

**Aplicación de Equipo de Medición Basado en Arreglo Sonar
Único en Monitoreo de Proceso para Aplicaciones en el
Procesamiento de Minerales**

Autor

Paul Rothman

Presidente

CiDRA Minerals Processing

Wallingford, CT 06492

203-626-3436

prothman@cidra.com

Co-autor

Dr. Christian O'Keefe

Director, Desarrollo de Negocio Regional e Ingeniero de Aplicaciones

CiDRA Minerals Processing

Wallingford, CT 06492

203-626-3393

cokeefe@cidra.com

Co-autor

Aaron Thomas

Gerente de Industria – Procesamiento Minero y Minerales, Asia Pacífico

Krohne Mining & Metals Processing

South Bank, VIC 2465 Australia

+61 (0) 3 9696 2622

aaron@krohne.com.au

INTRODUCCIÓN

Las plantas de procesamiento de minerales enfrentan muchos desafíos en sus intentos de conseguir la producción requerida y cumplir con las exigencias de eficiencia impuestas, mientras, a la vez, mantienen los costos operacionales dentro del presupuesto. Importancia particular tienen las estrategias de control de proceso que derivan de la medición precisa y repetible del flujo volumétrico y la medición de la densidad en pulpas de fases múltiples. Estas pulpas consisten en líquido, sólidos y aire donde el porcentaje de sólidos y el aire arrastrado están cambiando continuamente. Las tecnologías tradicionales de medición de flujo como es el caso de las de ultrasonido, electromagnéticas, orificio de placa, vértice, Venture y Coriolis, padecen de una serie de deficiencias y su mantención puede resultar muy costosa. Los medidores de densidad comúnmente son utilizados para ayudar a determinar el contenido de sólidos en un flujo de pulpa, pero estos instrumentos son perturbados por el aire arrastrado en la pulpa. Esto dificulta el cálculo del flujo de masa de sólidos en un flujo. Una nueva clase de tecnología de medidor de flujo utiliza un arreglo de sensor pasivo y algoritmos de procesamiento sonar para medir, no sólo el flujo volumétrico, sino también la fracción de fase del aire arrastrado, y además lo hace en forma precisa y confiable sin hacer contacto con la pulpa. Existen muchas aplicaciones dentro de una planta de procesamiento de minerales donde se puede mejorar las estrategias de control de proceso y reducir el costo de mantención utilizando esta tecnología.

PRINCIPIO DE OPERACIÓN

Introducción

Los flujómetros de arreglo sonar operan utilizando un arreglo de sensores y algoritmos de procesamiento sonar pasivo para detectar, rastrear y medir las velocidades medias de las alteraciones coherentes que viajan en la dirección axial de una tubería. Estas alteraciones se agrupan en tres categorías principales: Alteraciones transportadas por el flujo, por las ondas acústicas en el flujo y las vibraciones transmitidas a través de las paredes de la tubería. Cada clase de alteración viaja a una velocidad dada. Por ejemplo, el flujo transportará remolinos, variaciones de densidad u otras características del fluido a la tasa del flujo. Los flujos con base líquida raramente exceden los 9 m/s. Las ondas acústicas en el líquido generalmente tienen una velocidad mínima de 80 m/s y una velocidad máxima de 1500 m/s. El tercer grupo, las vibraciones de tuberías, viaja a velocidades que son varias veces superiores a las ondas acústicas. Así, cada clase de alteración puede ser claramente identificada y medida con precisión.

Medición de velocidad de flujo

La velocidad del flujo puede ser determinada enfocándose en las alteraciones que viajan por el flujo. Estas alteraciones pueden ser variaciones de densidad, variaciones de temperatura, remolinos turbulentos u otros. Dentro de la mayoría de los procesos industriales, la alteración más común es la turbulencia. El flujo turbulento está compuesto por remolinos, también conocidos como vórtices o remolinos turbulentos que serpentean y giran de manera aleatoria dentro de la tubería. La velocidad media general de las

alteraciones es igual a la velocidad de flujo. En la Figura 1 se muestra una ilustración de los remolinos turbulentos. Estos remolinos se crean continuamente. Una vez creados, se descomponen en vórtices cada vez más pequeños hasta que se reducen lo suficiente como para ser disipados como calor a través de los efectos viscosos del fluido. Durante los diversos diámetros de la tubería en flujo descendente, estos vórtices permanecen coherentes y retienen su estructura y tamaño antes de dividirse en vórtices más pequeños. Los vórtices en una tubería tienen una amplia gama de tamaños que son contenidos por el diámetro de la tubería en el caso de los vórtices mayores, y por las fuerzas viscosas, en el de los vórtices más pequeños. Estos vórtices se distribuyen a través de la sección cruzada de la tubería y, por lo tanto, a través del perfil del flujo. Así, la velocidad promedio del flujo puede determinarse rastreando las velocidades axiales promedio de la colección completa de vórtices.

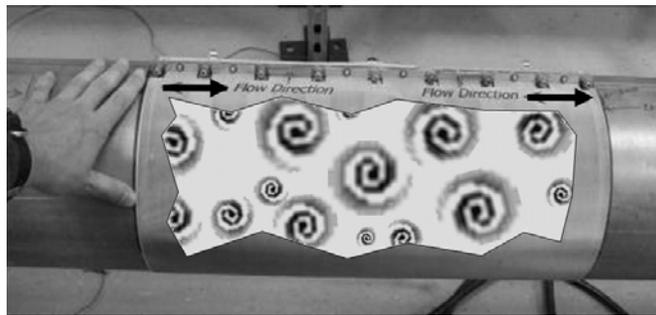


Figura 1: Corte de una tubería bajo la banda del sensor de arreglo sonar que ilustra los remolinos turbulentos

A través de la combinación de un arreglo de sensores pasivos y los algoritmos de procesamiento de arreglo sonar, se obtienen las velocidades axiales promedio del grupo de vórtices o las variaciones de densidad. La siguiente es la secuencia de eventos que ocurre para hacer esta medición posible:

- El paso de los remolinos turbulentos o las variaciones de densidad crean un leve cambio de presión en el interior de la pared de la tubería.
- Esta leve variación de presión resulta en una tensión dinámica de la pared misma de la tubería. Figura 2 (lado derecho aumentado).
- La señal de tensión dinámica se convierte en una señal eléctrica a través de un sensor pasivo enrollado, parcial o completamente, alrededor de la tubería - no se requiere gel o líquidos.
- Esta señal eléctrica es detectada por cada elemento en el arreglo de sensores. Estos sensores están espaciados unos de otros a una distancia precisamente dispuesta a lo largo de la dirección axial de la tubería.
- La señal eléctrica resultante de cada elemento del sensor se interpreta como una marca característica de la frecuencia y los componentes de la fase de la alteración bajo el sensor.
- Un arreglo de algoritmo de procesamiento combina la información de fase y frecuencia de la marca característica del grupo de elementos del sensor para

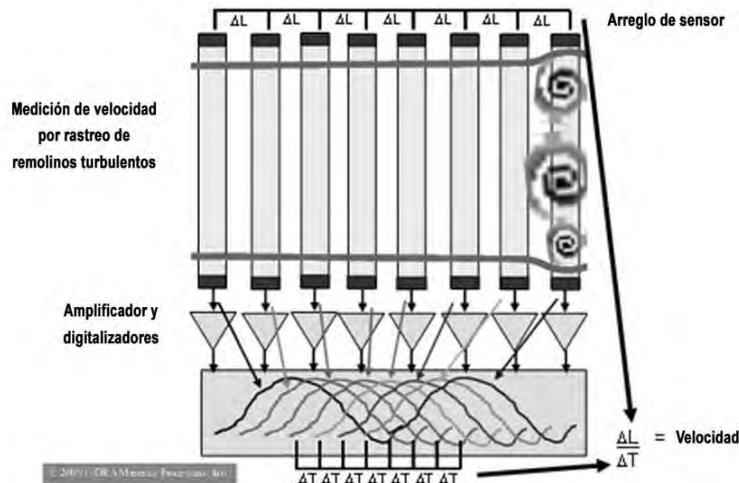


Figure 2: Ilustración de la tensión inducida en las paredes de la tubería por los remolinos turbulentos que pasan, lo que resulta en señales similares detectadas por los elementos del sensor con diferencias de tiempo o fase conducentes a la medición de la velocidad

Existen muchos desafíos al realizar esta medición en un ambiente industrial. Lo más difícil de esto es distinguir las interferencias vorticales de relativamente bajo nivel de las de niveles de ruido relativamente altos. Este ruido incluye acústicos y vibraciones generados por las bombas de gran tamaño y las válvulas. La fortaleza del algoritmo de procesamiento 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 tuberías con una amplia variedad de revestimientos. Los materiales de las tuberías incluyen acero, PVC, HDPE y fibra de vidrio. Las tuberías pueden ser revestidas o sin revestimiento. En el caso de las revestidas, han sido probadas con revestimiento de goma, uretano, cemento y teflón, así como en tuberías con acumulación de descamaciones.

