

NUEVA TECNOLOGÍA PASIVA PARA MEDICIÓN DE AIRE ARRASTRADO EN CAÑERÍAS Y RETENCIÓN DE GAS EN CELDAS DE COLUMNA

*Christian O'Keefe, CiDRA Corp., Wallingford,
CT*

Extracto

Por años las mediciones de la cantidad de aire arrastrado dentro de los procesos han constituido un desafío para el desarrollo de la instrumentación. Esto resulta particularmente verdadero en el tan único y complejo ambiente operacional y las aplicaciones relacionadas con el procesamiento de minerales. En las aplicaciones de procesamiento de minerales, el aire arrastrado juega un papel importante en los errores que se detectan dentro de las mediciones realizadas por los medidores nucleares de densidad y en la eficiencia del bombeo. También resulta ser un componente importante de los procesos de flotación. La medición de la cantidad de aire arrastrado, conocida como la fracción vacía de gas, puede realizarse desde el exterior de una cañería de proceso a través de la tecnología basada en un arreglo sonar pasivo que ha desarrollado y patentado CiDRA. Dentro de las celdas de columna, la necesidad de contar con una medición de aire arrastrado, también conocido como retención de gas, medición que fuera robusta, sin necesidad de mantenimiento y precisa, ha llevado a la creación de la versión sumergible de esta tecnología.

La tecnología del medidor de CiDRA calcula la fracción vacía de gas midiendo en primer lugar la velocidad a la que el sonido natural que se produce en la pulpa del proceso se propaga a través de un arreglo axial de sensores. Estos sensores están incorporados en una banda que se enrolla alrededor del exterior de la cañería, eliminándose así las interrupciones de proceso para la preparación de la instalación y asegurando una confiabilidad sin precedentes. Una relación ya conocida entre esta velocidad de sonido y el aire arrastrado capturado en forma de burbujas dentro de la pulpa es aplica entonces al medidor CiDRA para calcular la fracción vacía de gas. Este documento presentará la tecnología de medición, su operación, calibración y

Robert Maron, CiDRA Corp., Wallingford, CT

Paul Rothman, CiDRA Corp., Wallingford, CT

*Joseph Poplawski, CiDRA Corp., Wallingford,
CT*

aplicación en diversas situaciones de medición de fracción vacía de gas y retención de gas como las que se producen en las eficiencias de bombeo, operación de hidrociclones, rociado externo y celdas de columna.

Introducción

La industria de procesamiento de minerales enfrenta diversas condiciones y ambientes de control de proceso únicas y llenas de desafíos. En términos de medición de composición de fluidos, muchas de estas situaciones no están siendo adecuadamente cubiertas por las técnicas tradicionales de muestreo, particularmente por causa de la ineficiencia y costo de los métodos manuales. Se ha desarrollado una nueva clase de instrumentación que resuelve estos problemas de medición tan particulares. Esta nueva tecnología utiliza algoritmos de proceso sonares y un arreglo de sensores pasivos para medir no sólo la composición del fluido a ciertos niveles de aire arrastrado, sino también el flujo. La medición resulta precisa, confiable y sin necesidad de hacer contacto con el fluido. Estas mediciones se realizan en prácticamente todo tipo de fluido dentro de prácticamente cualquier tipo de cañería o dentro de celdas de columna.

Principio de Operación

Los medidores de flujo basados en un arreglo sonar resultan ideales para rastrear y medir las velocidades promedio de las alteraciones 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. Para calcular la cantidad de aire

arrastrado, primero debemos medir la velocidad de las ondas acústicas que se generan naturalmente y se propagan en el fluido o pulpa. Una medición precisa de esta velocidad junto con algunas otras mediciones del proceso, en particular la presión, producirán un cálculo exacto del aire arrastrado o la fracción vacía de gas.

Medición de Ondas Acústicas a través del Arreglo de Sensores

En la mayoría de las aplicaciones en el procesamiento de minerales existe abundancia de ondas acústicas que se propagan dentro de las cañerías o columnas de flotación. Estas ondas acústicas son naturalmente generadas a partir de diferentes fuentes, incluyendo las bombas, los dispositivos atravesados por flujo y los cambios de geometría de la cañería de circulación. Incluso las burbujas dentro del fluido generarán ondas acústicas a través de sus oscilaciones naturales. Estas ondas acústicas son de baja frecuencia (en el rango audible) y circulan en dirección axial en la cañería con longitudes de onda mucho mayores que las burbujas de aire arrastrado. En la **Figura 1** se muestra una ilustración de estas ondas acústicas en una cañería y, como se puede observar, pueden propagarse en cualquier dirección, en forma descendente por la cañería o en ambas direcciones.

