

APLICACIÓN DE TECNOLOGÍA SONAR NO INVASIVA EN LA MEDICIÓN Y CONTROL DE FLUJOS EN PLANTAS DE PROCESAMIENTO DE MINERALES

Robert J. Maron¹ and Christian O'Keefe²

CiDRA Corp
50 Barnes Park North
Wallingford, CT 06492 USA
1-203-265-0035

¹Director, Desarrollo de Negocios e Ingeniería de Soporte, Latinoamérica, rmaron@cidra.com, Tel. 203-626-3354

²Director, Desarrollo de Negocios Regionales e Ingeniería de Aplicaciones - Procesamiento de Minerales, cokeefe@cidra.com, Tel. 203-626,3393

RESUMEN

En esta presentación se describirá la plataforma de tecnología patentada por CiDRA y sus aplicaciones. La tecnología no invasiva de medición de flujo desarrollada por CiDRA y concebida sobre un diseño de arreglo sonar, entrega la tasa volumétrica de fluidos de fases únicas o múltiples al medir la velocidad a la que naturalmente ocurren estructuras conocidas como remolinos turbulentos o las variaciones de densidad convectan con el flujo al pasar por 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. El resultado de esta tecnología es una capacidad única de medir la tasa de flujo en la mayoría de los flujos - líquidos limpios, pulpas con alto contenido de sólidos, pastas y líquidos y pulpas con aire arrastrado. Se describirán problemas de medición de flujo de procesamiento de minerales únicos y complicados y las soluciones adoptadas en pulpas con alto contenido de sólidos abrasivos, pastas y líquidos y pulpas con aire arrastrado. Estas aplicaciones se pueden encontrar en plantas concentradoras, líneas de hidrotransporte y líneas de relaves.

También se presentarán los recientes desarrollos para hacer extensiva esta tecnología a la solución de otros problemas muy particulares que se presentan en las mediciones en el procesamiento de minerales. Las aplicaciones que se describirán incluyen, desarrollo no invasivo de perfil de velocidad de pulpa y detección de presencia de arenas con la que se utilizará la capacidad única de medir velocidades localizadas dentro una cañería que transporta pulpa, detección de movimiento de válvula que hará uso de la capacidad única para medir la frecuencia general de ciertos niveles de sonido dentro de una cañería de proceso para permitir monitoreo acústico.

INTRODUCCIÓN

La industria de procesamiento de minerales enfrenta diversas condiciones y ambientes de medición y control en el proceso que son únicas y llenas de desafíos. Con respecto de la medición de flujo, muchas de estas aplicaciones no están siendo bien cubiertas por las tecnologías tradicionales de medición de flujo tales como los medidores de ultrasonido, los electromagnéticos, de turbinas, de vórtice, Coriolis, Venturi y placas de orificio. Para cubrir estas necesidades no resueltas se ha desarrollado una nueva clase tecnología de flujómetro que opera bien en la mayoría de estas situaciones tan particulares y resuelve muchos de los problemas de medición de flujo. Esta nueva clase de tecnología de medición de flujo utiliza un arreglo de sensores pasivos y algoritmos¹ de proceso sonares para medir no sólo el flujo sino también la composición del fluido. La medición resulta precisa, confiable y sin necesidad de hacer contacto con el fluido. Estas mediciones se pueden realizar en prácticamente todo tipo de fluido y en cañerías de prácticamente cualquier tipo de material.

PRINCIPIO DE OPERACIÓN

Los medidores de flujo basados en arreglos sonares rastrean y miden las velocidades promedio de las alteraciones coherentes que se desplazan en dirección axial de una cañería. Estas alteraciones pueden tomar diferentes formas y propagarse a diferentes velocidades. Su método de propagación y velocidades incluyen la convección con el flujo (la menor velocidad), propagación en el fluido o pulpa (velocidad de rango medio) y propagación en las paredes de la cañería (la mayor velocidad). Los medidores con arreglo sonar separan los tres modos de propagación principal a través de una combinación de diferencias de velocidad y frecuencia. Primero enfoquémonos en las interferencias que convectan con el flujo. Estas interferencias o alteraciones pueden corresponder a remolinos turbulentos, variaciones de densidad, variaciones de temperatura u otros fenómenos. Dentro de la mayoría de los procesos industriales corresponderán a remolinos turbulentos en el caso de flujos turbulentos y variaciones de densidad en el caso de flujos anulares de núcleo. Cualquiera de estos tipos proporciona un excelente medio para medir las tasas de flujo.