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

La tecnología basada en arreglo sonar también puede ser usada para rastrear las ondas acústicas que viajan en el fluido. En la mayoría de las plantas de procesamiento de minerales existe gran cantidad de ondas acústicas propagándose dentro de las tuberías de proceso. Estas ondas acústicas son generadas en forma natural por una diversidad de fuentes. Estas fuentes incluyen las bombas, el cambio del flujo atravesando la geometría de la tubería y las burbujas dentro del fluido que generan ondas acústicas en sus

oscilaciones naturales. Estas ondas acústicas son de baja frecuencia (en el rango audible) y viajan en dirección axial a la tubería con longitudes de onda mucho mayores que las burbujas de gas arrastrado. En la Figura 3 se muestra una ilustración de estas ondas acústicas y, como se puede ver en ella, se pueden propagar en cualquier dirección por la tubería o en ambas direcciones.

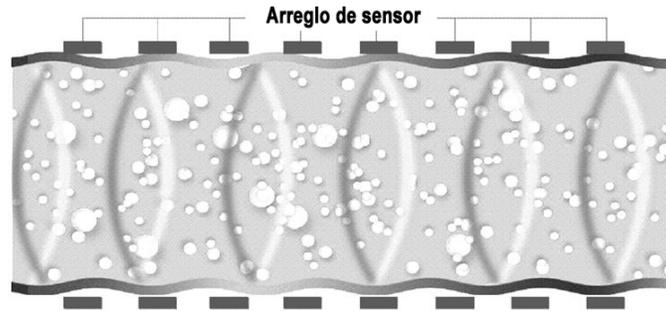


Figura 3: Ilustración de ondas acústicas de ocurrencia natural propagándose en la tubería bajo el arreglo de sensores

A través del mismo arreglo de sensores pasivos utilizados para medir la velocidad de flujo y los algoritmos similares de procesamiento, se obtienen las velocidades axiales promedio de un grupo de ondas acústicas. Dado que las ondas acústicas son ondas de presión en tránsito, introducen cambios de presión localizados en el interior de las paredes de la tubería durante el curso del ciclo partiendo por la compresión a la rarefacción y de retorno. Estos cambios de presión tensionan la pared de la tubería y son rastreados de manera similar a los remolinos turbulentos o las variaciones de densidad. El fluido de proceso puede ser de fases múltiples o de multicomponentes con fase única. En un fluido multicomponente de fase única, la velocidad acústica es una función de la proporción y las propiedades acústicas de los dos fluidos, así esta medición puede usarse para determinar las proporciones de mezcla a través de la aplicación de una regla simple de mezcla (promedio de volumen de velocidad).

En los fluidos de fase múltiple que consisten en gas mezclado con un líquido o pulpa, la velocidad acústica puede ser usada para determinar la cantidad de gas arrastrado (fracción libre de gas) cuando el gas está en la forma de burbujas mezcladas dentro del líquido o pulpa. Dado que las longitudes de las ondas acústicas son mucho mayores que el tamaño de la burbuja, se produce una compleja interacción que determina que la velocidad acústica sea una función poderosa de la fracción libre de gas. La velocidad del sonido es proporcional a la raíz cuadrada de la razón de la compresibilidad y la densidad, estando ambas fuertemente influidas por el contenido de aire. En la Figura 4 se muestra un ejemplo de la relación resultante. Los valores particulares descritos por la curva de esta figura son afectados por otros factores, particularmente la presión. Así entonces debe medirse la presión en el punto del instrumento. Cuando se determina la presión, el instrumento se usa para medir la velocidad del sonido de manera precisa y la relación entre la velocidad del sonido y el contenido de aire arrastrado se usa para cuantificar con precisión la cantidad de aire arrastrado.

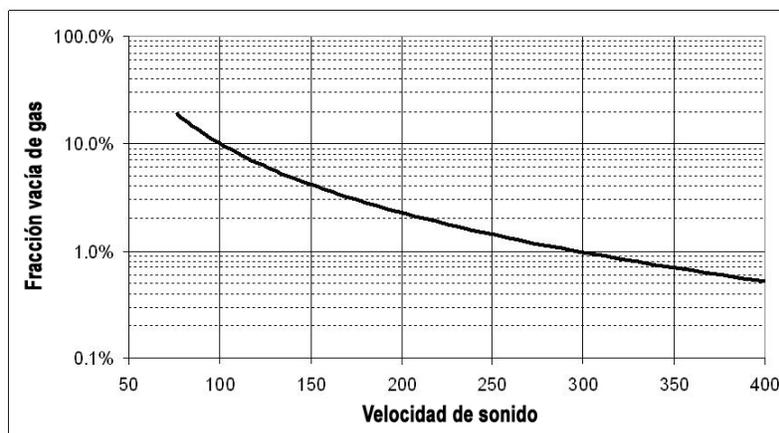


Figura 4: Ejemplo de relación entre fracción vacía de gas (burbujas de aire arrastrado) y velocidad de sonido

La medición de fracción vacía de gas se usa en diversas industrias y aplicaciones. Dentro del procesamiento de minerales se usa para la corrección del indicador de densidad nuclear, corrección del medidor de flujómetro para que pueda entregar flujo de volumen real, diagnóstico de problemas de bombeo, detección de intermitencias y aplicaciones de inyección de aire. Está siendo exitosamente utilizado en aplicaciones con aire arrastrado con un rango de fracción libre de gas entre 0,01% a 20% y con una precisión de lectura del 5%. Un área de interés particular es la medición de retención de gas en tiempo real dentro de la zona de recolección en una celda de flotación. Actualmente se están realizando las pruebas en terreno en esta área.

Arquetipo físico de la instrumentación de monitoreo de flujo basada en arreglo sonar

En un arquetipo comercial de este principio de medición, una banda flexible de sensores pasivo es enrollada alrededor y apretada sobre la tubería. Es un ajuste en seco que no requiere ni elementos de acople pues no se utilizan ondas de ultrasonido. La banda del sensor siempre mide 50 cm de longitud en la dirección axial de la tubería y en la dimensión ortogonal tiene la misma medida de la circunferencia de la tubería. El procedimiento de instalación y los componentes típicos se describen en la Figura 5. En primer lugar la tubería se limpia y se lija o pule las irregularidades. Luego, en segundo lugar, la banda flexible del sensor se enrolla alrededor de la tubería junto con una serie de tornillos prisioneros que aprietan la banda sobre la tubería. Cada tornillo utiliza un grupo de golillas de resorte para permitir la expansión y contracción de la tubería y asegurar la sujeción del conjunto. En tercer lugar, una cubierta de protección con acondicionamiento para señal y electrónica de diagnóstico se instala sobre la banda del sensor y se conecta la banda del sensor a los elementos electrónicos en la cubierta. Cuarto, se instala el cable que va desde la cabeza del sensor al transmisor y se conecta con el transmisor. En quinto lugar, el amigable menú del panel frontal del transmisor se usa para configurar el transmisor.



Figura 5: Procedimiento de instalación desde la preparación de la tubería y la limpieza y el lijado suave de la tubería (foto superior izq.) hasta el montaje de la banda de sensores liviana y flexible (foto centro superior y superior der.) hasta la disposición de la cubierta del sensor (foto inferior izq.) y a la conexión de la cubierta del sensor al transmisor vía cable hermético (foto centro inferior y inferior der.).