A través de la combinación de un arreglo pasivo de sensores y el arreglo sonar que procesa algoritmos, se obtienen las velocidades axiales promedio de un grupo de ondas acústicas. La secuencia de eventos que se produce para que esta medición sea posible es la siguiente:

- Las ondas acústicas son ondas de presión que se desplazan, introduciendo cambios localizados de presión en el interior de las paredes de la cañería durante su ciclo, desde la compresión a la rarefacción y de retorno.
- Este pequeño cambio de presión resulta en una presión dinámica de la pared misma (Figura 1 aumentada)
- 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 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.
- La señal eléctrica de cada elemento sensor es interpretada como una marca característica de los

componentes de frecuencia y fase de las ondas acústicas bajo el sensor.

- Un arreglo de algoritmos de proceso combina la información de fase y frecuencia de la característica de los elementos del grupo sensor para calcular la velocidad de la marca característica anterior cuando se propaga bajo el arreglo de sensores.

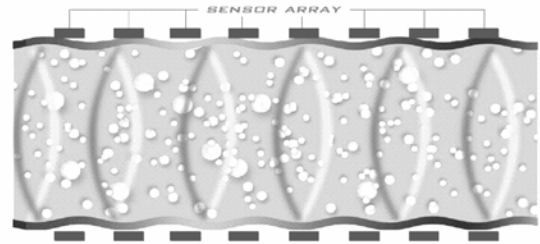


Figura 1 Ilustración de ondas producidas en forma natural en una cañería y que se propagan bajo los sensores de arreglo sonar

Visto de manera práctica, los desafíos para realizar esta medición son muchos. Entre ellos está el desafío de operar en un ambiente donde existen señales generadas por el flujo y vibraciones de cañería, donde estas últimas pueden causar grandes presiones dinámicas sobre la cañería. El impacto de estos efectos es que la presión dinámica causada por las ondas acústicas generalmente será mucho menor que la presión dinámica proveniente de las vibraciones de la cañería. La fortaleza en el arreglo que procesa algoritmos es su habilidad para aislar y medir las velocidades de estos diferentes componentes, permitiendo así una medición precisa de la velocidad acústica.

La tecnología es aplicable a la generación de un indicador de robustez de medición, conocido también como factor de calidad. En el algoritmo de proceso sonar ese factor de calidad puede ser generado al comparar la fortaleza de la señal proveniente de la onda acústica contra los niveles de energía de respaldo. Un factor de calidad que va de 0 a 1,0 se genera, con una medición que proporciona un factor de calidad por sobre 0,1 a 0,2 (dependiendo de la aplicación), con la confianza de que está realizando una buena medición. La tecnología se puede aplicar a la medición en prácticamente cualquier tipo o tamaño de cañería.

El fluido en el que estas ondas acústicas se propagan puede ser de fases múltiples o de fase única de múltiples componentes. En un fluido de fase única de múltiples componentes, 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 (volumen promedio de velocidad). La velocidad acústica resultante c_M puede estar dada por:

$$c_M = \phi_1 c_1 + \phi_2 c_2 \quad (\text{Wang y Nur 1991})$$

donde $\phi_{1,2}$ son las fracciones de volumen de fase

$c_{1,2}$ son las velocidades acústicas de las fases

Usando $\phi_2=1-\phi_1$ esto puede quedar de la siguiente manera:

$$\phi_1 = \frac{c_M - c_2}{c_1 - c_2}$$

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 de gas) cuando hay gas en la forma de burbujas que están bien mezcladas dentro del líquido o pulpa.

Dado que las longitudes de onda de las ondas acústicas son mucho mayores que el tamaño de la burbuja, se produce una relación compleja que transforma la velocidad acústica en una función de la fracción vacía de gas. La velocidad del sonido es proporcional a la raíz cuadrada de la razón de la compresibilidad y la densidad ambas de las cuales resultan muy influenciadas por el contenido de aire. En la **Figura 2** se muestra un ejemplo de la relación resultante.