Medición de Velocidad de Flujo Utilizando Remolinos Turbulentos

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 flujo². En la Figura 1 se puede observar una ilustración de estos remolinos turbulentos. Estos remolinos turbulentos se crean continuamente. Una vez creados, los remolinos se disgregan en cada vez más pequeños vórtices hasta que se transforman en lo suficientemente diminutos para disiparse en forma de calor a través de los efectos viscosos del fluido. En diferentes diámetros de cañerías de flujo descendente estos vórtices permanecen coherentes y retienen su estructura y tamaño antes de disgregarse en vórtices menores. Los vórtices en una cañería tienen un amplio rango de tamaños que están limitados por el diámetro de la cañería en los más grandes, y por las fuerzas de la viscosidad en los vórtices más pequeños. 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. El perfil de flujo en sí mismo corresponde a una velocidad axial del flujo promediada por tiempo y que está en función de la posición radial en la cañería con flujo cero en la pared de la cañería y el flujo máximo en el centro, como se muestra en la Figura 1. En un flujo turbulento, la velocidad axial aumenta rápidamente al moverse en dirección radial alejándose de la pared y rápidamente ingresa a una región con un perfil de velocidad axial

promediada por tiempo con variación muy lenta. 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.

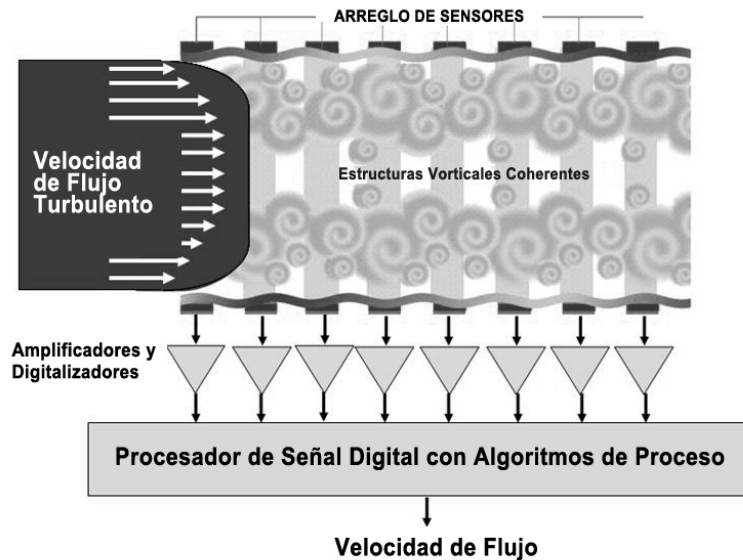


Figura 1 Diagrama de cañería con flujo turbulento mostrando perfil de flujo completamente desarrollado y remolinos turbulentos

Medición de Velocidad de Flujo Utilizando Variaciones de Densidad en Pulpas y Pastas

Las pulpas con alto contenido volumétrico de sólidos tienen viscosidades lo suficientemente altas como para disipar rápidamente los remolinos turbulentos que pudieran formarse. Afortunadamente, muchas de estas pulpas son no-Newtonianas y disminuyen su viscosidad en la medida que el fluido se somete a tensión. Esto resulta en un núcleo de partículas de cuarzo con velocidad de asentamiento cero o baja por causa de la tasa de cizallamiento existente en el centro de la cañería que provoca a su vez una alta viscosidad en la zona. Entre este núcleo y la pared de la cañería existen una zona con alta tasa de cizallamiento, lo que produce una aparente baja viscosidad y forma un perfil de flujo anular de núcleo. Este comportamiento no-Newtoniano es ventajoso para el transporte de pulpas con alto contenido de sólidos³ permitiendo una gradiente de menor presión a lo largo de la cañería con su bombeo reducido y bajo requerimiento de energía mientras que, a la vez, presenta suficiente tensión de fluencia en el punto de evacuación para los declives y estabilidades adecuadas. El flujo anular de núcleo tiene variaciones de densidad no uniforme y fluctuaciones en la interfaz como se observa en la **Figura 2**. Estas fluctuaciones u ondas permanecen coherentes durante una distancia suficiente para poder realizar un seguimiento a través de un arreglo de sensores pasivos.