Calibración y estabilidad a largo plazo

La técnica de medición de flujo no depende del valor absoluto de ninguna señal análoga. Todas las mediciones de tensión se toman en forma dinámica. Por lo tanto, la calibración del medidor no sufrirá distorsión con el tiempo o la temperatura. Las únicas dos mediciones absolutas son el espaciamiento del sensor y el reloj del transmisor. El espaciamiento entre los sensores es establecido en fábrica donde son adheridos a una lámina de acero inoxidable y no pueden ser ajustados por el cliente. En la Figura 5 se muestran fotos de la liviana banda del sensor.

La estabilidad del contador es superior al 0,01% y, por lo tanto, 50 veces mejor que lo que se necesita para mantener la precisión típica del sensor de +/-1% en terreno y +/-0,5% bajo condiciones de referencia o después de una calibración suplementaria en terreno. Como resultado de esto, el impacto en la estabilidad del contador puede ser desestimado.

La mayoría de los flujómetros presentará inherentemente mecanismos distorsionados por efecto de la temperatura, el tiempo (envejecimiento), o el proceso. En muchos casos, estos cambios en el flujo no se notarán o no podrán ser verificados por medio de una prueba certificada Gold Standard como la prueba de llenado de estanque o calibración de descenso de nivel. La precisión de un flujómetro electromagnético depende de varios factores. Esos factores son la estabilidad de los elementos electrónicos análogos (propensos a distorsión en el tiempo y con la temperatura), la ausencia de partículas magnéticas en el mineral, y/o electrodos limpios y sin defectos. Cualquiera de estos factores puede impactar el funcionamiento del flujómetro electromagnético. Frecuentemente el operador no se da cuenta de que se ha producido un error a menos que el flujómetro electromagnético sea comparado con otro flujómetro u otras mediciones de proceso, o sea recalibrado a través de alguna prueba de calificada Gold Standard.

Como ejemplo, en la Figura 6 se muestra información obtenida de flujómetros electromagnéticos de 8 pulgadas instalados en serie, muy próximos entre sí, en un

concentrador de oro y cobre en los Estados Unidos. En esa figura las dos líneas blancas corresponden a los resultados del flujómetro electromagnético, mientras que la línea gris entre las dos negras, es para el flujómetro de arreglo sonar. El flujómetro de arreglo sonar se configuró utilizando los coeficientes universales de calibración que se usan para este tamaño de medidor. En este ejemplo, los dos flujómetros electromagnéticos difieren en un promedio de más de 12%. La información obtenida del flujómetro de arreglo sonar se observa que entrega una lectura de flujo que es aproximadamente un promedio de los dos flujómetros electromagnéticos, pero con la seguridad de que no se distorsionará en el tiempo. Se puede realizar una verificación del funcionamiento del flujómetro de arreglo sonar sin detener el proceso al mover el flujómetro a un punto donde se pueda realizar una prueba de estanqueidad.

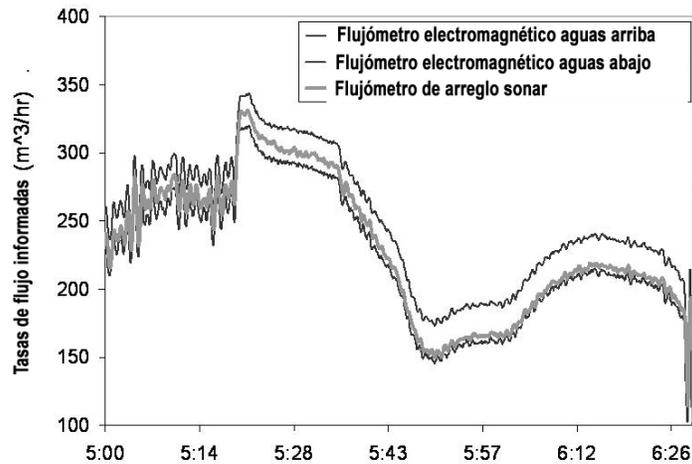


Figura 6: Dos flujómetros electromagnéticos en serie con flujómetro de arreglo sonar mostrando una desviación de más de 12% entre los dos flujómetros electromagnéticos y la distorsión de los flujómetros electromagnéticos con respecto del flujómetro de arreglo sonar que no muestra descompensación.

Otra característica del diseño del flujómetro de arreglo sonar es que no hay necesidad para una calibración basada en el número de serie o de medidor a medidor. La Figura 7 demuestra los resultados de aplicar los mismos coeficientes de calibración a seis flujómetros probados en una instalación de calibración trazable en el NIST. La variación de medidor a medidor está dentro del 0,5% y no cambiará en el tiempo.

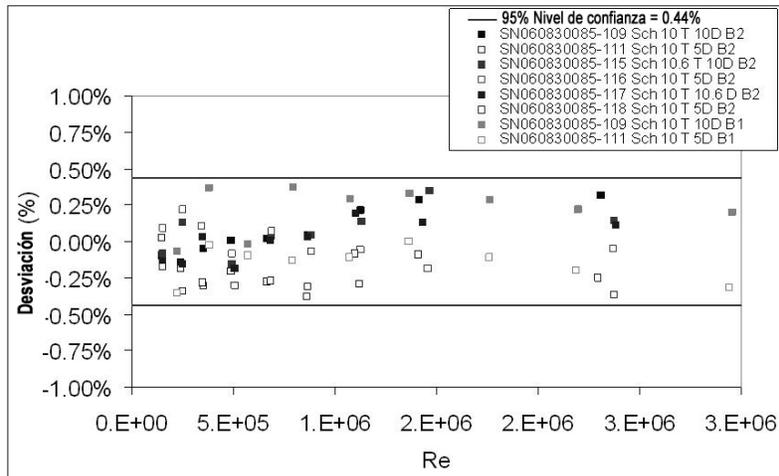


Figura 7: Ilustración de consistencia de calibración de medidor a Medidor. Todos los medidores tienen los mismos coeficientes de calibración.

APLICACIÓN DE TECNOLOGÍA BASADA EN ARREGLO SONAR

En la industria de procesamiento de minerales existen muchas aplicaciones de medición de flujos de fase múltiple en molienda, clasificación, flotación, manejo de relaves, hidrotransporte, espesamiento, lixiviación y refinación. Estas aplicaciones incluyen las líneas de alimentación de hidrociclones, líneas de rebalse de hidrociclones, líneas de alimentación de agua al molino, líneas de descarga de molino, líneas de alimentación de flotación, líneas de concentrado, líneas de flujo hundido del espesador, líneas de concentrado final, líneas de relaves, líneas de orgánicos, líneas de solución de lixiviación impregnada, líneas de refinado, líneas de ácido, líneas de agua de depurador, líneas de lodo rojo, líneas de pulpa de bauxita y líneas de licor verde de bauxita.

En muchos casos el éxito de una estrategia de optimización y control depende de la calidad de los parámetros de retroalimentación. Las tecnologías tradicionales de medición de flujo han sido utilizadas para proporcionar esta retroalimentación. La aplicación de estas tecnologías ha enfrentado a la industria con problemas que han perdurado en el tiempo. Estos problemas incluyen el alto costo del ciclo de vida útil del punto de medición, detención del proceso, distorsión de la calibración, repetibilidad, sensibilidad a la acumulación de residuos en la tubería, sensibilidad al aire arrastrado, sensibilidad al porcentaje de sólidos y sensibilidad al mineral magnético.

Durante los cinco años pasados, la tecnología basada en arreglo sonar ha sido exitosamente aplicada en todos los procesos mencionados anteriormente en más de 140 concentradores en 21 países. En esta sección se describen algunos casos de estudio seleccionados que demuestran los beneficios de la tecnología.

Medición confiable y repetible de la medición del flujo volumétrico en una aplicación de alimentación de hidrociclón

El control del hidrociclón y su consiguiente rendimiento en la clasificación para una mayor producción y eficiencia dependen de una medición precisa del flujo. Se realizó una comparación del flujómetro de arreglo sonar con un flujómetro electromagnético con revestimiento cerámico en una línea de alimentación de hidrociclón de 900 mm en un concentrador de cobre en Chile. Este ambiente presenta algunos problemas particulares para los flujómetros pues generalmente se trata de un ambiente con alto desgaste de tuberías, de ahí se desprende el interés en el flujómetro no intrusivo de arreglo sonar. En esta prueba se realizó una evaluación de funcionamiento de los dos flujómetros comparando sus resultados con la potencia de la bomba. Aunque la potencia de bomba es una indicación no lineal de la tasa de flujo, muestra un fuerte componente lineal si las condiciones operacionales tales como la densidad de pulpa, la viscosidad y el nivel del colector, se mantienen constantes. Una comparación de las dos tecnologías de flujómetro relacionadas con la potencia de la bomba se pueden observar en la Figura 8. En esa figura la potencia de la bomba está representada por la línea gris continua, que coincide estrechamente con la línea continua oscura que describe la medición del flujómetro de arreglo sonar. El resultado del flujómetro electromagnético, representado por la línea punteada oscura, difiere de manera significativa tanto de la potencia de la bomba como del resultado del flujómetro de arreglo sonar.