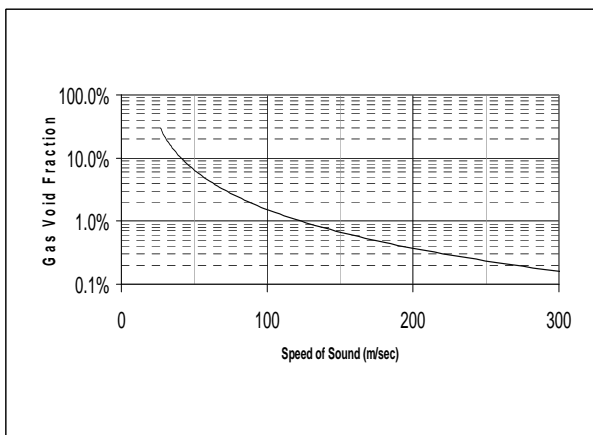


Figura 2 Ejemplo de una relación entre fracción vacía de gas y velocidad del sonido

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 del medidor nuclear de densidad, para la corrección del medidor de flujo en la obtención del volumen real de flujo, diagnóstico de problemas de bombeo, detección de intermitencia y en aplicaciones de inyección de aire. Está siendo utilizado con éxito en las aplicaciones con aire arrastrado, en rangos que van de 0,01% a 20% de fracción vacía de gas con una precisión del 5% en la lectura.

Implementación de Tecnología

La implementación de la medición de fracción vacía de gas ha tomado lugar en dos formas: Instrumentación externa a la cañería e instrumentación interna en la columna de flotación. La instrumentación externa usa los mismos componentes de la cabeza del sensor que el instrumento del flujómetro volumétrico. En las **Figuras 3** y **4** se muestran fotos de los medidores y los procedimientos de instalación de la instrumentación externa.

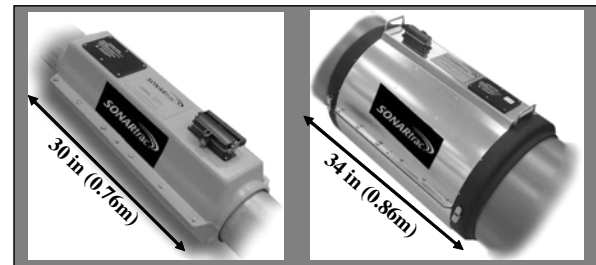


Figura 3 Fotos de los medidores externos de fracción vacía de gas para instalar en el exterior de las cañerías. Izquierda - Para cañerías de hasta 16 pulgadas. Derecha - Para cañerías de 18 pulgadas y más.

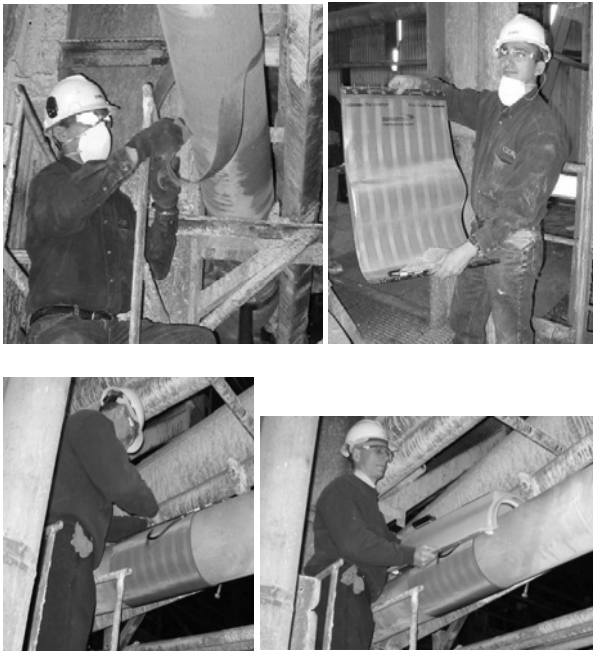


Figura 4 Procedimiento de instalación para medidor de fracción vacía de gas montado externamente

Para la medición de la fracción vacía de gas, comúnmente conocida como retención de gas, dentro de una celda de columna, se creó una versión sumergible del instrumento. Este instrumento, conocido como medidor de retención de gas, está compuesto del arreglo de sensor instalado sobre una cañería de cuatro pulgadas de diámetro y una cubierta que no deja filtrar líquidos, especialmente diseñada para soportar muchos años de servicio en una celda de columna. En la Figura 5 se muestra una foto de la cabeza del sensor de retención de gas. El diseño, junto con la orientación vertical del medidor, permite que las burbujas ingresen al fondo de la cañería y pasen a través de ella. El medidor puede ser movido alrededor de la columna, o bien, puede ser instalado para que quede fijo en forma permanente.