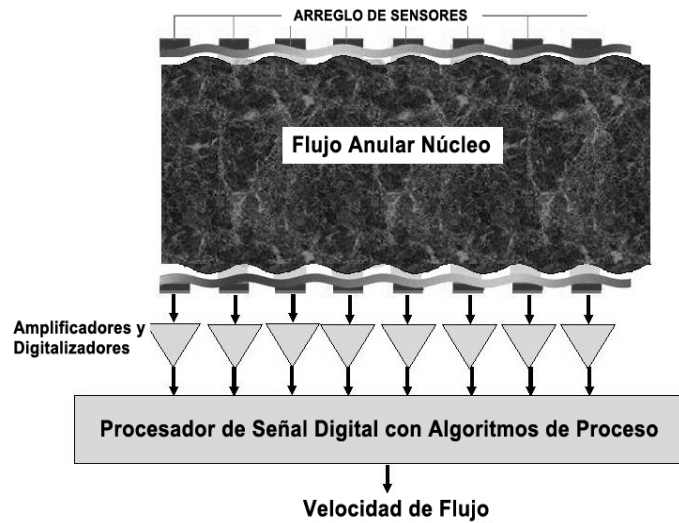


Figura 2 Diagrama de cañería con flujo anular de núcleo con variaciones de densidad y ondas en el núcleo a interfaz anular

Medición de Velocidad de Flujo con Arreglo de Sensores y Procesamiento

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

- El paso de los remolinos turbulentos o las variaciones de densidad crea un leve cambio de presión en el interior de la pared de la cañería
- Este pequeño cambio de presión resulta en una presión dinámica de la pared misma (Figura 1 aumentado)
- 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 sensores⁴

Vistos 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 pasivos o las variaciones de densidad 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 o las variaciones de densidad que convectan y las fuertes señales provenientes de las ondas acústicas y vibraciones. La velocidad de las ondas acústicas se usa para calcular la composición del fluido o la cantidad de aire arrastrado (fracción libre de gas).

La tecnología es aplicable a la generación de un indicador de robustez de medición, conocido también como factor de calidad. La mayoría de los otros 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 señal proveniente del flujo contra los niveles de energía de respaldo. Un factor de calidad que va de 0 a 1,0 se genera con una medición de flujo 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.

Actualmente esta tecnología puede reportar una tasa de volumen de flujo en líquidos y pulpas con velocidades de flujo que van de 3 (0,9 m/s) a varios cientos de pies por segundo. La tecnología se puede aplicar para realizar mediciones en prácticamente cualquier tamaño de cañería siempre que el flujo sea turbulento y en algunos fluidos no-Newtonianos, incluso sin presencia de turbulencias y a velocidades por debajo de los 3 ft/seg. La cañería debe estar llena pero puede contener aire arrastrado en forma de burbujas bien mezcladas. Esta tecnología funciona en prácticamente cualquier tipo de fluido dentro de, virtualmente, cualquier tipo de cañería, incluyendo las cañerías revestidas y aquellas con acumulación de residuos.

Medición de Composición de Fluido

En la mayoría de las aplicaciones en procesamiento de minerales en aquellos procesos que incluyen pastas o relaves espesados, 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 3** se muestran estas ondas acústicas en una cañería y, como se aprecia, se pueden propagar en dirección descendente por la cañería o bien en ambas direcciones.

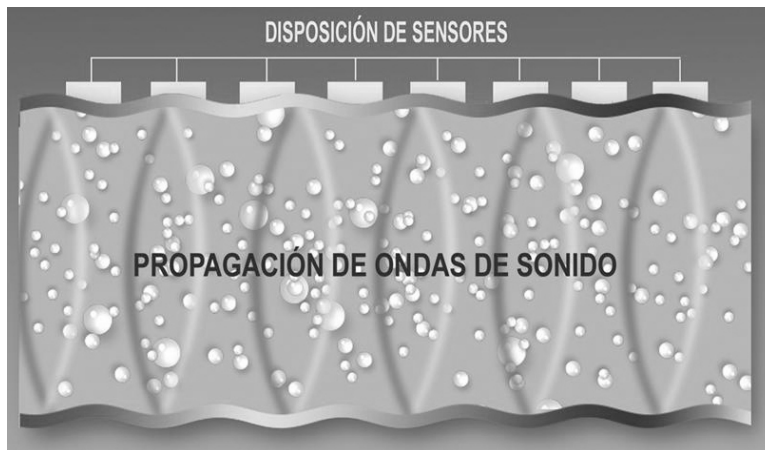


Figura 3 Ilustración de ondas producidas en forma natural y que se propagan en una cañería bajo los sensores de arreglo sonar

