

APLICACIÓN DE TECNOLOGÍA SONAR EN EL PROCESAMIENTO DE MINERALES

DR. CHRISTIAN O'KEEFE

Director, Desarrollo de Negocios Regionales y Aplicaciones de Ingeniería, Procesamiento de Minerales

CiDRA Corporation

Wallingford, CT 06492 USA

TEL.: (1) 203-626-3393

Móvil: (1) 860-966-8735

cokeefe@cidra.com

ROBERT MARON, P.E. (author correspondent)

Director, Director de Desarrollo de Negocios y Aplicaciones de Ingeniería, América Latina

CiDRA Corporation

Wallingford, CT 06492 USA

TEL.: (1) 203-626-3354

Móvil: (1) 860-638-9928

bmaron@cidra.com

LENIE GAJARDO E., Ing.

Asesor Operaciones, Transporte de Pulpa & Suministros

Anglo American (Chile) – División Los Bronces

Santiago, Chile

TEL.: (56) 2-230-6860

Movil: (56) 99-479-2029

lgajardo@anglochile.cl

RESUMEN

En esta presentación se describe la plataforma tecnológica del *SONARtrac*®. La tecnología de medición de flujo de CiDRA, basada en un arreglo sonar pasivo, realiza dos mediciones independientes - tasa de flujo y velocidad de sonido. Primeramente, el medidor entrega la tasa de flujo volumétrico de mezcla midiendo la velocidad a la que los remolinos turbulentos que se producen en forma natural convectan con el flujo en un arreglo axial de sensores. En segundo lugar, el medidor utiliza técnicas sonares similares de procesamiento y sonido natural en el fluido del proceso para medir la velocidad del sonido que se usa para determinar las características del flujo y los niveles de aire arrastrado. El resultado es una capacidad única de medir la tasa de flujo y el nivel de aire arrastrado en la mayoría de los flujos – líquidos limpios, pulpas con algún contenido de sólidos y líquidos y pulpas con aire arrastrado.

También se presentará la aplicación de la plataforma tecnológica sonar en una variedad de aplicaciones de hidrotransportes y beneficio de minerales. En particular, se tratarán temas relacionados con la medición de pulpas complejas y el control en áreas de trituración/chancado y flotación, tales como la descarga de molinos, alimentación/sobreflujo de hidrociclones, concentrado final, descarga de espesadores, operación de mineroductos, y relaves. Además se expondrá una nueva capacidad de medición en tiempo real y que no requiere mantención, a ser aplicada en áreas de pulpa con aire arrastrado, zonas de recolección de gas (*gas holdup*), seguimiento de colada/carga en cañerías de concentrado final y monitoreo de eventos y condiciones acústicos. Se revisarán las ventajas operacionales y el valor de estas mediciones.

INTRODUCCIÓN

Las mediciones de flujo en la industria de procesamiento de minerales sufren las limitaciones impuestas por los flujómetros existentes, incluyendo los instrumentos comúnmente utilizados tales como, medidores ultrasónicos, medidores magnéticos, medición por turbina, medidores de placas de orificio, medidores de flujo de vórtice, Coriolis y tubo de venturi. El deseo o la necesidad de hacer una medición sin contacto que sea precisa y robusta y que además pueda ser ejecutada en prácticamente cualquier tipo de fluido dentro de cualquier tipo de cañería, han impulsado la creación de una nueva clase de flujómetros. Esta nueva tecnología de medición de flujos utiliza algoritmos de proceso sonares y un arreglo de sensores pasivos para medir, no sólo el flujo, sino también la composición del fluido.

La tecnología sonar de medición de flujo es realmente única. "De acuerdo con mis conocimientos, desde la invención del medidor de flujo de Coriolis no se ha producido ni un solo principio realmente nuevo en la medición de flujo industrial... Finalmente, me encuentro con uno nuevo... Entra CiDRA Corporation (www.CiDRA.com). Ellos simplemente han logrado producir tal instrumento," (Boyes 2003)

PRINCIPIO DE OPERACIÓN

Los medidores de flujo basados en tecnología sonar son ideales para rastrear y medir las velocidades medias de las interferencias que se desplazan en dirección axial de una cañería. Estas interferencias generalmente harán convección con el flujo, se propagarán por las paredes de la cañería, o bien, en el flujo de la pulpa. Primero enfoquémonos en las interferencias que convectan con el flujo. Las interferencias que convectan con el flujo pueden corresponder a variaciones de densidad, de temperatura o remolinos turbulentos. La inmensa mayoría de los flujos industriales tendrán remolinos turbulentos haciendo convección con el flujo, proporcionando de esta manera excelentes medios para medir la tasa de flujo como se describe más adelante.

Remolinos Turbulentos y Velocidad de Flujo

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, pero con una velocidad media igual a la del flujo, es decir, convectan con el flujo. En la Figura 1 se puede observar una ilustración de estos remolinos turbulentos. 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. En promedio, estos vórtices se distribuyen a través de la sección cruzada de la cañería y, por lo tanto, a través del perfil de flujo. Así, si uno hace un seguimiento de las velocidades axiales promedio de todos los vórtices, se puede obtener una medición que es cercana a la velocidad promedio del flujo.

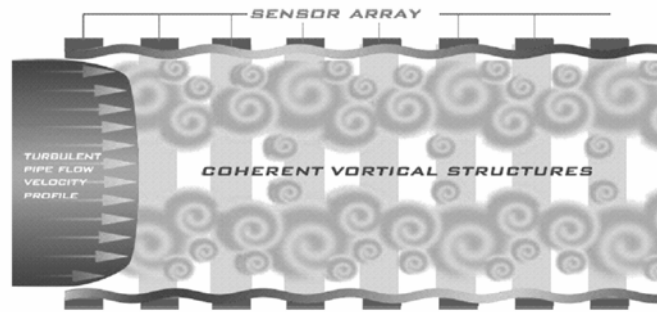


Figura 1: Diagrama de cañería con flujos turbulentos donde se observa un perfil de flujo completamente desarrollado y los remolinos turbulentos, así como también los sensores pasivos, que no hacen contacto, enrollados alrededor del exterior de la cañería.