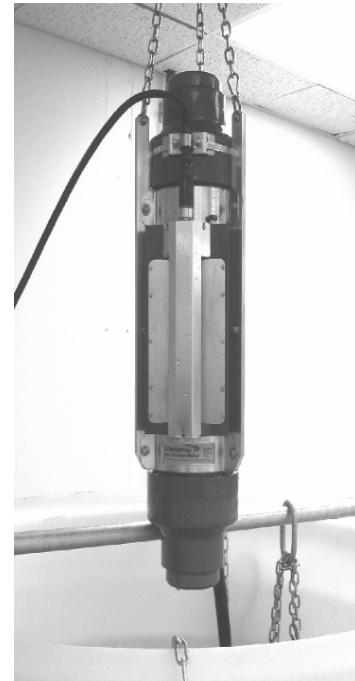


Figura 5 Foto de la cabeza del sensor del medidor de retención de gas para aplicación sumergible en celdas de columna

Calibración y Mantenición

Dado que la medición de la velocidad acústica y su calibración no dependen de los valores absolutos de ninguna señal análoga, no se alterarán con el tiempo o la temperatura. La diferencia de mantención de la calibración de medidor a medidor y con respecto de los efectos de la temperatura y el tiempo de uso, dependerán de la conservación del 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. En la **Figura 6** se muestran fotos de la liviana banda del sensor.



Figura 6 Fotos de la banda del sensor con elementos de sensor

La estabilidad del reloj supera el 0,01% y por lo tanto es 50 veces mejor que la necesaria para mantener la precisión típica del medidor. Como resultado, el impacto de la estabilidad del reloj no puede ser negado.

La precisión de la fracción vacía de gas derivada de la medición de la velocidad acústica ha sido verificada a través de una variedad de medios, incluyendo mediciones de presión diferencial y cambios volumétricos de la mezcla.



Figura 7 Fijación de calibración de celda mini-columna

La calibración del instrumento de medición de fracción vacía de gas instalado en forma externa se realizó montando la cabeza del sensor en una cañería de PVC orientada verticalmente con respecto de la cañería. Se usaron rociadores en el fondo de la cañería para agregar aire a la columna, mientras se utilizó una combinación de las mediciones de desplazamiento y presión diferencial para verificar el desempeño de la tecnología de fracción vacía de gas. En la **Figura 8** se muestran los resultados de tres pruebas realizadas utilizando mediciones de presión diferencial. En esa figura la fracción vacía de gas fue mantenida en valores generalmente observados dentro de las cañerías y como se puede apreciar en el gráfico, la repetibilidad y precisión fueron muy buenas.

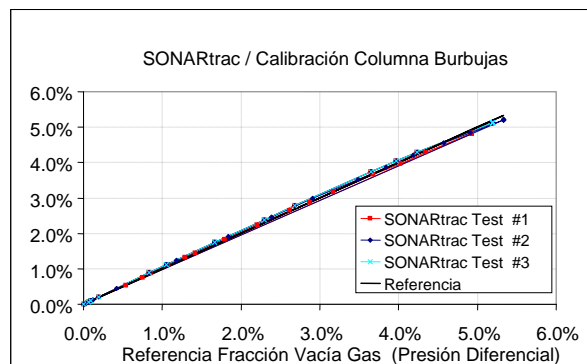


Figura 8 Resultados de prueba de verificación del medidor de fracción vacía de gas en columna de calibración

Medición de Fracción Vacía de Gas (Aire Arrastrado) y Retención de Gas

En el área de aplicación del procesamiento de minerales, la medición de composición del fluido 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 de planta desconocen la cantidad de aire arrastrado dentro de la pulpa. 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 dentro de un depósito o desde los hidrociclones y los molinos.

El aire arrastrado puede impactar un proceso causando errores en la medición realizada por los medidores nucleares de densidad y los medidores de flujo. También puede impactar la operación y vida útil de las bombas. En otros casos el aire arrastrado resulta beneficioso y es intencionalmente inyectado dentro de una cañería para ayudar a la separación de materiales, como ocurre en el proceso del betumen y la arena en la industria de arenas asfálticas, o los metales del mineral a través de sistemas de dispersión externa en una columna de flotación. En todos estos casos es necesario medir la cantidad de aire arrastrado o la fracción vacía de gas. En algunos de estos procesos, la cantidad de aire arrastrado es controlada con antiespumantes, por lo que el uso de un medidor de fracción vacía de gas se hace necesario para controlar adecuadamente la dosificación del agente antiespumante, de modo de asegurar así la reducción de burbujas de aire y, a su vez, ahorrar dinero.

