la dimensión ortogonal es igual a la circunferencia de la tubería. En la Figura 1 se describe el procedimiento de instalación típica y los accesorios. Primero se limpia la tubería y se liman las irregularidades para eliminarlas. Segundo, la banda flexible del sensor se enrolla alrededor de la tubería y se aprieta contra la tubería con una serie de tornillos imperdibles. Cada tornillo usa un grupo de golillas que forman un resorte para permitir la expansión y contracción de la tubería y además asegurar una fuerza de apriete sin necesidad de usar llaves de torque. Tercero, sobre la Banda de sensores 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.

## ***Medición de velocidad de flujo turbulento***

En 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 tubería pero con una velocidad media igual a la del flujo, es decir, son transportados con el flujo. En el lado derecho de la Figura 2 se muestra una ilustración de estos remolinos turbulentos. Estos remolinos se crean en forma continua. 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 tuberías de flujo descendente, estos vórtices permanecen coherentes y retienen su estructura y tamaño antes de disgregarse en vórtices menores. Los vórtices en una tubería tienen un amplio rango de tamaños que están limitados por el diámetro de la tubería en los más grandes y por fuerzas viscosas en los vórtices más pequeños. En promedio, estos vórtices se distribuyen a través de la sección cruzada de la tubería 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.



**Figura 1.** Procedimiento de instalación (desde la parte superior izquierda hasta la parte inferior derecha: preparación de la tubería por medio de limpieza y limado liviano; instalación de la flexible banda de sensores de bajo peso; instalación de la cubierta del sensor; y conexión de la cubierta del sensor al transmisor a través de un cable impermeable

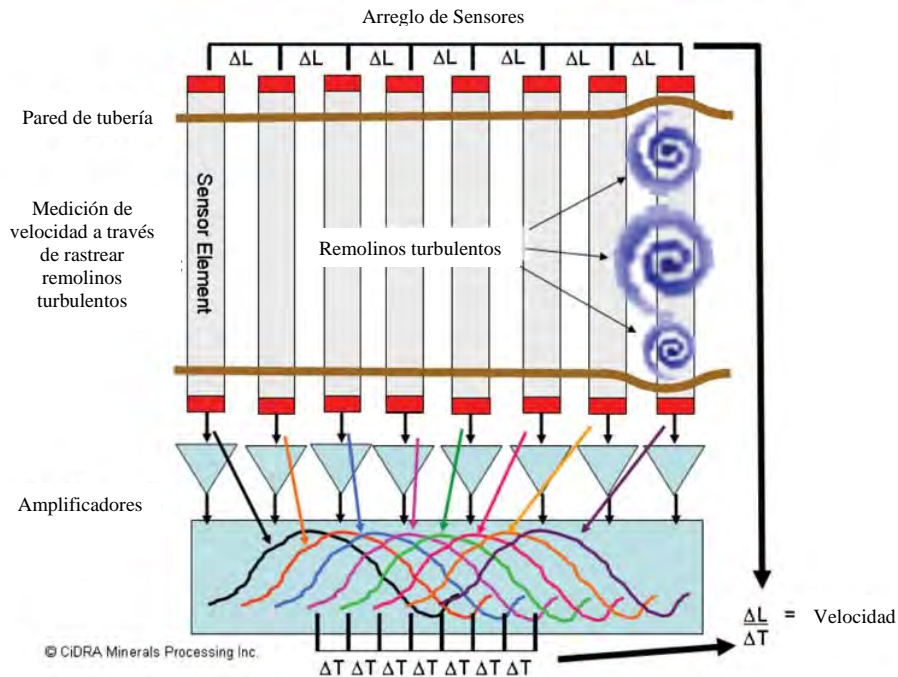


**Figura 2.** (Izquierda) Banda de sensores pasivo enrollada alrededor de la tubería y (derecha) vista interior de la tubería con ilustración de molinos turbulentos

A través de la combinación de un arreglo de sensores pasivos y con el arreglo sonar procesando los algoritmos, se obtiene el promedio de velocidades axiales de un grupo de vórtices o las variaciones de densidad. La secuencia de acontecimientos que ocurren para hacer esta medición 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 tubería
- Este pequeño cambio de presión produce una tensión dinámica en la pared misma de la tubería (Figura 3- representación exagerada)
- 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 tubería - no se requieren líquidos ni gel para acoplar el sensor a la tubería
- 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 tubería y dispuestos en dirección axial
- La señal eléctrica de cada elemento sensor es interpretada como una marca característica de los componentes de frecuencia y fase de las ondas acústicas bajo el sensor
- Un arreglo de algoritmos de procesamiento combina la información de fase y frecuencia de la marca característica obtenida del grupo de elementos del arreglo de sensores para calcular la velocidad de la marca característica anterior cuando se propaga bajo el arreglo de sensores a  $\pm 1\%$  de la lectura. En la mayoría de las aplicaciones se requiere una tasa de flujo mínima de 0,9 m/s (3 pies por segundo) para medir la velocidad de flujo.