Medición de Velocidad de Flujo a través del Arreglo de Sensores

La medición de las velocidades axiales promedio de un grupo de vórtices 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 a seguir para realizar esta medición es la siguiente:

- El movimiento de los remolinos turbulentos 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 (Figura 1, condición aumentada para claridad de la ilustración).
- 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 requieren líquidos ni gel para acoplar el sensor a la cañería.
- Esta señal eléctrica es interpretada como una marca característica de los componentes de frecuencia y fase de los remolinos turbulentos bajo el sensor.
- Esta característica 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 cañería y dispuestos en dirección axial.
- Un arreglo de algoritmos de proceso combina la información de fase y proceso en los elementos del sensor para calcular la velocidad de la marca característica anterior cuando hace convección bajo el arreglo de sensores.

Visto de manera práctica, los desafíos para realizar esta medición son muchos. Entre ellos está el desafío 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 cañería. El impacto de estos efectos es que la presión dinámica causada por los remolinos turbulentos generalmente será mucho menor que la presión dinámica proveniente de las vibraciones de una cañería 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 la débil señal de los remolinos turbulentos que convectan, y las fuertes señales provenientes de las ondas acústicas y vibraciones.

Generalmente los medidores de flujo no entregan ninguna indicación de la calidad de la medición. Por el contrario, en el algoritmo de proceso sonar ese factor de calidad puede ser generado al comparar la fortaleza de la medición de velocidad contra los niveles de energía de fondo. Se genera un factor de calidad que va de 0 a 1,0, con una medición de flujo que proporciona un factor de

calidad por sobre 0,1 ó 0,2 (dependiendo de la aplicación) teniendo la confianza de que está realizando una buena medición.

Actualmente esta tecnología puede reportar una tasa de volumen de flujo en líquidos y pulpas con velocidades de flujo que van de 3 a varios cientos de pies por segundo. La tecnología tiene la característica de poder medir en prácticamente cualquier tamaño de cañería, siempre que el flujo sea turbulento y, en algunos fluidos no-Newtonianos, incluso sin presencia de turbulencias. La cañería debe estar llena pero puede tener aire arrastrado en forma de burbujas bien mezcladas.

Calibración y mantenimiento

La medición del volumen de flujo proporcionada por el rastreo de los remolinos turbulentos requiere un pequeño ajuste o calibración. En la práctica la calibración ajusta el producto informado sólo en un pequeño porcentaje, dependiendo del número de Reynolds. Después de aplicar un factor de corrección, el valor compensatorio llega a +/- 0.5% bajo estas condiciones de referencia, como se muestra en la Figura 2. En terreno, sin calibración en la línea, nuestra especificación de precisión es del +/-1,0%.

Dado que la medición de flujo y su calibración no dependen de los valores absolutos de ninguna señal análoga, no se alterará con el tiempo o la temperatura. La diferencia de mantenimiento de la calibración de medidor a medidor y con respecto de los efectos de la temperatura y el tiempo de uso dependerán en conservar el espacio entre los elementos del sensor y la estabilidad del reloj utilizado en el digitalizador. El espacio entre los sensores se ajusta en fábrica, donde son adheridos a láminas de acero inoxidable y no puede, por lo tanto, ser modificado por el cliente. La estabilidad del reloj supera el 0,01% por lo tanto, es 50 veces mejor que la precisión típica de +/- 1% que ofrece la tecnología en terreno; y +/- 0,5% bajo las condiciones en referencia, o bien, después de una calibración suplementaria en terreno. Como resultado, el impacto de la estabilidad del reloj puede ser negado. En la Figura 2 se pueden observar los resultados de aplicar los mismos coeficientes de calibración a seis medidores de flujo, todos del tipo de 6 pulgadas y probados en la misma cañería. Como se puede ver, la variación de medidor a medidor es muy pequeña y no cambiará en el transcurso del tiempo.

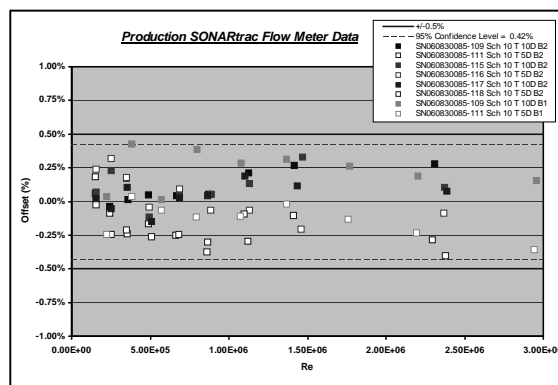


Figura 2: Ilustración de Consistencia de Calibración de Medidor a Medidor. Todos los medidores tienen los mismos coeficientes de calibración.

Medición de Ondas Acústicas a través del Arreglo de Sensores

Como se mencionó anteriormente, los mismos sensores y algoritmos pueden usarse para medir la velocidad de las ondas acústicas que se producen naturalmente y que se desplazan en el fluido. Este fluido puede ser de multifase, o bien, de multicomponentes de fase única. En un fluido de fase única, la velocidad acústica será 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 (velocidad promedio por volumen). En los fluidos de fase múltiple, que consisten de 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.

Estas ondas acústicas son naturalmente generadas a partir de diferentes fuentes, incluyendo las bombas, dispositivos atravesados por flujo, y cambios de geometría de la cañería de circulación. 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 la Figura 3 se muestran estas ondas acústicas en una cañería y como se aprecia, se pueden propagar en cualquier dirección por la cañería, o bien, en ambas direcciones. Dado que las ondas acústicas son ondas de presión, ejercerán tensión dinámica en la cañería durante el ciclo a partir de la compresión a la succión y de regreso. Esta tensión dinámica es entonces capturada por los sensores y convertida en una medición de velocidad acústica.

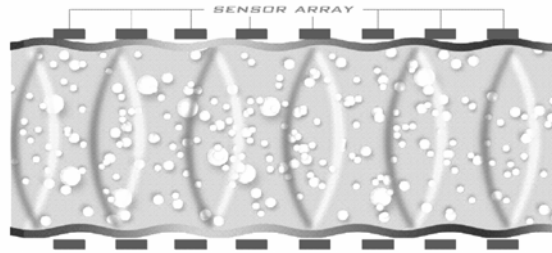


Figura 3: Ilustración de ondas acústicas producidas en forma natural en una cañería y que se propagan bajo los sensores de arreglo sonar

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. En la Figura 4 se muestra un ejemplo de la relación resultante.