Al variar, e incluso moderar, los niveles de aire arrastrado en la pulpa, los flujómetros de generación

anterior, incluyendo Coriolis, medidores electromagnéticos y de ultrasonido, resultan adversamente afectados por la presencia de este aire. Como mínimo causará la imposibilidad de entregar el valor real del flujo de líquido o pulpa, mientras que en muchos otros casos el aire arrastrado provocará un gran aumento del ruido del flujómetro o una pérdida total de lecturas de flujo. La habilidad de la tecnología basada en arreglo sonar para medir el flujo en presencia de altos niveles de aire arrastrado, así como también el nivel de aire arrastrado, permiten un mejor control del proceso. Los medidores nucleares de densidad y los Coriolis también serán impactados en forma perjudicial cuando se usan para medir densidad en presencia de aire arrastrado. En resumen, es necesario medir el aire arrastrado o la fracción vacía de gas para compensar los resultados de los medidores nucleares de densidad y los flujómetros para operar las bombas en forma más eficiente y con desgaste reducido; para dosificar adecuadamente los antiespumantes o para asegurarse de que se está inyectando la cantidad correcta de aire al proceso. En las siguientes secciones se detallan algunas de estas situaciones relacionadas con aire arrastrado y el uso de tecnología basada en arreglo sonar para resolver los problemas de medición y control, ejecutando simultáneamente mediciones de flujo y aire arrastrado.

Medición de Aire Arrastrado dentro de la Pulpa en las Líneas de Alimentación de los Hidrociclones

En la **Figura 9** se entrega un ejemplo de medición de contenido de flujo y 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, también desconocía los errores resultantes en el medidor nuclear de densidad y en el medidor de flujo.

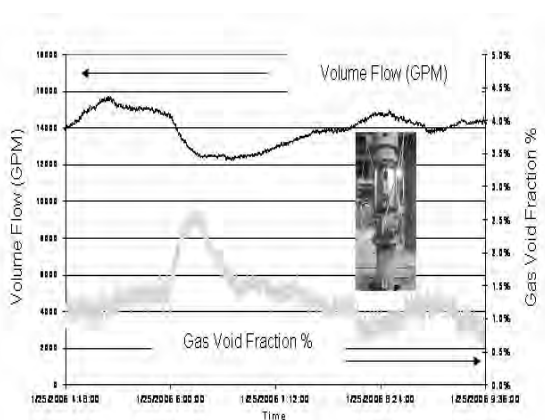


Figura 9 Flujo y fracción vacía de gas en una línea de alimentación de hidrociclones

Los beneficios de conocer la fracción vacía de gas en una línea de alimentación de hidrociclones incluyen la determinación de la tasa de flujo volumétrico real, la habilidad de ajustar una condición de alarma si el contenido de aire aumenta demasiado y, más importante aun, corregir el medidor nuclear de densidad. Dado que uno de los parámetros fundamentales para la clasificación a partir de los hidrociclones es la gravedad específica de la pulpa, este parámetro debe ser medido con precisión y cualquier error en esta medición debe ser corregido.

Corrección del Medidor Nuclear de Densidad por Presencia de Aire Arrastrado

La presencia de aire arrastrado o contenido de vacío de gas reducirá directamente la gravedad específica informada por el medidor nuclear de densidad. Para poder obtener la medición correcta de densidad de la pulpa misma, la fracción vacía de gas debe ser medida y utilizada como un factor de corrección. Para validar esto hicimos una prueba en la que diversos niveles de aire fueron introducidos en un flujo provisto de medidor nuclear de densidad. Como se esperaba, cuando se aumentaba la tasa de inyección de aire, mostrada como el valor estándar de pies cúbicos por hora (SCFH) en la **Figura 10**, el resultado disminuía en 5%, como se observa en la línea continua más clara. El flujómetro basado en arreglo sonar en la misma línea medía con precisión el aumento de 5% de contenido de aire resultante, como se observa en la línea punteada. Utilizando esta medición, aplicamos una simple corrección lineal al medidor nuclear de densidad para reducir el error de 5% a $\pm 0,25\%$. Nuestra experiencia ha mostrado que el contenido de aire arrastrado en las líneas de alimentación de hidrociclones puede variar dramáticamente hasta un 5% con el correspondiente impacto en la clasificación d_{50} .