Visto de manera práctica, las dificultades para realizar esta medición son muchas. Entre ellas está la dificultad de operar en un ambiente donde existen bombas de gran tamaño, donde los eventos acústicos generados por el flujo y las vibraciones pueden causar grandes presiones dinámicas sobre la pared de la tubería como indicamos anteriormente. La presión dinámica causada por los remolinos turbulentos pasivos o las variaciones de densidad generalmente es mucho menor que la presión dinámica proveniente de las vibraciones de una tubería y las ondas acústicas que se propagan en el fluido. La fortaleza de la habilidad del algoritmo de proceso es su capacidad de aislar y medir las velocidades de estos diferentes componentes, incluyendo las débiles señales de los fluidos transportados por los remolinos turbulentos o las variaciones de densidad y las fuertes señales provenientes de las ondas acústicas y vibraciones.



**Figura 3.** Ilustración de tensión inducida en las paredes de la tubería al pasar los remolinos turbulentos que resultan en señales similares detectadas por los elementos del sensor con diferencias de tiempo o fase que conducen a la medición de velocidad

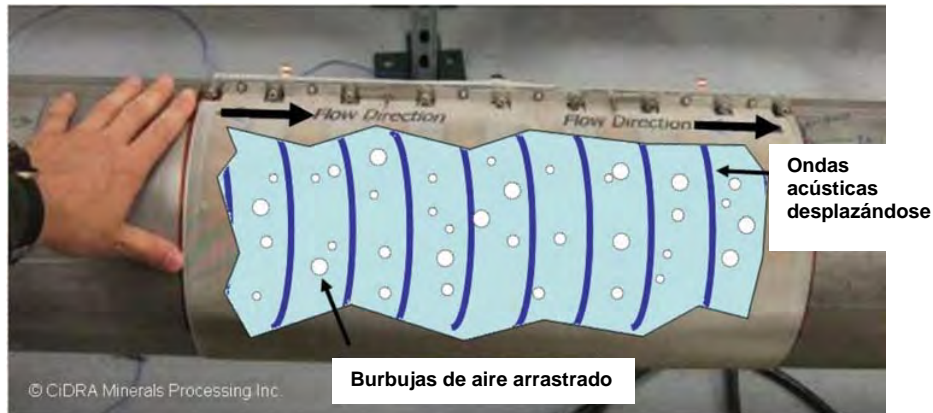
La velocidad de las ondas acústicas se usa para calcular la composición del fluido o la cantidad de aire arrastrado (fracción vacía de gas). Estas mediciones de velocidad han sido demostradas en muchos tipos de tuberías con una amplia variedad de revestimientos. Las tuberías pueden incluir acero, cloruro de polivinilo (PVC), polietileno de alta densidad (HDPE) y fibra de vidrio. Las tuberías pueden ser revestidas o no. En el caso de las tuberías con revestimiento, esto ha sido demostrado en revestimientos de goma, uretano, cemento, basalto y Teflón, así como también en aquellas con acumulación de residuos. Se requiere que la tubería esté llena y el diámetro interno de la tubería debe ser determinado para convertir la medición exacta de la velocidad (m/s) producida por esta tecnología en una tasa de flujo volumétrico exacta en m<sup>3</sup>/h.

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

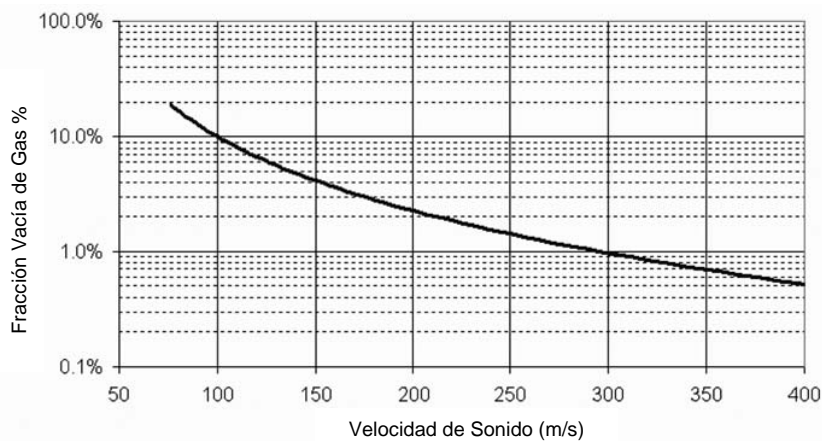
La misma tecnología basada en arreglo sonar utilizada para medir la velocidad de los remolinos turbulentos puede usarse para medir la velocidad de las ondas acústicas. En la mayoría de las operaciones de procesamiento, incluyendo las aplicaciones en pulpas, existe abundancia de ondas acústicas que se propagan dentro de las tuberías. Estas ondas acústicas son naturalmente generadas a partir de diferentes fuentes, incluyendo las bombas y el flujo mismo al viajar a través de los cambios geométricos de la tubería. Incluso las burbujas dentro del fluido generarán 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 tubería en longitudes de onda mucho mayores que las burbujas de aire arrastrado. En la Figura 4 se muestra una ilustración de estas ondas acústicas. Las ondas acústicas pueden propagarse en cualquier dirección, en forma descendente por la tubería o en ambas direcciones.