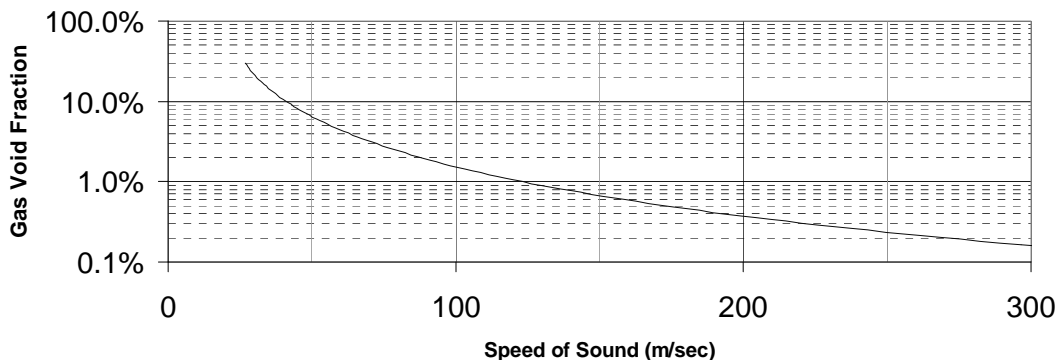


Figura 4: Ejemplo de una relación entre Fracción Vacía de Gas y Velocidad del Sonido

La medición de la fracción vacía de gas se usa en una variedad de campos y aplicaciones diferentes. Dentro del procesamiento de minerales se usa para la corrección de calibración de densidad nuclear, para la corrección de medidor de flujo, en la obtención del volumen real de flujo y en aplicaciones de inyección de aire. Ha sido utilizado con éxito en las aplicaciones con aire arrastrado, en rangos que van de 0,01% a 20% de fracción de vacío de gas con una precisión del 5% en la lectura.

APLICACIONES DE FLUJO VOLUMÉTRICO

Los instrumentos de flujo sonares han sido instalados en más de once países y han sido probados en operaciones de molienda/clasificación, refinación, lixiviación, hidrotransporte y fundición. Éstas incluyen líneas de alimentación de hidrociclones, líneas de sobreflujo de hidrociclones, líneas de bajo flujo de hidrociclones, líneas de alimentación y recuperación de agua, líneas de descarga de molinos SAG y de molinos de bolas, líneas de bajo flujo de espesadores, líneas de relaves, líneas de concentrado final, líneas de lodo rojo y licor verde de bauxita, líneas de solución impregnada, líneas de refinado, líneas de orgánicos, líneas de ácidos, hidrotransporte de coladas de corta y larga distancia y líneas de agua para raspadores. En esta sección se describen algunos ejemplos de estas aplicaciones.

Monitoreo y Control de Hidrociclones

Es muy común medir el flujo de una línea de baterías de hidrociclones. La combinación de tasa de flujo, presión y gravedad específica se usa en muchas operaciones para controlar el número de hidrociclones que se activan en una batería. Este control resulta esencial para la optimización del proceso de separación, para obtener el tamaño de partícula correcto que se necesita en la flotación, en las etapas de lixiviación o separación magnética, a la vez que se maximiza la tasa de producción en molienda al minimizar el exceso de trituración. “Una mala operación de los ciclones es la causa más común de las ineficiencias del chancado”. (Napier-Munn, Morrell, Morrison y Kojovic, 2005)

La tecnología sonar de monitoreo de flujo fue probada por un importante productor de cobre en Chile, Minera Los Pelambres, propiedad de Antofagasta Minerals, que la instaló en serie junto y muy cercana a un medidor magnético nuevo. Los resultados de ambos medidores de flujo fueron comparados a partir de la potencia de la bomba. La potencia de la bomba tiene una relación no lineal con la tasa real de flujo y está influenciada por diversos factores, incluyendo la curva de la bomba y

la curva del sistema en el cual este último es a su vez afectado por la tasa de flujo misma, la viscosidad del fluido y por la gravedad específica de la pulpa. Sin embargo, uno podía esperar que los cambios en la potencia de la bomba se vieran reflejados en los cambios en la tasa de flujo y que un aumento o descenso general de la potencia de la bomba resultará imitado por una respuesta proporcional de primer orden en la tasa de flujo. Al comparar los resultados entre el medidor de flujo magnético y el de arreglo sonar en la Figura 5, uno puede ver que la tasa de flujo informada por el nuevo medidor magnético de flujo tiene poca correlación con la potencia de la bomba, mientras que el flujómetro de tecnología sonar muestra una excelente relación con la potencia de la bomba, reflejando los cambios y magnitudes en la tasa de flujo que se alinean con el correspondiente estado de la potencia de la bomba. La diferencia entre la tasa de flujo real y la lectura del medidor magnético de flujo resultaría en una sobrecarga de los hidrociclones de la batería.

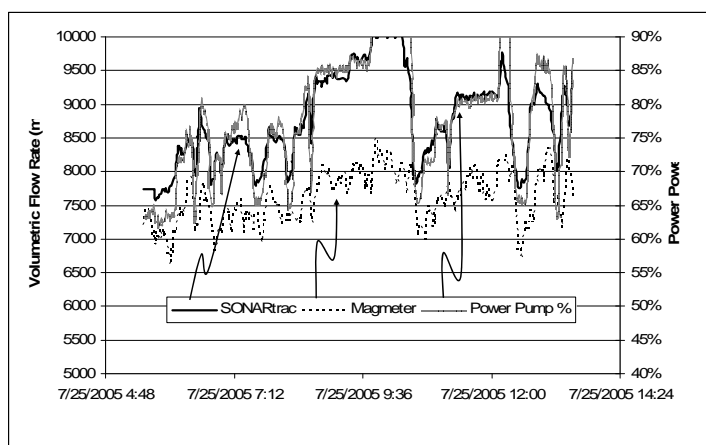


Figura 5: Comparación del Medidor de Flujo Sonar con el Medidor Magnético y la Potencia de la Bomba que muestra la excelente correlación entre el medidor sonar y la potencia de la bomba.

Otra medición que resulta deseable en un hidrociclón para monitorear y controlar completamente el proceso de separación y la carga en circulación, es el sobreflujo y bajo flujo del hidrociclón. Esta medición se puede usar para asegurarse de que un circuito no sea sobrecargado y esté trabajando con las razones correctas de separación. Debido a la presencia de aire atrapado en la pulpa mientras pasa por el hidrociclón, puede resultar mas bien difícil realizar una medición utilizando cualquiera de las tecnologías tradicionales de medición de flujo, en particular con respecto de la descarga de sobreflujo. El principio de medición único de la tecnología de arreglo sonar permite medir la tasa de flujo volumétrico aun con la presencia de gas arrastrado. La medición de fracción de vacío de gas de la plataforma tecnológica puede usarse para medir la cantidad de gas arrastrado y también para corregir la medición de tasa de flujo y así entregar una tasa de volumen de flujo verdadera.