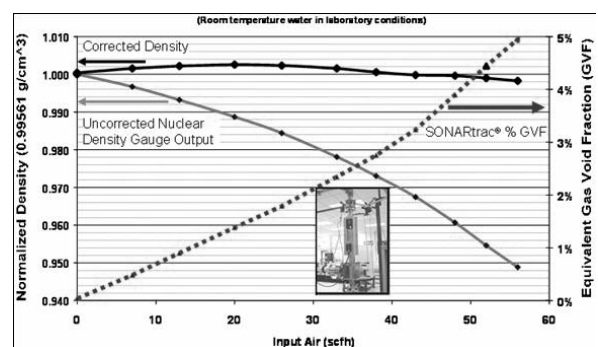


Figura 10 Corrección al medidor nuclear de densidad utilizando un flujómetro basado en arreglo sonar

Estudio de Caso de Medición de Flujo y Aire Arrastrado en Kemess Mill

Northgate Minerals utiliza tecnología basada en arreglo sonar desarrollada por CiDRA Corporation (SONARtrac®) no sólo para medir flujos de concentrado en bruto y la alimentación a las columnas de flotación en la mina Kemess en British Columbia, Canadá, como se muestra en la **Figura 11**, sino también el nivel de aire arrastrado. La tecnología no invasiva mide estas pulpas abrasivas con mucha precisión y sin períodos de detención de proceso gracias a que por su diseño no invasivo el medidor de flujo no requiere mantención.

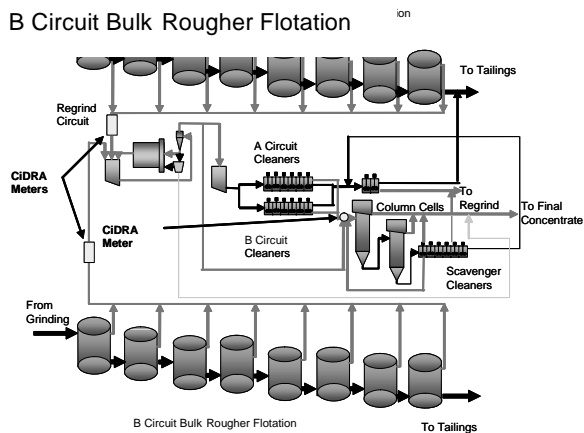


Figura 11 Hoja de Flujo de Kemess Mills mostrando la ubicación de tres medidores de flujo (CiDRA) con tecnología basada en arreglo sonar

Kemess usa la capacidad de medición de la fracción vacía de gas del medidor de arreglo sonar como una herramienta para monitorear aumentos de aire en estas líneas. El incremento de aire causará ineficiencias en la bomba y podría provocar daño de la misma por causa de las cavitaciones. Cuando se sabe el volumen de aire arrastrado se puede entregar la tasa de flujo volumétrico y proporcionar al operador otra herramienta para el control del proceso. En la siguiente figura el aumento de aire arrastrado de aproximadamente 6% a 8% coincide con la disminución de flujo de ~2300 GPM a ~1900 GPM. Esto puede indicar que el aumento de aire arrastrado impacta la operación de la bomba y alerta al operador de una condición que necesita atención.

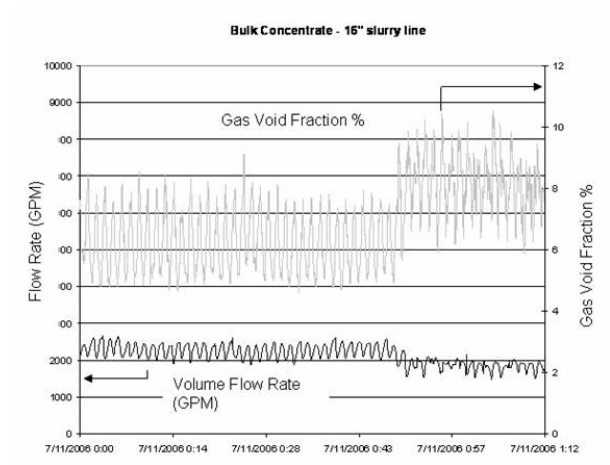


Figura 12 Mediciones de flujo y aire arrastrado (Fracción Vacía de Gas %) muestran el impacto de la presencia de aire en la tasa de flujo

Los niveles de aire arrastrado varían de 8% a 0,1% en las líneas de alimentación de flotación, como se observa en la **Figura 13**. La capacidad de la tecnología basada en arreglo sonar para medir flujos con gran cantidad de aire arrastrado sobre las variables condiciones, mejora la precisión y confiabilidad de la medición de flujo. Es posible que al variar el contenido de aire en la alimentación se afecte la retención de gas dentro del proceso de flotación en sí.