A través del mismo arreglo de sensores pasivos que se usa para medir la velocidad de flujo y los algoritmos sonares similares, se obtiene el promedio de velocidades axiales de un grupo de ondas acústicas. Dado que las ondas acústicas son ondas de presión que se desplazan, introducen cambios localizados de presión en el interior de las paredes de la tubería durante su ciclo desde la compresión a la rarefacción y de regreso. Estos cambios de presión tensionan las paredes de la tubería y son rastreados de manera similar a los remolinos turbulentos o variaciones de densidad. Este fluido puede ser de multifase, o bien, multicomponente de fase única. En un fluido multicomponente de fase única, la velocidad acústica es una función de la razón y las propiedades acústicas de los dos fluidos, así esta medición puede ser utilizada para determinar las relaciones de mezcla a través de la aplicación de la regla simple de mezcla (promedio de velocidad de volumen).

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 de gas) cuando hay gas en la forma de burbujas que están bien mezcladas dentro del líquido o pulpa. Dado que las longitudes de onda de las ondas acústicas son mucho mayores que el tamaño de la burbuja, como se observa en la Figura 4, se produce una relación compleja que transforma la velocidad acústica en una función de la fracción vacía de gas.



**Figura 4.** Ilustración de ondas producidas en forma natural en una tubería y que se propagan bajo el arreglo de sensores



**Figura 5.** Ejemplo de una relación entre fracción vacía de gas (burbujas de aire arrastrado) y velocidad del sonido

La velocidad del sonido en un fluido es proporcional a la raíz cuadrada de la razón de compresibilidad y densidad, y ambas están fuertemente influenciadas por el contenido de aire. En la Figura 5 se muestra un ejemplo de la relación resultante. Los valores señalados por la curva en esta figura están influenciados por otros factores, particularmente la presión. Así, debe medirse o calcularse la presión en el punto de ubicación del instrumento con arreglo de sensores para determinar la relación entre la velocidad del sonido y la fracción vacía de gas. 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.

La medición de la fracción vacía de gas se usa en una variedad de campos y aplicaciones diferentes. En el procesamiento de minerales se usa para la corrección de calibración del densímetro nuclear, para la corrección del medidor de flujo en la obtención del volumen real de flujo, diagnóstico de problemas de bombeo, detección de intermitencia y en aplicaciones de inyección de aire. Se ha usado en forma exitosa para aplicaciones con aire arrastrado en el rango de fracciones vacías de gas de 0,01% a 20%. Tiene una precisión de  $\pm 5\%$  de la lectura, así el error máximo absoluto es de  $\pm 1\%$ .

#### Uso operacional de flujómetros basados en tecnología de arreglo de sensores

Cada tecnología de flujómetro tiene un ámbito de aplicaciones en los que entrega un valor claro al cliente. En los flujómetros con arreglo de sensores pasivos las aplicaciones incluyen las de pulpa ferromagnética incorporando materiales tales como magnetita, pirrotita y ferrosilicona, 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 filtraciones pueden provocar un problema de seguridad. Algunas de éstas se discutirán en este documento.

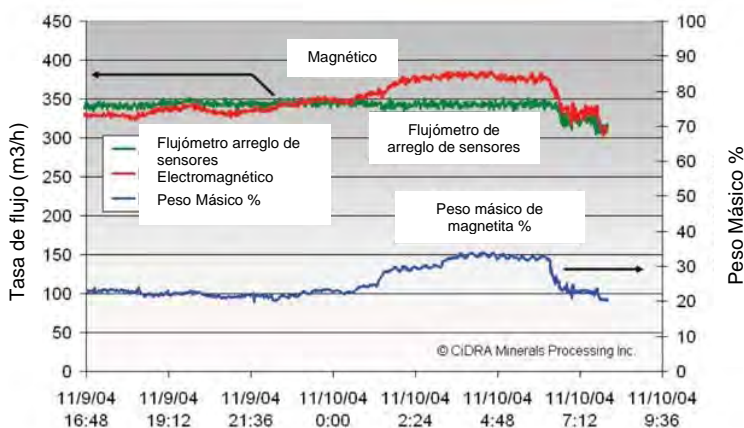
### ***Medición de flujo volumétrico en la presencia de mineral ferromagnético como la magnetita***