Acumulación de incrustación en el Interior de las Paredes de la Cañería

Una situación común en las líneas de aguas duras, líneas de depuradores, líneas de bauxita y líneas transportando cal, es la acumulación de incrustación en el interior de las paredes de la cañería. Esta acumulación puede variar desde una capa delgada hasta una de varias pulgadas de espesor, dependiendo del material de la cañería y su revestimiento, la composición del fluido, la tasa de flujo y el intervalo entre las actividades de mantenimiento realizadas para remover tales acumulaciones. El impacto de la acumulación de incrustaciones en la mayoría de los medidores de flujo varía desde poco, como un aumento en el ruido, a mucho, como una variación en la medición informada del

flujo o una falla completa del medidor de flujo por la cual simplemente no informa flujo alguno. Ningún medidor de flujo es realmente inmune a los efectos de acumulación de incrustaciones, pero aquellos que generalmente se usan en el procesamiento de minerales, como por ejemplo los medidores magnéticos y los de ultrasonido, son particularmente sensibles. En los medidores de flujo que utilizan el ultrasonido, la descamación acumulada mayormente atenuará la señal y cambiará su ángulo de propagación en el fluido produciendo una lectura errónea. En los medidores magnéticos, la acumulación de incrustación sobre los electrodos los aislará eléctricamente evitando que el medidor de flujo pueda leer el voltaje inducido por el flujo. El único recurso es detener el proceso o desviar el flujo, retirar el medidor magnético y eliminar la acumulación de material.

Impacto de la Acumulación de Incrustación en un Medidor de Flujo de Arreglo Sonar

La tecnología de arreglo sonar pasivo no depende en el contacto de ningún electrodo con el flujo ni en la inyección o recuperación de una señal dentro del fluido. Las señales de presión inducidas por los remolinos turbulentos simplemente presionan la acumulación de incrustación que a su vez presiona la pared de la cañería y luego los sensores. El impacto de la acumulación de incrustaciones es que la dureza o rigidez efectiva de la cañería puede aumentar, lo que reducirá la magnitud de la tensión. Dado que la magnitud absoluta no se usa en el cálculo del flujo, no se produce cambio en la medición de la velocidad del flujo.

Esta tecnología ha sido probada en diferentes tipos de cañerías con acumulación de incrustaciones de depuradores de agua, licor verde de bauxita y cal. En la Figura 6 se muestra un ejemplo de capacidad de operar en presencia de acumulación de incrustaciones. En este caso un medidor de flujo sonar está operando en una cañería de 18 pulgadas que está alimentando agua al molino de bolas. Basados en limpiezas anteriores realizadas al medidor magnético, se estima que la cañería tiene una acumulación de unas dos pulgadas (5 cm.) de incrustación de cal. Aguas abajo del medidor existe un medidor magnético que se limpia cada cierta cantidad de meses para eliminar la incrustación acumulada en los electrodos y permitir así al medidor funcionar nuevamente. Esta operación demanda un trabajo intenso, provoca pérdida de las mediciones de flujo volumétrico y depende de un sistema de desviación para evitar la detención total del proceso. Lamentablemente, la válvula utilizada para desviar el flujo está desarrollando problemas por causa de la acumulación de incrustaciones, limitándose entonces su vida útil. Como se puede observar en la figura, ambos medidores de flujo muestran similitud en los niveles de ruido, en las respuestas a los cambios de tasa de flujo y similares resultados. La diferencia está en los requerimientos de mantención y el tiempo que debe dejarse de medir el flujo.

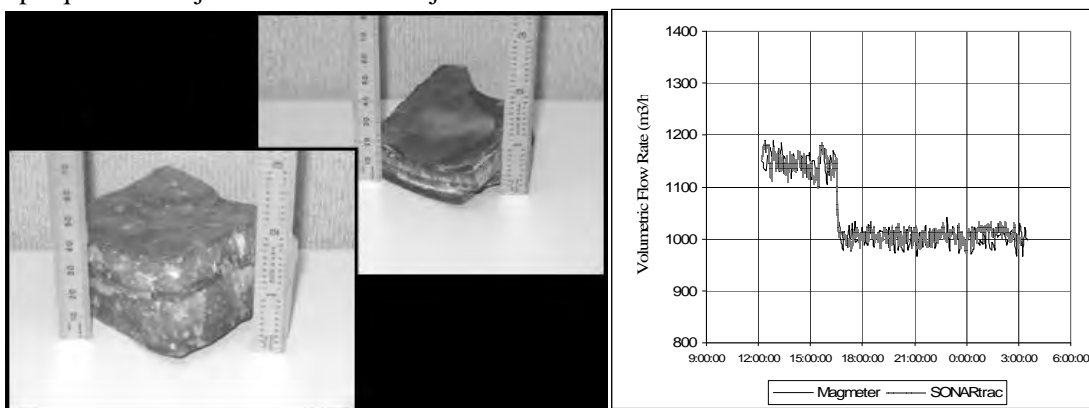


Figura 6: Ejemplos de acumulación de descamaciones y Operación de Flujómetro Sonar en Cañería de Agua con 5 centímetros de acumulación de descamaciones. Se muestra la comparación con medidor magnético recientemente limpiado.

Cañerías Revestidas

El sistema de monitoreo de flujo sonar opera en presencia de prácticamente cualquier tipo de revestimiento de cañería por la misma razón por la que funciona en la presencia de incrustaciones. En la medida que el revestimiento permita un buen contacto mecánico con la pared de la cañería para transferir la presión desde el revestimiento a la pared de la cañería, el sistema pasivo de arreglo sonar funcionará. La tecnología *SONARtrac®* ha sido utilizada exitosamente en cañerías con revestimiento de goma, teflón, cemento y uretano. A modo de ejemplo, en cañerías revestidas con teflón que transportan ácido para ser usado en una operación de lixiviación, el flujómetro sonar se usó para reemplazar los medidores magnéticos que presentaban filtraciones con frecuencia. El revestimiento de teflón no está adherido al interior de la cañería, pero cuando se llena con el ácido bajo condiciones de temperatura y presión, hace un contacto mecánico muy estrecho con la pared de la cañería. El contacto mecánico transfiere la presión desde los remolinos vortiginosos o turbulentos a la pared de la cañería, permitiendo una medición sólida del flujo.