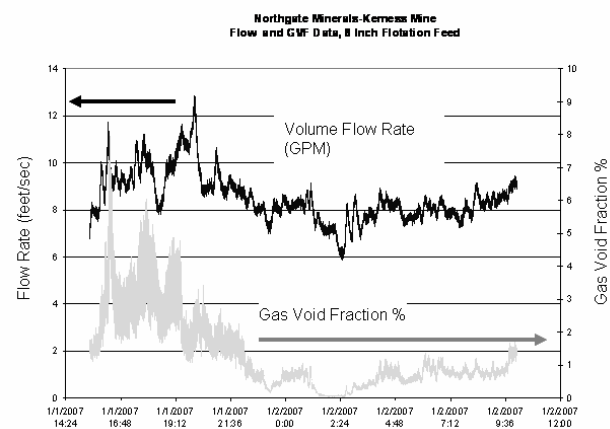


Figura 13 Línea de alimentación de flotación y niveles variables de aire medidos por instrumentación basada en arreglo sonar

Estudio de Caso: Flujo Volumétrico y Medición de Aire Arrastrado en Líneas de Rebalse de Flotación con Alto Contenido de Aire en Instalación en Newmont

El proceso de flotación, por su mismísima naturaleza, siempre introducirá grandes cantidades de aire dentro de la línea de rebalse. La cantidad de aire puede cambiar en forma dramática dependiendo de las condiciones de operación, haciendo por lo tanto muy difícil determinar la tasa real de flujo de pulpa. Se utilizó un flujómetro basado en arreglo sonar en esta aplicación para realizar una medición robusta de la cantidad de aire arrastrado (fracción vacía de gas %), así como también para medir la tasa de flujo. Esto queda ilustrado en la **Figura 14**.

En este caso se pudo observar el impacto en la eficiencia del bombeo. A partir de los datos obtenidos se puede ver que la cantidad de aire cambió significativamente. Esto ocurrió durante períodos de altas velocidades de bombeo, incluso con niveles constantes en el depósito. La correspondiente caída en la tasa de flujo se explica por el aumento del aire arrastrado que, a su vez, afectó la eficiencia del bombeo.

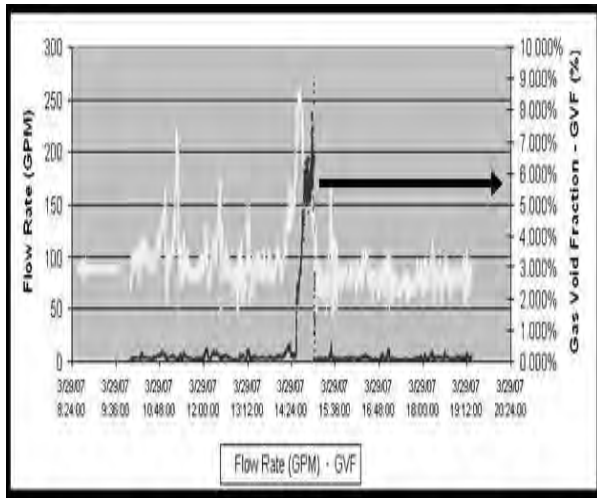


Figura 14 Solución a los problemas en la medición de flujo y fracción vacía de gas en un circuito de rebalse de flotación. El efecto en la eficiencia del bombeo y la resultante caída en la tasa de flujo puede ahora ser determinada por la medición de la fracción vacía de gas (aire arrastrado).