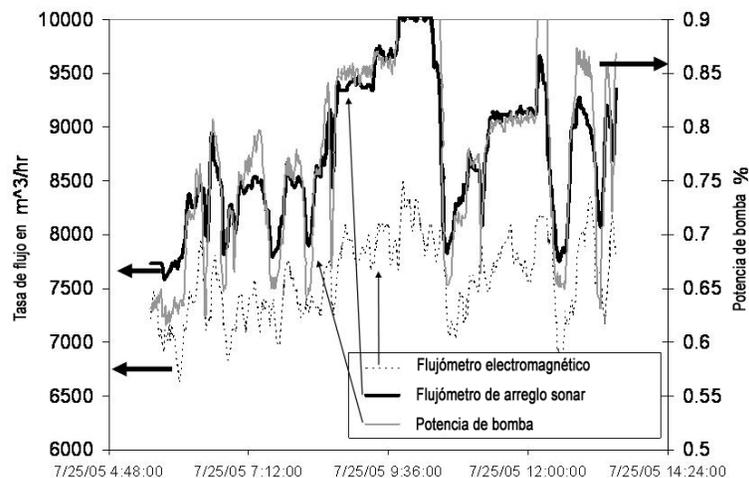


Figura 8: Comparación del flujómetro de arreglo sonar y el flujómetro electromagnético con la potencia de bomba en la línea de alimentación del hidrociclón

Un análisis cuantitativo del funcionamiento de los flujómetros se puede obtener al comparar sus resultados con respecto de la potencia de bomba. Primero, al graficar los resultados del flujómetro en el eje ordenado y la potencia de la bomba en la abscisa, se puede ver el despliegue de las mediciones de flujo a diferentes niveles de la potencia de bomba, como se observa en la Figura 9. En la figura, el resultado del flujómetro electromagnético se muestra con los puntos oscuros, mientras que el del flujómetro

basado en arreglo sonar, se indica con puntos grises. Si ciertos parámetros clave de proceso se mantienen constantes, entonces para la misma potencia de bomba, las tasas de flujo informadas deberían tener una expansión mínima a lo largo del eje ordenado en cada nivel de potencia de bomba. Asumiendo una respuesta cuasi lineal de la tasa de flujo con la potencia de la bomba, se puede aplicar un modelo de regresión lineal a cada medición del flujómetro junto con una indicación cuantitativa del ajuste e inversamente la extensión del flujo informado al calcular el coeficiente de determinación (R^2) que puede estar en el rango de 0 a 1,0. En este caso, un R^2 mayor indica mejor funcionamiento.

Este cálculo se realizó con los datos de la Figura 9, resultando en un R^2 de 0,58 para el flujómetro electromagnético y un R^2 de 0,90 para el flujómetro de arreglo sonar. Otra indicación de funcionamiento puede obtenerse al comparar la potencia de la bomba con los resultados de los flujómetros durante los períodos de potencia de bomba relativamente estable y, por lo tanto, un flujo que se asume también relativamente estable.

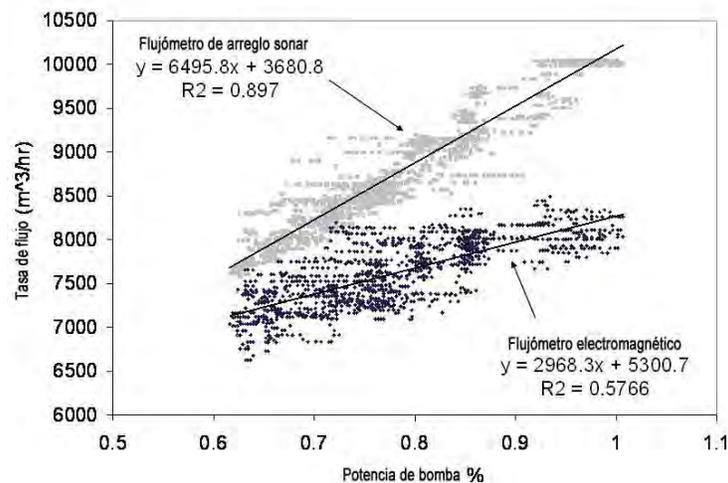


Figura 9: Tasa de flujo indicada por el flujómetro de arreglo sonar y el flujómetro electromagnético con respecto de la potencia de bomba (como un porcentaje de la potencia máxima)

Los resultados de esta comparación se muestran en la Tabla 1. En esta tabla el estándar de desviación de los dos flujómetros se dividen por sus respectivas medias durante los dos períodos de tiempo seleccionados para proporcionar una desviación normalizada estándar del flujo informado. El flujómetro electromagnético demostró una desviación estándar normalizada de más de cuatro veces mayor que el flujómetro de arreglo sonar. Un examen visual de los resultados de la Figura 9 indica que estas diferencias en la desviación estándar son variaciones de baja frecuencia y, por lo tanto, resultan mínimamente impactadas por la filtración.

Tabla 1: La comparación del funcionamiento del flujómetro con arreglo sonar y el electromagnético durante períodos de flujo relativamente estable

Inicio	Término	Desviación Estándar Normalizada Medidor Electromagnético	Desviación Estándar Normalizada Medidor de Arreglo Sonar
8:48	9:19	1.37%	0.40%
11:26	12:07	1.80%	0.38%
Note: La potencia de bomba y la tasa de flujo asumida mostraron algunas fluctuaciones durante estos períodos.			

La lectura de flujo más precisa y repetible del flujómetro de arreglo sonar permite a los operadores mantener la razón óptima de carga circulante (McIvor, 2009). La combinación de la tasa de flujo, la presión y la gravedad específica se usa en muchas operaciones para controlar el número de hidrociclones que están activadas en una batería de hidrociclones. Este control es esencial para la optimización del proceso de separación para obtener la correcta distribución de tamaño de partícula que se necesita en la flotación, lixiviación o en las etapas de separación magnética, mientras además se maximiza la producción en los molinos al minimizar el exceso de trituración. "La deficiente operación de los ciclones es la causa más común de ineficiencias en la molienda." (Napier-Munn et al, 2005)

Flujo volumétrico y gas arrastrado para maximizar la producción del circuito de molienda

Una refinería de alúmina utiliza el flujo hundido del clasificador (carga circulante) como un limitador del controlador del circuito general de molienda. El flujo de alimentación del clasificador se usa como control con el objetivo de manejar la carga circulante de manera de asegurar una tasa óptima de alimentación de molino, evitar la sobrecarga y maximizar la producción. La línea de alimentación de 400 mm ha sido instrumentada con un flujómetro electromagnético y un flujómetro de arreglo sonar.

A altas tasas de alimentación, el flujómetro electromagnético es propenso al ruido y las interferencias debido al aire arrastrado y al impacto de los sólidos en los electrodos. La medición de flujo ruidoso causa que el sistema de control reaccione reduciendo la linealidad entre la alimentación del molino y la carga circulante. El resultado es que la carga circulante no puede ser usada como el limitador del molino y, por consiguiente, se reduce la carga.

Al aplicar la tecnología de arreglo sonar a la línea 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 del molino. La Figura 10 es una representación de la carga circulante versus

la tasa de alimentación del molino según la medición del flujómetro electromagnético. Un ajuste lineal de estos datos produce un R^2 de 0,53.