Cañería de Polietileno de Alta Densidad (HDPE)

La cañería de polietileno de alta densidad es una cañería barata, de pared gruesa y baja módulo de elasticidad que se ajusta muy bien para trasladar soluciones impregnadas y refinados. En la Figura 7 se muestra una foto de una sección cruzada. El polietileno de alta densidad es un material semi-cristalino que tiene estructura cristalina y amorfa; muestra propiedades tanto elásticas como dúctiles. Si se suman estas características a su alto coeficiente de expansión térmica (CTE), que es aproximadamente de 200 partes por millón por grado centígrado o 10 veces más que el acero, presenta un desafío para conectar y mantener los sellos sin filtración con estructuras metálicas tales como los medidores magnéticos. La pared gruesa y la atenuación ultrasónica en la pared hacen difícil poder obtener medidas confiables del medidor de flujo ultrasónico. En contraste, las señales de presión pasan con facilidad a través del material de baja módulo de elasticidad, resultando en una señal magnífica para el método de medición de arreglo sonar.

La Figura 7 muestra un ejemplo de los resultados de un medidor de flujo sonar instalado sobre una cañería de polietileno de alta densidad de 30 pulgadas con paredes de 2,25 pulgadas de espesor. En este caso la cañería transporta una solución de refinado en un ambiente que presenta grandes variaciones de temperatura. La medición del flujo volumétrico se verificó a través de un aforo de tanque (drawdown test) y se encontró con que era muy precisa y, como se puede ver en la figura, el factor de calidad es muy cercano al máximo teórico de 1,0, indicador de una medición robusta.

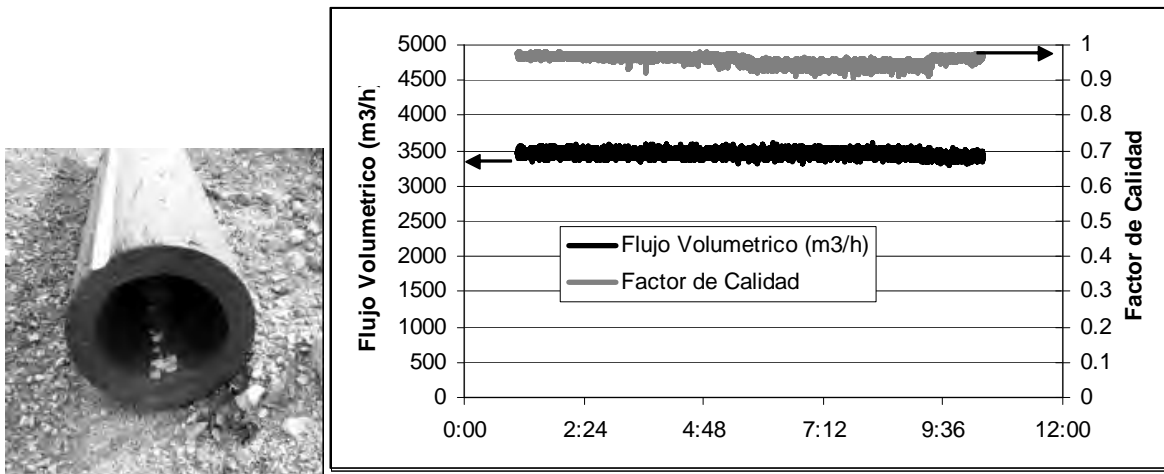
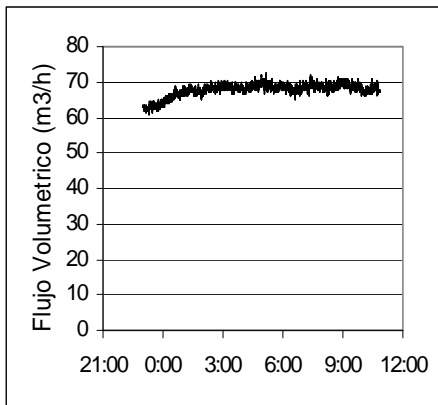


Figura 7: Mediciones de Flujo de Refinado en una Cañería de Polietileno de Alta Densidad de 30 pulgadas. El espesor de pared es de 2,25 pulgadas (5,6 cm.)

Magnetita

La magnetita en una línea de pulpa, ya sea en forma intencional en un mineral de hierro, o no intencional en concentrados de otros metales, presenta un problema potencial para las mediciones de flujo del medidor magnético. Una gran parte de yacimientos mineros de cobre, oro u otros metales no ferrosos tienen magnetita dentro o cerca de los cuerpos del mineral. La magnetita, incluso en cantidades pequeñas, cambia el campo magnético dentro del medidor y puede causar que 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 medidores magnéticos han intentado evitar el impacto de la magnetita con una tercera bobina, con mediciones magnéticas en terreno y con 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 cambia dependiendo de la cantidad de magnetita presente.

Una mejor solución consiste en usar una tecnología de medición de flujo que no sea afectada por la presencia de magnetita. Dado que la tecnología de arreglo pasivo sonar utilizado en el sistema de monitoreo de flujo no depende del uso de ningún campo magnético, es totalmente inmune a los efectos de la magnetita. Un ejemplo de esto se ilustra en la Figura 8 en la que un medidor de flujo sonar fue instalado en una línea en la que han fallado varios medidores de flujo del tipo ultrasónico doppler y varios medidores de flujo magnéticos compensados para presencia de magnetita. En la Tabla 1 se pueden observar las mediciones entregadas por el medidor de flujo sonar y cuya precisión fue verificada con aforos de llenado de estanque.



Pump Speed	Test 1 – Flow Rate	Test 2 – Flow Rate	Difference
100%	313.72	313.93	0.07%
88%	263.16	262.84	0.12%

Figura 8: Lectura de flujo en pulpa de magnetita. Tabla 1 Resultados de Reproductividad de Medición de Flujo

Las pruebas de ruido, de reproductividad y de lectura de flujo, tanto en la línea de concentrado final de 4 pulgadas como en la línea de relaves de 24 pulgadas, fueron realizadas para asegurar el desempeño del medidor de flujo sonar. Las pruebas de ruido y de capacidad de repetición estaban dentro del 1%.