El mineral o medio magnético en una línea de pulpa, ya sea en forma intencional en el proceso de un mineral de hierro o una planta de separación por medios densos, o no intencional en plantas de concentrados de otros metales, presenta un problema potencial para las mediciones del flujómetro electromagnético. Muchas operaciones que extraen cobre, oro u otros metales no ferrosos tienen mineral magnético en sus yacimientos o sus cercanías. El mineral magnético, incluso en pequeñas cantidades, causa cambios en los flujómetros electromagnéticos, tanto al corto como al largo plazo. Los cambios al corto plazo resultan en perturbaciones al campo magnético causadas por el mineral magnético dentro del flujómetro electromagnético que provocan exageración de la información sobre flujo e introducen ruido en los resultados. Los cambios a largo plazo se derivan de la atracción del mineral ferromagnético a los elementos del flujómetro electromagnético, produciendo una reducción de la sección cruzada de la tubería y aumentando así la exageración de las tasas de flujo volumétrico informadas. 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 pruebas de laboratorio de la pulpa típica. Estos métodos han producido resultados mixtos. La calibración o compensación frecuentemente cambia, dependiendo de la cantidad de magnetita presente.

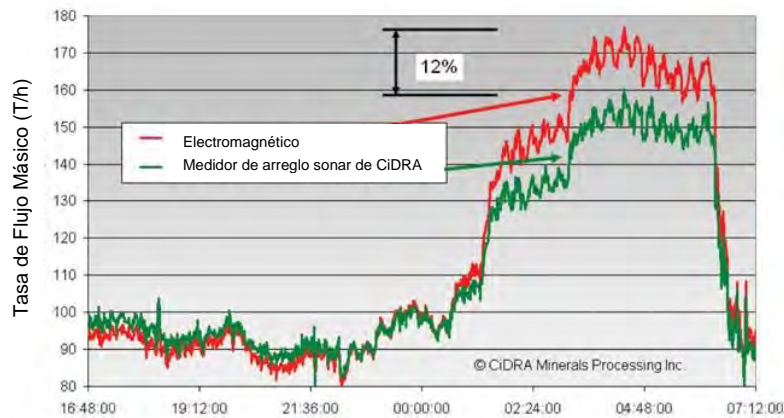
Una solución más robusta es usar una tecnología de medición de flujo que no sea afectada por la presencia de mineral magnético. Un flujómetro basado en un arreglo de sensores pasivos no depende del uso de campos magnéticos y es totalmente inmune a los efectos del mineral magnético. En la Figura 6 se ilustra un ejemplo en el que se compara un flujómetro de arreglo de sensores con un medidor electromagnético. En la figura se puede apreciar que durante un período de tasa constante de flujo en la medida que aumenta el mineral magnético en la pulpa, 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. La exageración en el informe de la tasa de flujo de masa es directamente proporcional a la exageración de la tasa de flujo informada por el flujómetro electromagnético, como se observa en la Figura 7.

### ***Mediciones precisas, sin desviaciones, para control de monitoreo a largo plazo y balance de masa exacto***

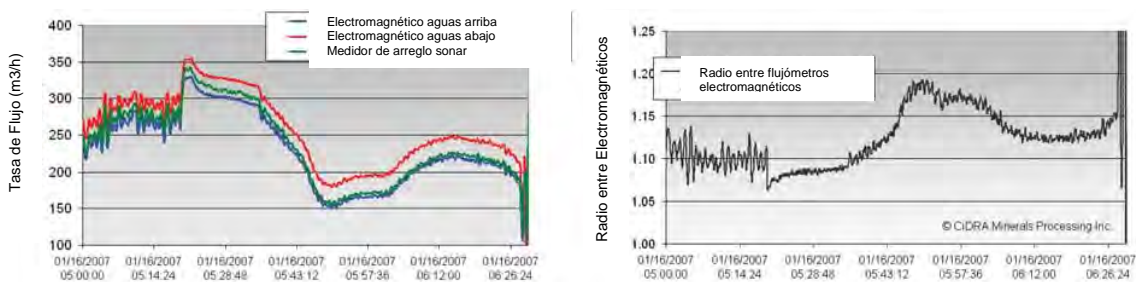
Existen muchos casos donde las mediciones suministradas por los flujómetros no pueden ser verificadas a través de una prueba de precisión con estándar de excelencia, como es una prueba de estanque lleno o calibración de bombeo de flujo. La mayoría de los flujómetros presentarán desviaciones por efecto del tiempo y la temperatura lo que resulta en un cambio en la señal que no se nota o no puede ser verificado. A modo de ejemplo, los flujómetros electromagnéticos dependen de la estabilidad de elementos electrónicos análogos que pueden alterarse con el tiempo y la temperatura, como también de la ausencia de partículas magnéticas en el mineral y/o de electrodos que estén limpios para poder informar el flujo en forma exacta. Cuando alguna de estas condiciones no se cumple, lo que ocurre frecuentemente, el operador ni siquiera se da cuenta de que se ha producido un error, a menos que el flujómetro electromagnético se compare con otro medidor o sea recalibrado a través de una prueba estándar de excelencia.