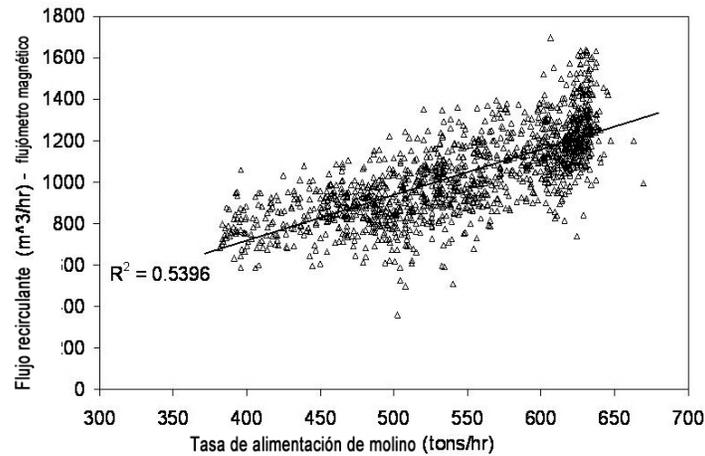


Figura 10: Tasa de flujo circulante versus tasa de alimentación de molino según medición del flujómetro electromagnético.

La Figura 11 es una representación de la carga circulante versus la tasa de alimentación del molino según la medición del flujómetro de arreglo sonar. Un ajuste lineal de estos datos produce un R^2 de 0,72.

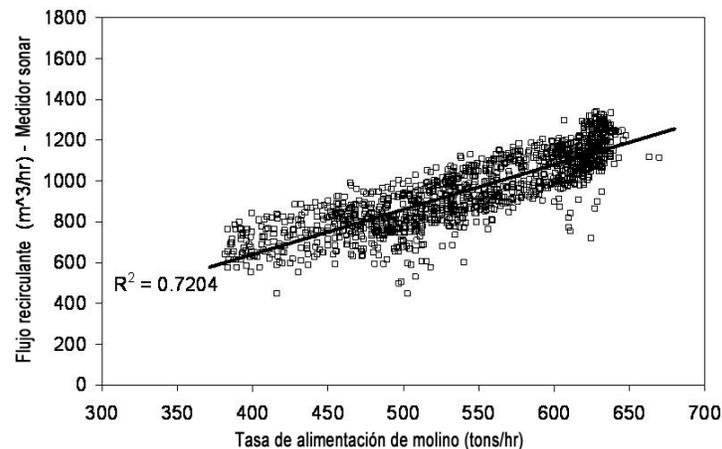


Figura 11: Tasa de flujo circulante versus tasa de alimentación de molino según medición del flujómetro de arreglo sonar.

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

medición de densidad en la alimentación del clasificador. Esto será discutido en detalle en una próxima sección de este documento.

Medición de flujo volumétrico en la presencia de minerales ferromagnéticos tales como la magnetita y la pirrotita.

La presencia de mineral magnético en una línea de pulpa, ya sea intencional en una planta de mineral de hierro o bien, no intencional en plantas que concentran otros metales, representa un problema potencial para las mediciones del flujómetro electromagnético. En muchos lugares la minería de cobre, oro u otros metales no ferrosos tienen contenido magnético en el cuerpo de sus minerales. El mineral magnético, aun en pequeñas cantidades, crea cambios a corto y largo plazo en los resultados de los flujómetros. Los cambios a corto plazo son el resultado de las interferencias producidas por el campo magnético inducido por el mineral magnético dentro del flujómetro electromagnético que produce un incremento en la información del flujo o la introducción de ruido en los resultados. Los cambios a largo plazo derivan de una atracción del mineral ferromagnético hacia los elementos del flujómetro electromagnético que resultan en una reducción de la sección cruzada de la tubería, incrementando así el exceso de los datos de las tasas de flujo volumétrico. Los fabricantes de flujómetros electromagnéticos han intentado esquivar el impacto del mineral magnético con una tercera bobina, con mediciones del campo magnético y con ajustes manuales de compensación basados en muestras de laboratorio de la pulpa típica. Estos métodos han arrojado variados resultados. Muchas veces la calibración o los cambios de compensación dependen de la cantidad de magnetita presente.

Una solución más robusta debe usar una tecnología de flujómetro que no sea impactada por la presencia del mineral magnético. El sistema de monitoreo de flujo de arreglo sonar no depende del uso de ningún campo magnético. Es totalmente insensible a los efectos del mineral magnético. En la Figura 12 se ilustra un ejemplo de esta situación donde el flujómetro de arreglo sonar se compara con un flujómetro electromagnético. En la figura se puede observar que durante el período de tasa de flujo constante, en la medida que aumenta la cantidad de mineral magnético en la pulpa, el flujómetro electromagnético informa erróneamente una mayor tasa de flujo mientras que el flujómetro de arreglo sonar continúa informando correctamente que no hay cambio en la tasa de flujo.

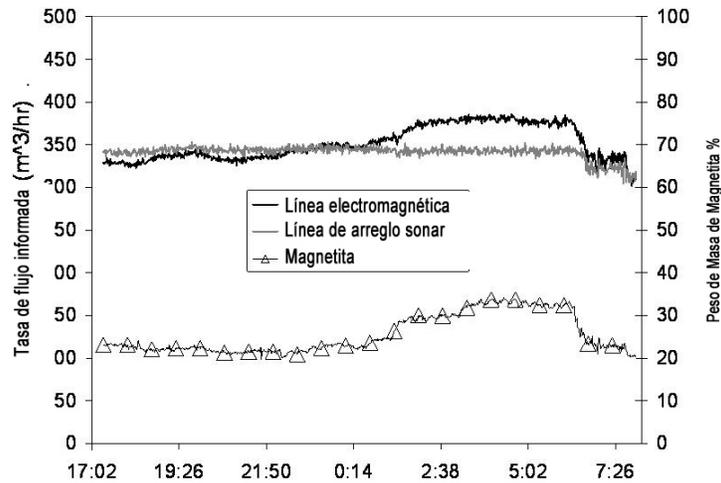


Figura 12: Flujómetro electromagnético responde erróneamente a la magnetita mientras que el flujómetro de arreglo sonar informa el flujo de manera precisa

Corrección de flujo volumétrico por causa de burbujas de aire arrastrado

Para lograr un sistema de procesamiento estable con niveles de eficiencia más altos, es necesaria una mayor precisión y una medición repetible del flujo volumétrico del líquido o de las fases líquido/sólidos (pulpa). Las pulpas tienden a arrastrar burbujas de aire. Las tecnologías de los flujómetros más tradicionales no pueden realizar una medición precisa del flujo en la 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 solar mide robustamente el flujo en presencia de aire arrastrado y determina en forma cuantitativa la cantidad de aire arrastrado.

Las burbujas de aire arrastrado pueden provenir de una multitud de fuentes incluyendo los niveles bajos del colector, procesos de flotación, filtraciones de bomba, intermitencias y otras. La capacidad de medir los niveles de aire arrastrado en dos beneficios mayores. Estos beneficios incluyen la identificación de los problemas del proceso y del equipo, advertencia temprana de potenciales problemas de seguridad y la capacidad de determinar el flujo volumétrico real de la fase líquido/sólido del proceso. Algunos de estos beneficios pueden verse en el ejemplo de la Figura 13. En esta figura el trazo oscuro con triángulos es el flujo volumétrico de las tres fases. Las tres fases consisten en sólido, líquido y burbujas de aire medidas en una línea de concentrado en un concentrador de cobre/oro/molibdeno. El trazo oscuro en la parte inferior del gráfico es una medición de la fracción vacía de gas o el porcentaje de volumen ocupado por las burbujas de gas, medido por el instrumento basado en arreglo sonar. En este caso el aire ha resultado atrapado en la pulpa final de concentrado que puede llevar a un error de cálculo del balance metalúrgico. El trazo gris con los círculos abiertos que está entre los otros dos trazos es la tasa de flujo volumétrico real de la pulpa calculada desde el flujo volumétrico total (trazo negro con triángulos) y la fracción vacía de gas a través de una simple corrección lineal (Ecuación 1).