Monitoreo de Acústicos para Eventos y Condiciones de Operación

La característica única del medidor sonar de flujo es su capacidad de medir el nivel general de presión de sonido (*SPL*) en la cañería de proceso, lo que puede ser correlacionado con los eventos y condiciones específicas de la operación. La Figura 9 muestra un ejemplo de la detección sonar de movimiento de la válvula utilizada para controlar el flujo en la estación de válvulas en una cañería de 24" de diámetro, en una línea de cañerías de hidrotransporte de pulpa de 56 Km. de largo operada por Anglo Chile, División Los Bronces. El gráfico muestra claramente el aumento significativo en la Presión del Sonido (*SPL*) durante el movimiento de la válvula y las diferencias marcadas entre los dos estados de operación, válvula cerrada (flujo a través del lazo) y válvula abierta (flujo desviándose del lazo). Así, la capacidad de detección sonar puede ser utilizada para detectar el movimiento adecuado de la válvula. De manera similar, la detección sonar puede usarse para detectar otros eventos que producen marcas acústicas importantes como el desprendimiento de la goma interna del revestimiento de la cañería que se atasca en los anillos de "choke" o en las válvulas produciendo gran turbulencia local que puede, rápidamente, causar filtraciones por causa de la alta presión en la línea. La naturaleza no invasiva y la insensibilidad a la presión del flujómetro sonar permitió su instalación en este punto de alta presión (~1,000 psi) sin tener que detener el proceso.

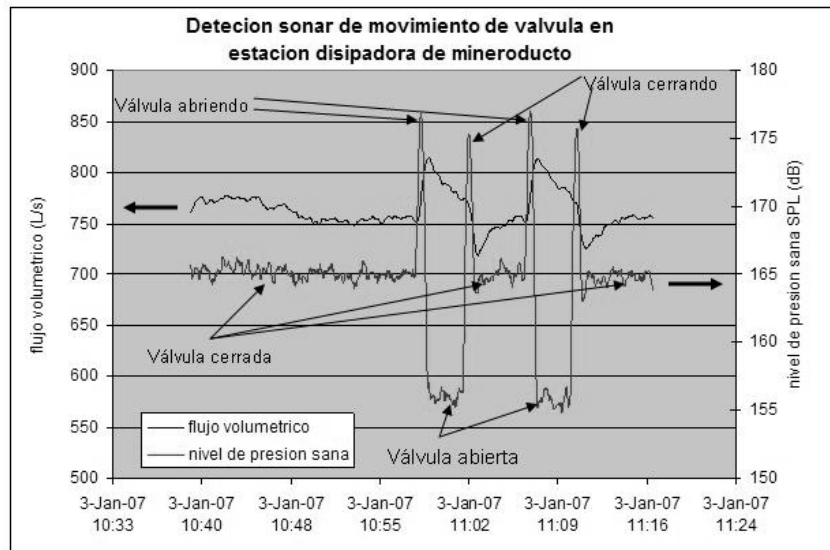


Figura 9: Medición de Niveles de Acústicos para Confirmar el Movimiento y Estado de la Válvula

Detección de Filtración en Mineroductos

El flujómetro sonar está bien equipado para detectar filtraciones en líneas de hidrotransporte de larga distancia. La Figura 10 muestra el desempeño de dos medidores instalados en una cañería de pulpa de 24" y 56 Km. de largo operada por Anglo Chile, División Los Bronces. Se instaló un medidor en cada extremo de la línea de cañerías. El gráfico muestra que existe buena concordancia entre ambos medidores, con una diferencia promedio dentro del +/-1% aproximadamente. La naturaleza no invasiva del medidor permitió que ambos pudieran ser instalados sin detener la operación de la línea. La completa insensibilidad a la presión de la línea, a su vez, permitió que el medidor LT fuera instalado en la entrada de la última estación disipadora de energía, donde la presión de la línea alcanza aproximadamente los 1.000 psi. Los medidores de flujo de tipo invasivo para tales cañerías son caros e implican un riesgo de filtración por alta presión, lo que tiene impacto importante en los costos operacionales y produce daños ambientales. Además, la naturaleza no invasiva del medidor sonar elimina el desgaste por abrasión que puede causar disminución del rendimiento y eventuales fallas en los medidores de flujo del tipo invasivo.

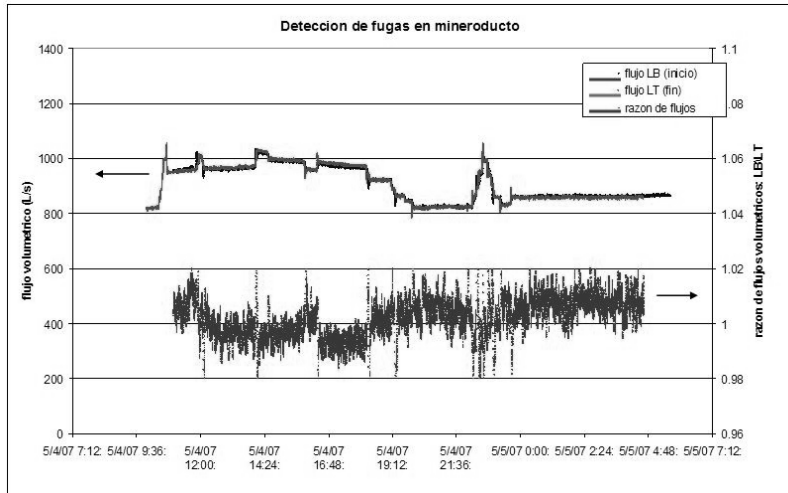


Figure 10: Monitoreo de la filtración de la línea usando dos medidores de flujo con excelente seguimiento de los medidores de flujo en ausencia de filtración

Flujo Volumétrico y Rastreo de Lotes con Medición de Velocidad de Sonido en Tiempo Real

Una capacidad única y distintiva del medidor de flujo sonar es su capacidad de medir la velocidad de sonido en tiempo real en una cañería de proceso. La Figura 11 muestra la medición simultánea del flujo volumétrico y la velocidad del sonido a partir de dos medidores de flujo sonares ubicados a 26 Km. de distancia en una tubería de hidrotransporte de pulpa, operada por Mittal Steel Lázaro Cárdenas, México. Al inicio y al término del período de carga de colada, con tiempos variables de duración en horas y en algunas oportunidades durante la carga misma, se introduce agua durante un período corto. El gráfico muestra un claro cambio en la velocidad del sonido entre el agua y la pulpa, permitiendo la detección de la carga del agua en los dos medidores que tienen un tiempo de tránsito entre ellos de aproximadamente tres horas. La naturaleza no invasiva y la insensibilidad a la presión del flujómetro sonar permitió la instalación de un medidor en un lugar de alta presión (~1,000 psi) en la descarga de una bomba de desplazamiento positivo sin detener el proceso.