Medición de Flujo de Pulpas de Forma Precisa y No Invasiva usando Gas Intermitente

Muchos procesos industriales transportan pulpas calientes de una y dos fases (sólido y líquido) de una etapa del proceso a otra. En muchos casos la presión de la línea varía como función de una contrapresión o el nivel de un depósito colector. Si la pulpa contiene gases

disueltos habrá condiciones donde el gas saldrá de la solución y resultará arrastrado. Los dispositivos tradicionales de medición en línea no contabilizan este gas arrastrado e informarán, por lo tanto, lecturas erróneas del flujo durante estos eventos, ya sean temporales o prolongados. Los aparatos que usan revestimientos a base de polímeros pueden resultar dañados por problemas de difusión de gas donde los revestimientos se desprenden del tubo de medición y se separan del aparato. El medidor sonar no es afectado por el gas arrastrado. De hecho, el dispositivo puede medir la cantidad de gas arrastrado. Esta medición, entonces, puede ser usada para corregir la lectura de flujo por los vacíos causados por el gas. También puede utilizarse para ajustar otros parámetros del sistema tales como velocidad de bomba o niveles de depósitos, para poder eliminar el evento de liberación de gas. La **Figura 15** muestra un ejemplo de datos recopilados en una refinería de alúmina. Existe un período de aproximadamente ocho minutos en que la fracción de gas por volumen aumenta de 0% a 14% y entonces vuelve a aproximadamente 1%.

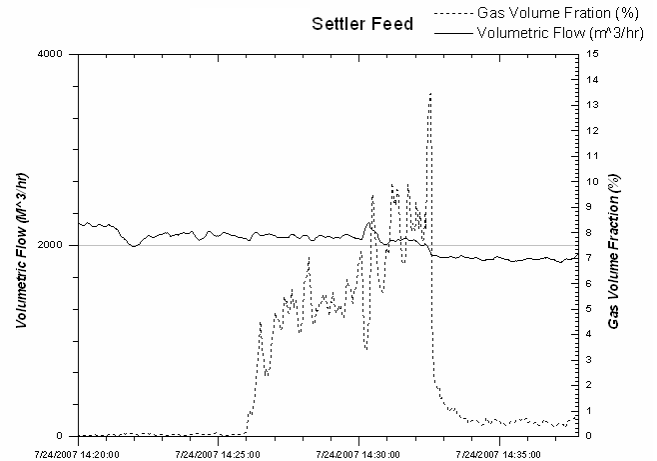


Figura 15 Evidencia de intermitencia en el proceso de alúmina

Seguimiento de Colada/Carga 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 16** 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 cañería de hidrotransporte de pulpa. 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 alta presión (~1,000 psi) en la descarga de una bomba de gran desplazamiento positivo sin detener el proceso.

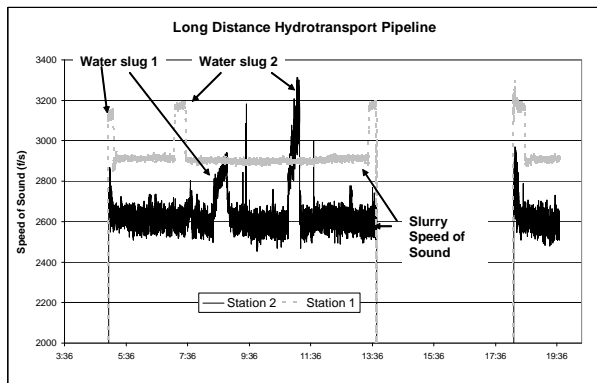


Figura 16 Detección de bolsas de agua que separan las cargas de concentrado en la línea de hidrotransporte en dos diferentes puntos en la cañería.

Resumen

Los instrumentos de arreglo sonar para la medición de flujo y de aire arrastrado 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 basados en arreglo sonar se instalan en todo el mundo en muchas aplicaciones industriales y se ajustan idealmente a un amplio rango de aplicaciones en el procesamiento de minerales, permitiendo una nueva forma de ver la medición y entregando valores de esas mediciones que resultan cuantificables para los operadores. Además de realizar mediciones de flujo, esta tecnología tiene la capacidad de medir la velocidad del sonido y así entregar una lectura cuantificable de la fracción vacía de gas o retención de gas, así como también otras indicaciones de la composición del fluido.

Agradecimientos

Los autores desean agradecer a nuestros clientes por adoptar los medidores de flujo y proceso de

SONARtrac® y proporcionarnos información y apoyo. Particularmente para este documento, agradecemos a Newmont Gold y Kemess Mine. Los autores también desean agradecer el trabajo realizado por los miembros del grupo de procesamiento de minerales de CiDRA, incluyendo a Tim Griffin por analizar los datos y realizar las pruebas de medición nuclear de densidad.

Referencias

Wang, Z., y Nur, A., "Ultrasonic velocities in pure hydrocarbons and mixtures" ("Velocidades de ultrasonido en hidrocarburos puros y mezclas") J. Acoust.Soc.Am., **89**, 2725-2730, 1991