Flujo Volumétrico Ajustado = Flujo Volumétrico* (1 – Fracción Vacía de Gas %) (1)

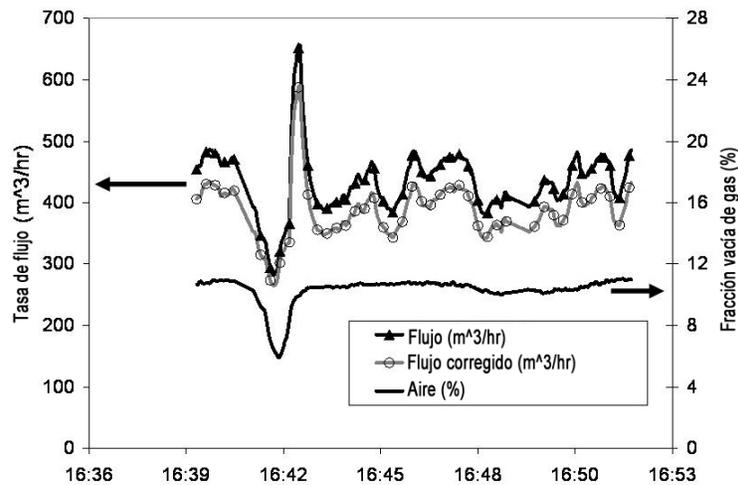


Figura 13: Detección de burbujas de aire arrastrado y compensación de medición de flujo

Corrección calibradores de densidad nuclear por causa de burbujas de aire arrastrado

El calibrador de densidad nuclear generalmente se usa para determinar la gravedad específica de la masa del líquido que a su vez se utiliza para calcular la concentración de la fase de sólidos. La presencia de las burbujas de aire arrastrado o el contenido de vacío de gas reducirán directamente la gravedad específica informada por el calibrador de densidad nuclear. Para obtener la medición correcta de la densidad de pulpa misma, se debe medir la fracción vacía de gas y utilizar esa medición como factor de corrección. Para validar esta aproximación, se realizó una prueba en la que se introdujo niveles variables de aire al ciclo del flujo de agua conteniendo un indicador de densidad nuclear y un medidor de Fracción Vacía de Gas (GVF) de arreglo sonar. La Figura 14 muestra que cuando se incrementó la tasa de inyección de aire, el indicador de densidad nuclear disminuyó proporcionalmente (línea de densidad informada). El instrumento de arreglo sonar de la misma línea midió con precisión el contenido de aire resultante (% sonar de la línea GVF). Utilizando esta medición, se aplicó una simple corrección lineal al resultado del indicador de densidad nuclear (línea de densidad corregida). Como resultado, el error ha sido reducido de 5% a +/- 0,25%.

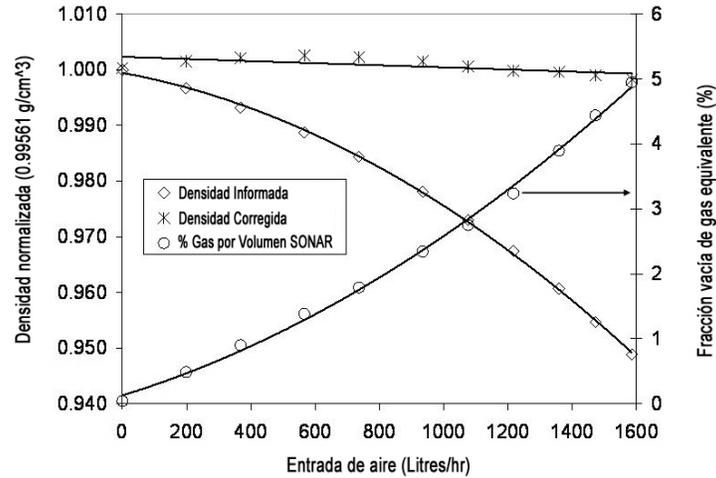


Figura 14: Medidor de flujo de arreglo sonar utilizado para corregir el indicador de densidad nuclear para errores inducidos por aire arrastrado.

Mejoras del cálculo de balance de masa con tecnología de arreglo sonar

En una sección anterior, la Figura 13 muestra la forma en que el aire arrastrado causa errores en la medición de la densidad si no se hace una corrección. La extensión 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 la fase líquida 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 salina, por lo tanto, la gravedad específica relativa será menor que la gravedad específica de la pulpa. En la medida que la gravedad específica se aproxima a uno, el error de cálculo de flujo de masa resultante aumentará en la presencia del aire arrastrado. La Figura 15 muestra los errores en la tasa de flujo de la masa como una función de la gravedad específica relativa y en porcentaje del aire arrastrado (fracción vacía de gas). El impacto negativo resultante sobre los cálculos de balance de masa, cálculos de recuperación, así como las iniciativas de mejora de proceso, puede ser significativo.

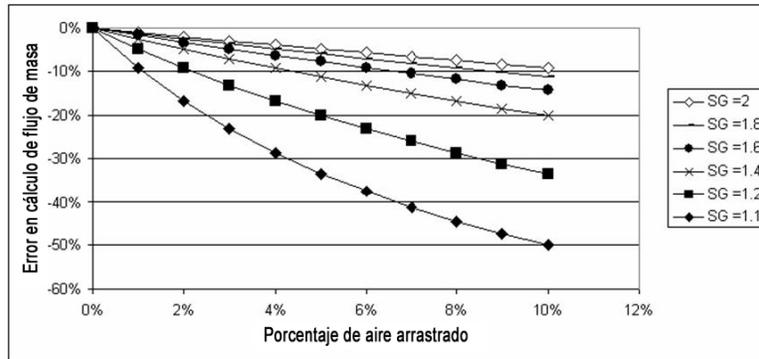


Figura 15: El error introducido por los cálculos de las tasas de flujo de masa de aire como función de la gravedad específica relativa de pulpa (SG).

Medición de flujo con acumulación de residuos/descamaciones en el interior de las paredes de tubería

Una situación común en los flujos de proceso que contienen agua dura, agua de la depuradora, licor de bauxita, y pulpa de cal es la acumulación de residuos en el interior de las paredes de la tubería. Esta acumulación de residuos puede variar desde una capa delgada a una de varias pulgadas de espesor, dependiendo del material de la tubería y el revestimiento, la composición del fluido, la tasa de flujo, y los intervalos entre actividades de mantenimiento realizadas para eliminar los residuos. El impacto de esta acumulación de residuos varía en la mayoría de los flujómetros. Puede haber un pequeño impacto como aumento de ruido o importantes impactos como la distorsión de la medición de flujo informada. En algunos casos se reportará una falla completa del flujómetro a cualquier tasa de flujo. Ningún flujómetro es totalmente inmune a los efectos de la acumulación de residuos, pero los flujómetros comúnmente utilizados en el procesamiento de minerales, tales como es el caso de los medidores electromagnéticos y los medidores por ultrasonido, son particularmente sensibles a los residuos.

Impacto de la acumulación de residuos en flujómetros por ultrasonido y electromagnéticos

En el caso del tiempo de tránsito de los flujómetros por ultrasonido, una onda ultrasónica inyectada dentro del fluido tiene que viajar entre dos transductores utilizando la curva conocida o la refracción de la onda de ultrasonido en la tubería a la interfaz del fluido. El impacto de los residuos en estos medidores implica tres efectos: 1) atenuación de la señal de ultrasonido en el residuo, 2) dispersión de la señal de ultrasonido en el residuo hacia la interfaz del fluido y 3) cambio en el ángulo de refracción en el residuo hacia la interfaz del fluido.

Los flujómetros por ultrasonido del tipo doppler operan con un principio diferente a los flujómetros de tiempo de tránsito y su arreglo de transductores también difiere. Ellos también padecen de los mismos problemas inducidos por los residuos. Aun cuando el cambio del ángulo de refracción no necesariamente pudiera causar que la señal de un transductor omita el segundo transductor, ciertamente cambiará el flujo informado. La

conversión del cambio de frecuencia doppler a una lectura de flujo requiere que el instrumento conozca el ángulo entre la dirección de propagación de la onda de ultrasonido y la dirección axial de la tubería. Los residuos cambiarán este ángulo produciendo una lectura de flujo errónea.

Los flujómetros electromagnéticos operan utilizando la interacción de un campo magnético con un fluido conductivo que fluye para crear un campo eléctrico dentro del flujo. A su vez, el campo eléctrico es detectado y medido por un par de electrodos instalados en lados opuestos en el interior de la tubería. La acumulación de residuos en los electrodos sirve para aislarlos eléctricamente impidiendo que el flujómetro mida el voltaje inducido en el flujo. El único recurso es detener el proceso para desviar el flujo, sacar el flujómetro electromagnético y eliminar los residuos.