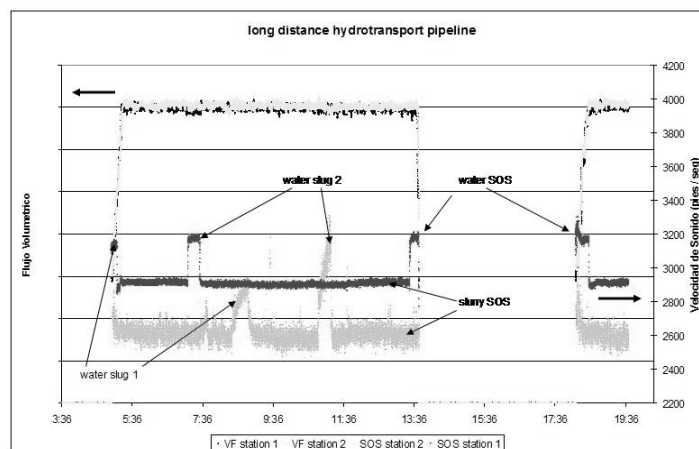


Figura 11: Detección de Bolsas de Agua que separan las cargas de concentrado en la línea de hidrotransporte en dos diferentes ubicaciones en la cañería.

Insensibilidad a los Cambios de Densidad

El medidor de flujo sonar está diseñado para medir flujos de pulpa agresiva con contenidos variables de sólidos. La Figura 12 muestra la medición de flujo volumétrico durante una transición de agua (s.g. = 1) a pulpa pesada (s.g. = 2), mientras la bomba de desplazamiento positivo mantenía una velocidad constante. Durante este período de transición, la desviación estándar de la tasa de flujo volumétrico fue menos del 1% del promedio de la tasa de flujo, así se demuestra la alta insensibilidad a los cambios importantes de densidad.

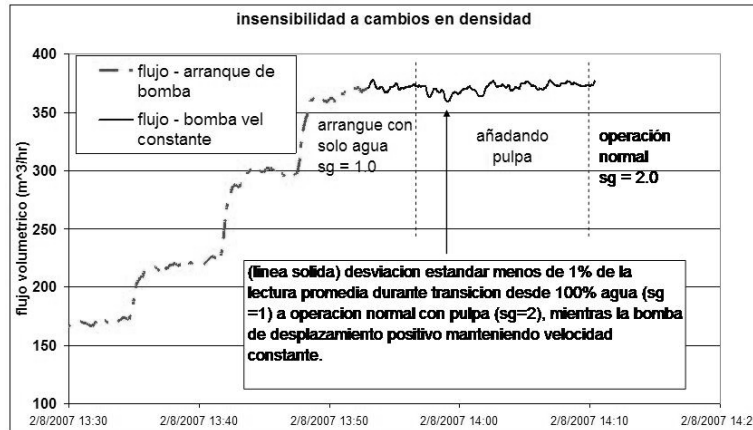


Figura12: Medición de Agua y Pulpa con el mismo medidor y los mismos coeficientes de calibración no muestran cambios en el flujo medido. El uso de una bomba de desplazamiento positivo mantiene la tasa de flujo sin variación

MEDICIÓN DE FRACCIÓN DE VACÍO DE GAS

La misma cabeza de sensor y el mismo transmisor utilizados para medir la tasa de flujo volumétrico se usan para medir la composición del fluido. En el área de aplicación del procesamiento de minerales, esto típicamente implica usar el medidor de flujo sonar para determinar la cantidad de gas arrastrado dentro de la pulpa. En la mayoría de los casos, los ingenieros en las plantas desconocen la cantidad de aire arrastrado dentro de la pulpa de sus procesos. No importa si se ha puesto el mayor cuidado en el diseño de la planta, el aire puede ingresar a la pulpa a través de diversas fuentes, incluyendo filtraciones en el lado de succión de las bombas, bajos niveles en los colectores, descarga a un sump, o desde los hidrociclones y los molinos.

El aire arrastrado puede impactar un proceso causando errores en la calibración de medidores de densidad nuclear y en los medidores de flujo. En algunos casos el aire se inyecta intencionalmente dentro de un proceso para ayudar a la separación de materiales, como ocurre en el proceso de separación de betumen de arena en la industria de arenas asfálticas, o en los sistemas de *sparging* externa en las columnas de flotación. En estos casos es más deseable medir el aire arrastrado o la fracción de vacío de gas para compensar los resultados de los medidores de densidad nuclear y de los medidores de flujo, o bien, para asegurarse de que se está alimentando la cantidad correcta de aire al proceso. En otros procesos, se utilizan antiespumantes para reducir la cantidad de aire arrastrado y su dosificación debe ser controlada por un medidor de fracción de vacío de gas.

En la Figura 9, se entrega un ejemplo de contenido de vacío de gas en una línea de alimentación de hidrociclones de 24". En este caso el cliente desconocía la presencia de aire y por lo tanto los errores resultantes en la calibración del medidor de densidad nuclear y del medidor de flujo. En la Figura 14 se muestran los resultados de usar la medición de la fracción de vacío de gas para corregir la calibración de densidad nuclear. El error en la calibración de la densidad nuclear se reduce en un factor de más de 15 veces.