**Figura 6.** Los medidores magnéticos responden erróneamente a la magnetita mientras que el flujómetro de arreglo de sensores informa lecturas correctas del flujo



**Figura 7.** Impacto de pulpa ferromagnético en la tasa de flujo másico mostrando una exageración del valor informado por el flujómetro electromagnético versus el flujómetro de arreglo de sensores



**Figura 8.** Dos flujómetros electromagnéticos en serie con un flujómetro de arreglo de sensores muestran desviaciones que van desde el 2% al 18% entre los flujómetros electromagnéticos y la medición de precisión entregada por el flujómetro de arreglo de sensores

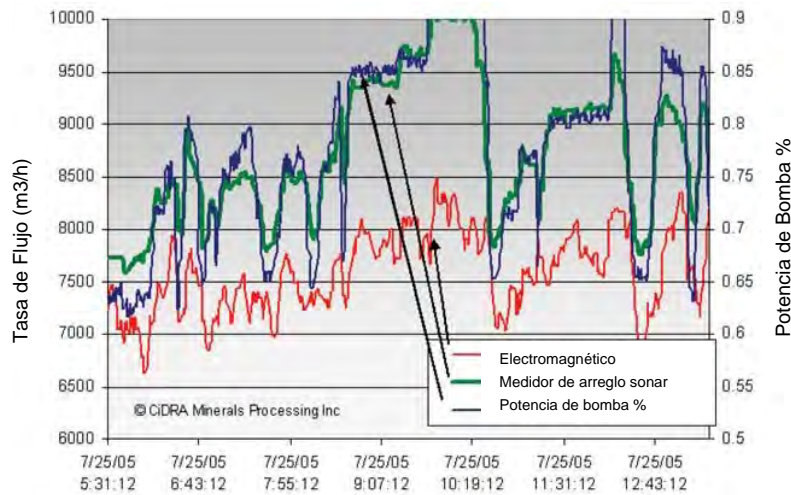
Como ejemplo, la Figura 8 muestra la información obtenida de dos flujómetros electromagnéticos instalados en serie muy cerca uno del otro en una planta de oro y cobre. Las dos líneas oscuras corresponden a los resultados del flujómetro electromagnético mientras que la línea más clara entre las dos líneas oscuras corresponde al resultado del flujómetro con arreglo de sensores. El flujómetro de arreglo de sensores se configuró usando los coeficientes universales de calibración correspondientes para este medidor. En este caso los dos flujómetros electromagnéticos difieren de 2% a 18% durante el período cubierto por este conjunto de datos. La información proporcionada por flujómetro con arreglo de sensores corresponde a una lectura que es aproximadamente un promedio de los dos medidores electromagnéticos pero con la confianza de que no será alterada con el tiempo. La mantención de la precisión relativa puede verificarse moviendo el flujómetro de arreglo de sensores a un punto donde se pueda realizar la prueba de estanque y sin necesidad de detener el proceso.