Impacto de la acumulación de residuos en el flujómetro de arreglo sonar

La tecnología de arreglo sonar pasivo no depende del contacto de ningún electrodo con el fluido, ni tampoco de la inyección y recuperación de una señal dentro del flujo. Las señales de presión inducidas por remolinos turbulentos simplemente presionan el residuo que a su vez tensiona la pared de la tubería y luego los sensores. El impacto de la acumulación de residuos es que la rigidez de la tubería que puede aumentar, lo que reducirá la magnitud de la tensión. Dado que la magnitud absoluta no se usa en el cálculo del flujo, no hay cambio en la medición de la velocidad de flujo. Como la mayoría de los medidores de velocidad, el flujómetro de arreglo sonar usa el área interior de sección cruzada efectiva de la tubería para convertir la velocidad en un flujo volumétrico. La acumulación de residuos reducirá esta área de sección cruzada interior requiriendo algunos ajustes del dato de diámetro interno ingresado al transmisor. La diferencia es que, distinto de lo que ocurren en los flujómetros tradicionales tales como los medidores electromagnéticos, los medidores por ultrasonido, los medidores basados en diferencial de presión, etc., el flujómetro de arreglo sonar continuará operando, eliminando así los períodos en que el operador trabaja a ciegas en esos puntos de medición.

Esta tecnología ha sido probada en una diversidad de tuberías con acumulación de residuos provenientes del agua de la depuradora, licor verde de bauxita y cal. El primer ejemplo corresponde a 450 mm de una línea de alimentación de agua del molino de de bolas en una operación de molienda de un concentrador de cobre. En este caso se estima que se tiene un residuo de cal de 50 mm en el diámetro interior de la tubería. Aguas abajo del flujómetro de arreglo sonar existe un flujómetro electromagnético que es limpiado cada cierta cantidad de meses para eliminar los residuos de los electrodos. Esta práctica de mantención es necesaria para que el flujómetro electromagnético continúe en operación. La mantención es una labor intensiva, resulta en la pérdida de mediciones de flujo y depende de un sistema de derivación para evitar una detención del proceso. La válvula usada para desviar el flujo está desarrollando problemas desde la misma acumulación de residuos y el sistema de derivación tiene una vida limitada. Como se puede ver en la Figura 16, ambos flujómetros tienen niveles de ruido, respuestas a cambios de flujo y resultados similares. El flujómetro electromagnético ha sido limpiado y el flujómetro de arreglo sonar está midiendo la tasa de flujo a través de la acumulación de residuos. Ha sido demostrado que el flujómetro sonar de arreglo sonar puede ser usado

en lugar del flujómetro electromagnético. Esto eliminará el costo de capital por el ciclo de derivación así como los de mantenimiento anual asociados a la limpieza del flujómetro electromagnético.

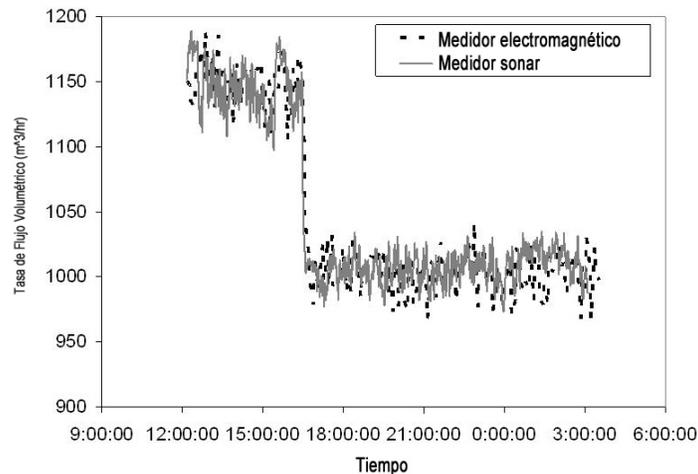


Figura 16: Operación del flujómetro de arreglo sonar en tuberías de agua con dos pulgadas de acumulación de residuos comparado con un flujómetro electromagnético recientemente limpiado.

El segundo ejemplo corresponde a una línea de licor verde bauxita de 300 mm instalado en el lado rojo del proceso. En esta aplicación la acumulación de residuos es muy agresiva. La tasa de acumulación puede alcanzar a los 5 mm por mes. Aguas arriba del flujómetro de arreglo sonar hay un flujómetro electromagnético que se limpia durante las detenciones regulares del proceso anual. El flujómetro electromagnético generalmente operará entre tres a seis meses y luego fallará por causa de la acumulación de residuos en los electrodos. El flujómetro de arreglo sonar opera en forma continua a pesar de los residuos. En la Figura 17 se muestra el funcionamiento ininterrumpido de los flujómetros de arreglo sonar en el momento que el flujómetro electromagnético falla. Ha sido demostrado que el flujómetro sonar de arreglo sonar puede ser usado en lugar del flujómetro electromagnético. Esto eliminará los costos anuales de mantenimiento que van asociados a la limpieza del flujómetro electromagnético. Más importante aún es que el flujómetro de arreglo sonar proporcionará una lectura confiable del ciclo completo de operación de la planta.

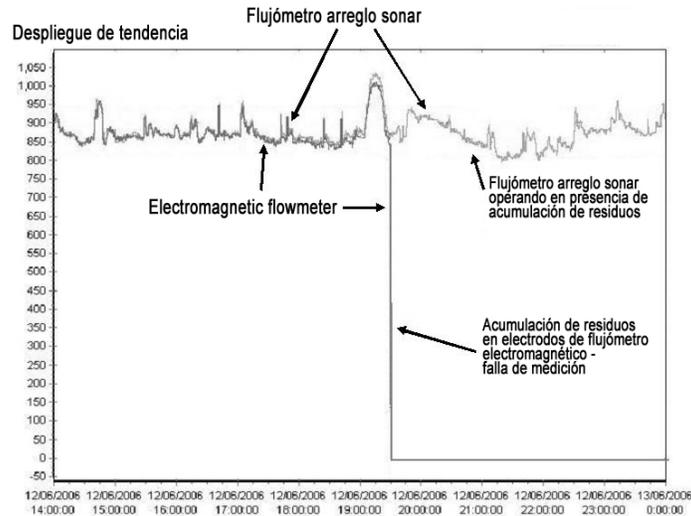


Figura 17: Operación de flujómetro sonar en una línea de licor verde de bauxita con acumulación de residuo durante una falla del medidor electromagnético.

CAPACIDAD ADICIONAL DE MEDICIÓN

La tecnología de arreglo sonar ha conducido al desarrollo de una plataforma que da soporte a muchas otras capacidades de medición. Éstas incluyen el monitoreo acústico de las tuberías y el equipo, así como también la determinación de la estratificación de pulpas y la formación de embancamientos de arena.

Actuación de válvula en monitoreo de una tubería de concentrado de alta presión

Durante el transcurso de la medición de flujo, el flujómetro de arreglo sonar detecta los niveles acústicos dentro de la tubería. Se realizó una prueba en Chile con una tubería de 600 mm con concentrado de cobre. Al monitorear estos niveles acústicos en las frecuencias seleccionadas, se pueden obtener información adicional de algunos eventos que ocurren en una tubería. Como un ejemplo se puede mencionar el movimiento de la válvula en una estación reguladora de reducción de presión con cambios en los niveles acústicos durante el movimiento, así también, antes y después del movimiento cuando el flujo es desviado a otra tubería. El flujo que se muestra con la línea oscura en la Figura 18 cambia en aproximadamente 8% por causa de la variación de posición de la válvula que direcciona el flujo a través de un paso diferente en la estación reguladora. El nivel acústico cambia en un factor de tres a cuatro (200% a 300%) durante el movimiento y en un factor de tres (200%) entre las posiciones de la válvula. La combinación de la medición de flujo y del nivel acústico proporciona la información necesaria para monitorear la válvula. Por lo tanto, el medidor entrega no sólo la tasa de flujo de la pulpa sino también la verificación de que las válvulas han cambiado su posición. Esto es particularmente importante en situaciones que requieren monitoreo remoto y verificación de eventos críticos.