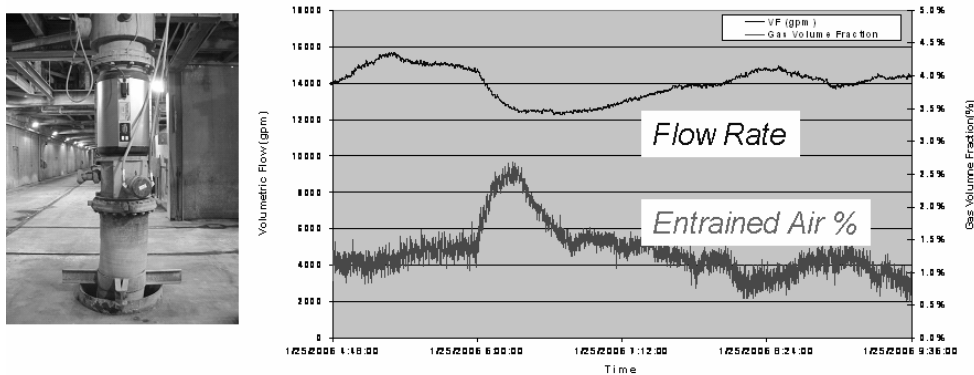


Figura 13: Línea de Alimentación de Hidrociclones - Medición precisa de tasa de flujo y aire arrastrado

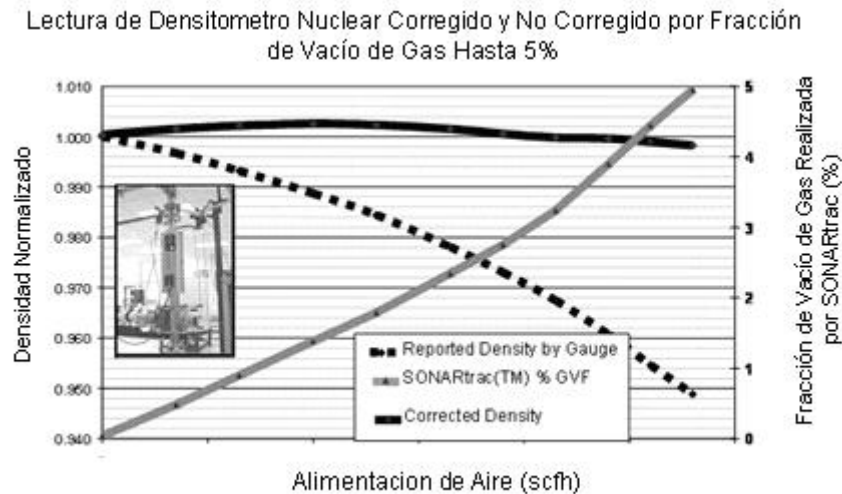


Figura 14: Corrección de la Calibración de la Densidad Nuclear a través de la medición de Fracción de Vacío de Gas realizada con SONARtrac®

MEDICIÓN DE RETENCIÓN DE GAS (GAS HOLDUP)

La retención de gas en un proceso de flotación es uno de los parámetros clave de dispersión utilizados para definir la eficiencia del proceso. La medición de este parámetro, combinado con otros de fácil medición, entrega la información necesaria para tener un control pleno del proceso de flotación. Existía la necesidad de contar con un instrumento robusto, preciso y con bajos

requerimientos de mantención que pudiera proporcionar lectura continua del gas retenido sin recalibración o limpieza.

CiDRA ha modificado su medidor de fracción de vacío de gas sonar para crear una versión sumergible que pueda medir la retención de gas dentro de una columna. La tecnología de medición de retención de gas ha sido probada en varias instalaciones de procesamiento de minerales. Como la acumulación de incrustación no afecta la técnica de medición de arreglo sonar, el medidor de retención de gas ha demostrado ser un instrumento robusto. Su calibración no cambia con el tiempo, ni la temperatura ni la acumulación de incrustaciones.

ARQUITECTURA Y PLATAFORMA ESCALABLE DEL SONARtrac®

La tecnología *SONARtrac*® está basada sobre una arquitectura escalable y sus funciones y desempeño pueden ser expandidos y mejorados a través del desarrollo de algoritmos y configuración de sus componentes. Esta escalabilidad permite la adición de propiedades de medición nuevas e innovadoras que puedan mejorar las mediciones actuales, permitir nuevas funcionalidades y entendimiento dentro del dinámico proceso de los flujos. Algunas de estas nuevas funcionalidades pueden incluir la detección de rocas, elaboración del perfil de velocidad, diagnóstico de maquinarias y monitoreo de movimiento o actividad de válvulas.

RESUMEN

Los instrumentos sonares de medición de aire arrastrado y flujo constituyen una nueva clase de analizadores de composición y flujo para uso industrial que ha impulsado por más de 60 años el desarrollo y uso de la tecnología SONAR. Los medidores sonares de flujo se instalan en todo el mundo en muchas aplicaciones industriales y se ajustan idealmente a una amplio rango de aplicaciones en el procesamiento de minerales permitiendo una nueva forma de entender la medición y entregando valores de esas mediciones que resultan cuantificables para los operadores.

Tabla 2 Comparación de Tecnología Conventional con Medidor Sonar de Flujo en el Procesamiento de Minerales

Característica	Tecnología de Flujo SONARtrac®	Medidor Electromagnético	Ultrasonido	Placa/Orificio Venturi
Principio de Medición	Procesamiento Arreglo SONAR Pasivo	Ley de Faraday	Tiempo de Tránsito, Doppler	Presión Diferencial
Sistema de abrazadera Instalación Sin Detención del Proceso	Sí	No	Sí	No
Amplia Aplicabilidad en Materiales Abrasivos/Corrosivos	Sí	No	Limitado	No
Medición Directa de Velocidad	Sí	Sí	Sí	No
Inmune a Degradación por Desgaste	Sí	No	Sí	No
Requerimientos de Mantenimiento Reducidos /Mínimos	Sí	No	No	No
Medición de Aire Arrastrado en la Pulpa o Fluido	Sí	No	No	No
Opera con Cañerías Revestidas o con Acumulación de Incrustación	Sí	Se desgasta con incrustación	No	Se desgasta con incrustación

La tecnología sonar de abrazadera del *SONARtrac®* constituye una plataforma escalable que es más que una simple tecnología de medición de flujo. Tiene la habilidad y la capacidad de entregar diversas mediciones de valor agregado y otra información del proceso como velocidad del sonido, aire/gas arrastrado, retención de gas, perfil de velocidad y otras características del proceso.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos en forma especial a las personas que participaron en este trabajo:

- Armando Schneidewind, Ing. Especialista, Senior Sistemas, Antofagasta Minerals, Minera Los Pelambres, Chile
- Ing. Orlando Chaparro Anguiano, Jefe del Dept. Electrónica y Control, Planta Peletizadora; y Ing. José Cruz Saenz Alvarado, Jefe Dep. Electrónico, Planta Concentradora, Mittal Steel Lázaro Cárdenas, México.