### ***Control y Monitoreo de Hidrociclones por medio de mediciones de flujo repetibles y lineales***

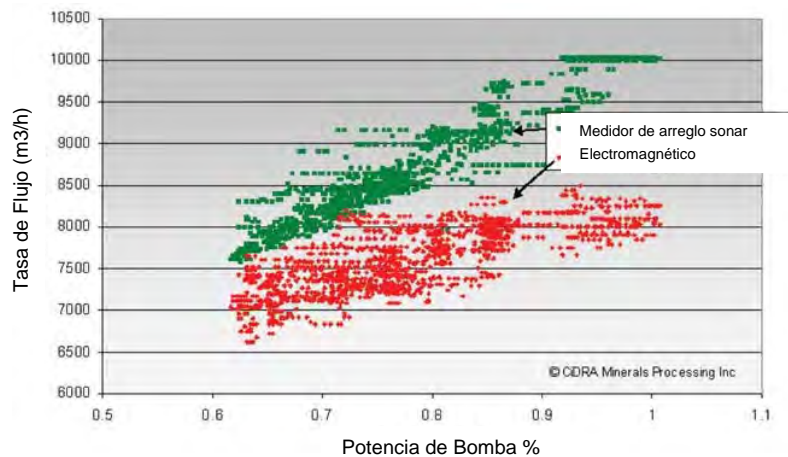
Una aplicación donde se probó inicialmente el flujómetro de arreglo de sensores debido a su confiabilidad y rentabilidad en ambientes de flujo con alta tasa de desgaste fue en la alimentación de la línea de hidrociclones. El resultado obtenido por este flujómetro se comparó con los de un flujómetro electromagnético nuevo revestido con cerámica y con la potencia de la bomba. Aunque la potencia de la bomba es una indicación no lineal de la tasa de flujo, muestra un fuerte componente lineal si las condiciones operacionales como la densidad de pulpa, viscosidad y nivel del colector se mantienen constantes. La Figura 9 compara las tecnologías de los dos flujómetros con respecto de la potencia de la bomba. La potencia de la bomba es la línea continua que es alcanzada estrechamente por el resultado del flujómetro de arreglo de sensores mostrado en línea gris continua. El resultado del flujómetro electromagnético representado por la línea punteada oscura difiere significativamente tanto de la potencia de bomba como del resultado del flujómetro de arreglo de sensores. Además, durante las condiciones de estado estacionario aproximadamente entre 9:07 y 11:31 donde, tanto la bomba de potencia como el flujómetro de arreglo sonar, están indicando un flujo relativamente estable, el resultado del flujómetro electromagnético fluctúa en un 6% de punta a punta.

Cuando la tasa de flujo indicada por las dos tecnologías se compara con la potencia de la bomba, se puede observar otra indicación de la repetibilidad de las dos tecnologías de flujómetro. Si ciertos parámetros de proceso se mantienen constantes, entonces para la misma potencia de bomba las tasas de flujo informadas deben tener una mínima dispersión alrededor de un promedio para cada nivel de potencia de bomba. En la Figura 10 el resultado del flujómetro electromagnético se indica con los puntos oscuros (o rojo, para impresiones a color) donde el resultado del flujómetro de arreglo de sensores está representado por puntos grises (o verdes). Una desviación estándar normalizada de las tasas de flujo de las respectivas tecnologías puede derivarse,

en la cual la desviación estándar de la tasa de flujo se divide por el promedio de la tasa de flujo en cada nivel de potencia de la bomba. Esto proporcionará una indicación cuantitativa de la cantidad de dispersión en los resultados de los flujómetros con una desviación estándar normalizada menor que indique menos dispersión y por lo tanto, mayor precisión (repetibilidad). Los cálculos resultantes revelan que el flujómetro electromagnético tiene una desviación estándar normalizada de 9,1% mientras el flujómetro de arreglo de sensores tiene una desviación estándar normalizada de 5,7%.



**Figura 9.** Comparación de flujómetro de arreglo de sensores y medidor electromagnético con la potencia de bomba en una línea de alimentación a hidrociclones



**Figure 10.** Tasa de flujo informada por el flujómetro de arreglo de sensores y el flujómetro electromagnético con respecto de la potencia de la bomba (como porcentaje de potencia máxima)

### ***Corrección del flujo volumétrico debido a burbujas de aire arrastrado***

Para lograr un sistema de procesamiento estándar con mayores niveles de eficiencia, es necesario contar con una medición precisa y repetible de flujo del líquido o fases líquido/sólido. Las pulpas tienden a arrastrar burbujas de aire. Las tecnologías de flujómetros más tradicionales no pueden realizar una medición de flujo precisa en presencia de burbujas de aire. Además, la generación más antigua de tecnologías de flujómetro no tiene la capacidad de compensar el contenido de aire. La tecnología basada en arreglo de sensores produce una medición de flujo robusta en presencia de aire arrastrado y determina cuantitativamente la cantidad de aire arrastrado.

Las burbujas de aire arrastrado pueden provenir de un gran número de fuentes incluyendo bajos niveles en el colector, procesos de trituración, filtraciones de la bomba, intermitencias y otras. La capacidad de medir los niveles de aire arrastrado resulta en una serie de beneficios mayores, incluyendo la identificación de problemas de proceso y de equipos, advertencia temprana de potenciales problemas de seguridad y la capacidad para determinar el flujo volumétrico real del fluido/fase sólida del proceso.