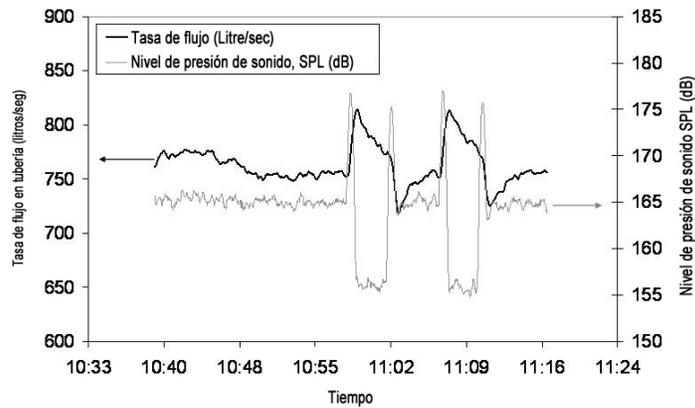


Figura 18: Medición de flujo y nivel acústico en una estación reguladora mientras las válvulas son actuadas.

Perfil de velocidad y detección de acumulación de arenas

La posibilidad de que algunos materiales sólidos se asienten en el fondo de la tubería y provoquen un bloqueo de ella, es una preocupación común entre los operadores de tuberías de hidrotransporte. Los operadores trabajan con ahínco para evitar esta condición de “embancamiento de arena” manteniendo la tasa de flujo sobre un valor de velocidad de deposición calculado o determinado empíricamente. Lamentablemente los modelos incompletos y los cambios en las propiedades de la pulpa incluyendo la viscosidad, contenido de finos, y los cambios en la distribución del tamaño de partícula, hacen difícil la determinación de la velocidad de deposición exacta. Por lo tanto, para evitar su bloqueo, las tuberías son generalmente operadas a velocidades más altas que las necesarias. Una mejor solución es monitorear activamente el perfil de flujo en la tubería. En la medida que el promedio de la velocidad de flujo disminuye, las partículas más densas se depositan en el fondo de la tubería. Durante esta condición, la velocidad de flujo en el fondo de la tubería es menor que la tasa de flujo promediada volumétricamente, como se muestra en la Figura 19. Por medio de un instrumento diferente, incluyendo un sensor con desarrollo de ingeniería especial y unidades múltiples de procesamiento, se puede medir el flujo a diferentes alturas dentro de la tubería.

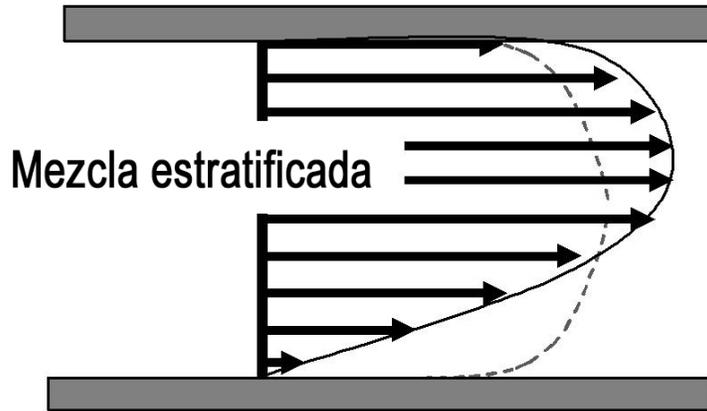


Figura 19: Ilustración del cambio de perfil de flujo que se produce durante la formación de "embancamiento de arena"

En la Figura 20 se muestran los resultados obtenidos en terreno. Aquí el cambio en el perfil del flujo por causa de la estratificación de las partículas es evidente para las velocidades menores, cerca del fondo de la tubería, cuando se aproxima a la condición de "embancamiento". Al procesar algunas propiedades características del perfil de flujo, se puede generar una condición de alarma.

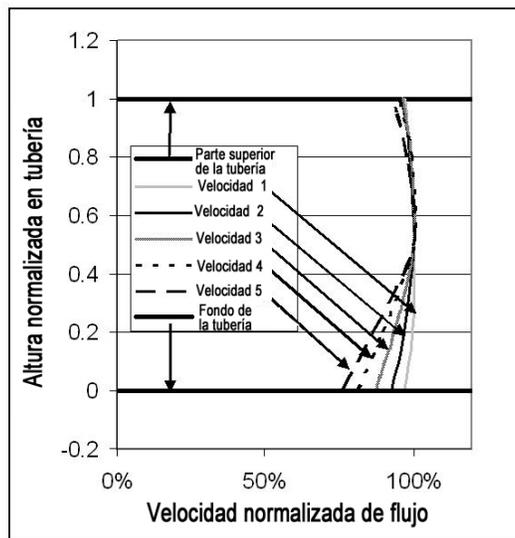


Figura 20: Perfiles de velocidad a diferentes tasas de flujo. Nótese la caída de la velocidad al fondo de la tubería a menores tasas de flujo

Al extender este procesamiento para examinar, no sólo la condición donde ha ocurrido un pequeño nivel de "embancamiento", sino que además ahora ha alcanzado un nivel más alto en la tubería, (>25% de la altura de la tubería), podemos establecer un nivel más alto en la alarma. Esto se ilustra en la Figura 21.

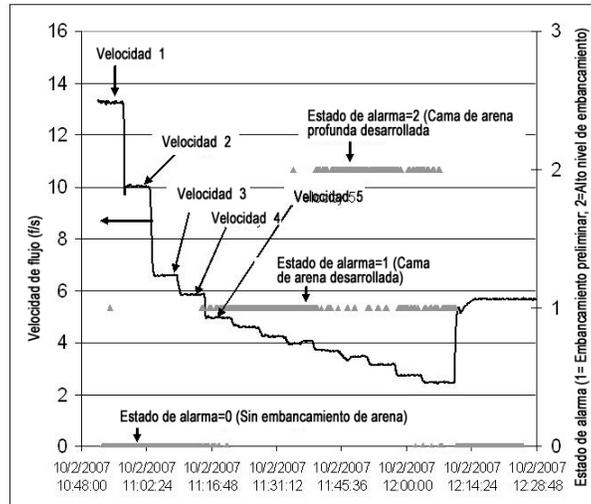


Figura 21: La velocidad de flujo y la condición de alarma para bajos niveles de embancamiento de arena (nivel alarma = 1) y altos niveles de embancamiento (nivel de alarma = 2)

RESUMEN

Los instrumentos de arreglo sonar y de medición de aire arrastrado son una clase nueva de analizadores composicionales de flujo industrial resultantes de 60 años de desarrollo y uso de tecnología sonar. Estos instrumentos han sido específicamente diseñados para aplicaciones en flujos de fase múltiple y están bien adaptados para un amplio rango de aplicaciones en el procesamiento de minerales. La tecnología ha sido probada en terreno y tiene años de experiencia operacional en concentradores alrededor del mundo. El uso de esta tecnología resuelve los problemas de larga duración de medición de flujo relacionados con el rendimiento y mantención dentro de las plantas concentradoras. Estos problemas incluyen la medición confiable y repetible del flujo en presencia de pulpas abrasivas, pulpas con contenido de sólidos en continuo cambio, tuberías con acumulación de residuos, minerales magnéticos y flujos de concentrado con alto contenido de aire. Esta capacidad de medición de flujo mejorada permite a los operadores controlar con mayor precisión el proceso crítico. Esto incluye la producción de los molinos de molienda al controlar la carga circulante, balance de masa del circuito de flotación y contabilización del concentrado final al medir el flujo y corregir la medición de la densidad, además del manejo de relaves por medio de una medición robusta del flujo.

La tecnología de arreglo sonar es una plataforma escalable que es más que simplemente una tecnología de flujo. Tiene la habilidad y la capacidad de proporcionar otras siete mediciones e información de valor agregado como la velocidad del sonido, aire/gas arrastrado, retención de gas y niveles acústicos.

AGRADECIMIENTOS

Los autores queremos agradecer a nuestros clientes por adoptar el equipo de monitoreo de proceso SONARtrac®, que proporciona datos de planta y otros soportes técnicos. Los autores también agradecemos los esfuerzos del dedicado grupo de trabajo de procesamiento de minerales de CidRA.

REFERENCIAS

McIvor, R. E., 2009. *La importancia del uso del agua para maximizar la eficiencia del sistema de clasificación en el circuito de molienda* (The importance of water utilization for maximizing grinding circuit classification system efficiency), presentado en el Preimpreso de la Reunión Anual del SME 09-067 (Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc., Littleton)

Napier-Munn, T.J., Morrell, S., Morrison, R.D., and Kojovic, T., 2005. *Circuitos de Trituración de Mineral, su Operación y Optimización* (Mineral Comminution Circuits Their Operation and Optimisation), Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre, Australia, p. 309.