Algunos de estos beneficios pueden observarse en el ejemplo de la Figura 11. En esta figura el trazo rojo es el flujo volumétrico de las tres fases que consisten en sólido, líquido y burbujas de gas medidas en una línea de concentrado de un concentrador de cobre/oro/molibdeno. El trazo azul en la parte inferior del gráfico corresponde a la fracción vacía de gas o el porcentaje de volumen ocupado por burbujas de gas, según la medición del instrumento de arreglo de sensores. En este caso, el aire ha sido arrastrado al final de la pulpa de concentrado lo que puede inducir a un error en el cálculo del balance metalúrgico. El trazo verde entre los otros dos trazos corresponde a la tasa de flujo volumétrico real de la pulpa calculada a partir del flujo volumétrico total (trazo rojo) y la fracción vacía de gas por medio de una corrección lineal simple (Ecuación 1).

$$\text{Flujo volumétrico ajustado} = \text{flujo volumétrico} * (1 - \% \text{ fracción vacía de gas}) \quad [1]$$

### Corrección de los errores de los densímetros nucleares por presencia de burbujas de aire

La presencia de burbujas de aire o contenido de vacío de gas reducirá directamente la gravedad específica informada por el medidor de densidad nuclear. Para poder obtener la medición correcta de densidad de la pulpa misma, la fracción vacía de gas debe ser medida y utilizada como un factor de corrección. Para validar este enfoque se realizó una prueba en la que diversos niveles de aire fueron introducidos en un circuito de flujo de agua provisto de un medidor de densidad nuclear. Como se esperaba, cuando la tasa de inyección de aire, mostrada como pies cúbico estándar por hora (SCFH) en la Figura 12, se aumentó el resultado del medidor de densidad nuclear (mostrado por la línea roja con diamantes) descendió. El flujómetro basado en arreglo sonar en la misma línea midió con precisión contenido de aire resultante, como se observa en la línea anaranjada con triángulos. Utilizando esta medición, se aplicó una corrección lineal simple al densímetro nuclear y se obtuvo la consiguiente reducción del error de  $5\% \pm 0,25\%$ .

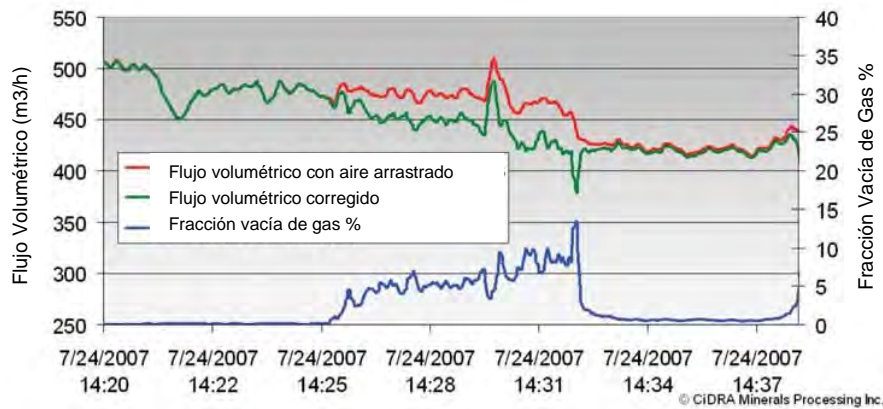


Figura 11. Detección de burbujas de aire arrastrado y compensación de medición del flujo

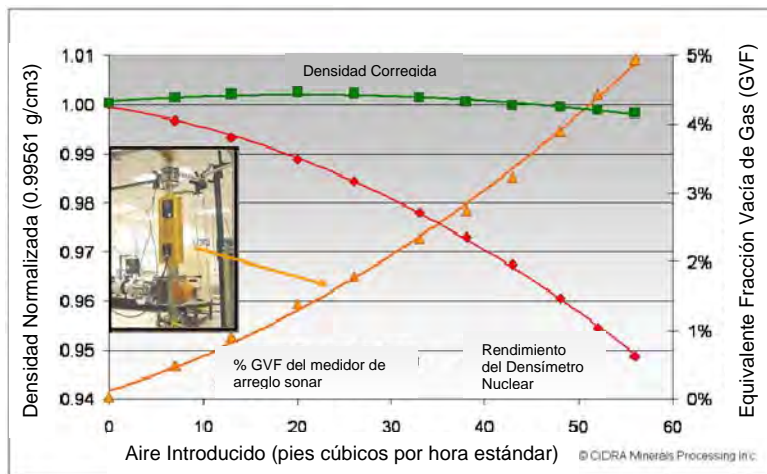
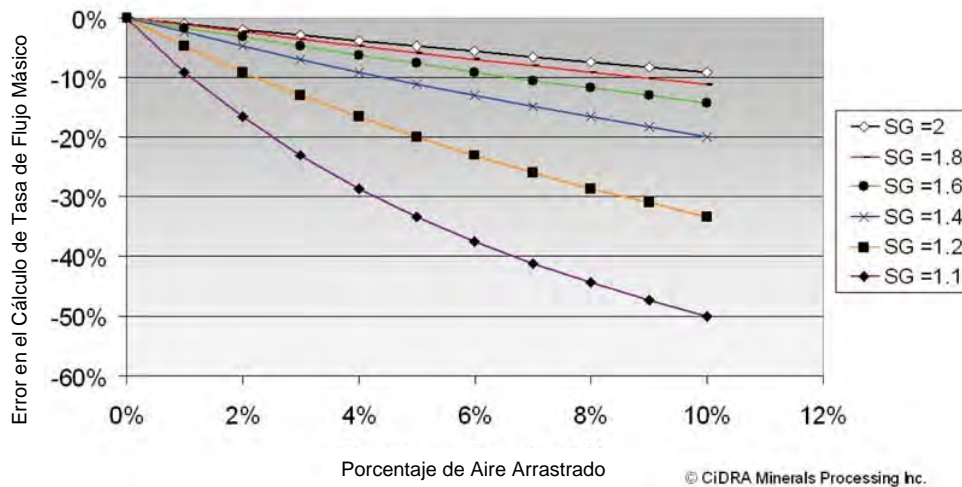


Figura 12. Corrección al densímetro nuclear utilizando un flujómetro basado en arreglo de sensores



**Figura 13.** Error introducido por aire arrastrado en los cálculos de tasa de flujo másico como función de la gravedad específica de la pulpa (SVG)

En ausencia de esta información sobre la cantidad de aire arrastrado dentro de la pulpa puede surgir un error en el cálculo de la tasa de flujo másico. La magnitud del error depende de dos variables: la cantidad de aire arrastrado y la gravedad específica de la pulpa. La gravedad específica relativa es la gravedad específica de la pulpa dividida por la gravedad específica del componente líquido. Generalmente éste es agua; por lo tanto, en esos casos la gravedad específica relativa es la misma que la gravedad específica de la pulpa. Si el fluido transportador es una solución de salmuera, entonces la gravedad específica relativa será menor que la gravedad específica de la pulpa. En la medida que la gravedad específica relativa se aproxime a la unidad, el error de cálculo del flujo másico resultante aumentará en la presencia de aire arrastrado. Como ejemplo, la Figura 13 muestra los errores en los cálculos de tasa de flujo másico como una función de la gravedad específica y porcentaje de aire arrastrado o fracción de gas por volumen.

## Resumen

El principio de medición del arreglo de sensores ha demostrado tener la capacidad de realizar mediciones precisas de flujo volumétrico y fracción vacía de gas en una variedad de aplicaciones de procesamiento de minerales que va desde líquidos limpios, como el agua y soluciones de lixiviado, a pulpas espesas e incluso pastas. Esto lo realiza con diversas ventajas distintivas, particularmente en situaciones de balance másico en presencia de burbujas de aire arrastrado bajo la influencia de acumulación de residuos, en ambientes corrosivos o con alta tasa de desgaste, y en presencia de pulpas ferromagnéticas. Su precisión en el campo está especificada como  $\pm 1\%$ , pero requiere una velocidad de flujo mínima de 0,9 m/s para lograr esta medición de flujo tan exacta. Esta técnica de medición implica que la velocidad de flujo no se alterará con el tiempo o la temperatura permitiendo el control de procesos a largo plazo sin requerir ajustar el flujómetro. La medición de aire arrastrado (fracción vacía de gas) se ha usado para corregir tanto las mediciones de flujo volumétrico como las mediciones de densidad de pulpas que contienen burbujas de aire arrastrado, consiguiendo cálculos precisos de tasas de flujo másico. Esta tecnología actualmente está siendo usada en más de 1.000 aplicaciones de monitoreo de flujo alrededor del mundo en 25 países.

## Referencias

VAN DER SPEK, A.M., MARON, R.J., O'KEEFE, C.V., y ROTHMAN, P. J. Use of sonar flow measurement for performance and condition monitoring of slurry pumps (“Uso de la medición sonar de flujo para monitoreo de funcionamiento y estado de las bombas de pulpa”) VI Encuentro Internacional de Mantenedores de Minas, MAPLA 2009, Antofagasta, Chile 2009.



**João Felix**

CiDRA Mineral Processing, *Ingeniero de Ventas y Aplicaciones – África*

Joe ha trabajado en el ámbito de la investigación y desarrollo en minería en el laboratorio De Beers Diamond desarrollando e implementado instrumentación para la selección y recuperación de diamantes. Durante los 18 años en que estuvo en De Beers, también desarrolló y comercializó un densímetro no nuclear aplicable en las plantas de separación por medios densos. Durante los últimos dos años como representante de Ventas e Ingeniería de CiDRA en África, ha aplicado con éxito los sistemas de medición de flujo *SONARtrac*© en operaciones de mineral de platino, oro y hierro, por nombrar algunas.