A través del mismo arreglo pasivo de sensores que se usa para medir la velocidad de flujo y los algoritmos sonares similares, se obtiene el promedio de velocidades axiales de un grupo de ondas acústicas. Dado que las ondas acústicas son ondas de presión que se desplazan, introducen cambios localizados de presión en el interior de las paredes de la cañería durante su ciclo desde la compresión a la rarefacción y de regreso. Estos cambios de presión tensionan las paredes de la cañerías y son rastreados de manera similar que los remolinos turbulentos y las variaciones de densidad.

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 (volumen promedio de velocidad). La velocidad acústica resultante c_M puede estar dada por:

$c_M = \phi_1 c_1 + \phi_2 c_2$ (Wang y Nur, 1991) donde $\phi_{1,2}$ corresponden a las fracciones de volumen de la fase y $c_{1,2}$ a las velocidades acústicas de las fases

Usando $\phi_2 = 1 - \phi_1$ puede volver a arreglarse para dar: $\phi_1 = \frac{c_M - c_2}{c_1 - c_2}$

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 del gas) cuando hay gas en forma de burbujas bien mezcladas dentro del líquido o pulpa. ^{5 6}

Dado que las longitudes de onda de las ondas acústicas son mucho mayores que el tamaño de la burbuja, se produce una relación compleja que transforma la velocidad acústica en una función de la fracción vacía del gas. La velocidad del sonido es proporcional a la raíz cuadrada de la razón de la compresibilidad y la densidad ambas de las cuales resultan muy influenciadas por el contenido de aire. En la **Figura 4** se muestra un ejemplo de la relación resultante.

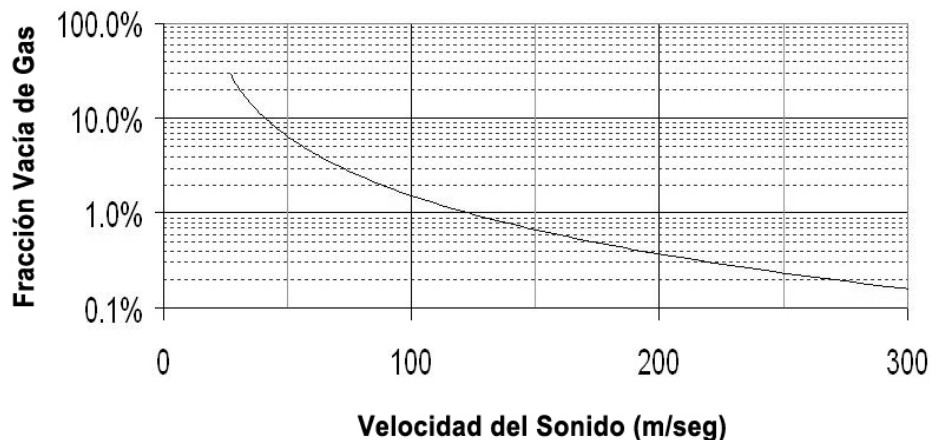


Figura 4 Ejemplo de una relación entre fracción vacía de gas (contenido de aire arrastrado) y velocidad del sonido

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 de vacío de gas con una precisión del 5% en la lectura.

EJEMPLOS DE APLICACIÓN - FLUJO Y AIRE ARRASTRADO

Aplicación en Medición No Invasiva de Flujo y Detección de Filtración en Cañerías de Alta Presión

Debido a su naturaleza no invasiva y fácil instalación, el flujómetro basado en arreglo sonar se adapta perfectamente a las aplicaciones abrasivas y de alta presión. Como ejemplo podemos citar lo siguiente: existía una necesidad de contar con un medidor de flujo confiable para realizar las mediciones en el comienzo y final de una tubería de >50 km. El requerimiento era medir el flujo con exactitud para poder detectar filtraciones y también monitorear tasa de transferencia de producto. El desafío para la planta era cumplir este objetivo sin tener que penetrar la cañería por las altas presiones (>1000 psi, >70bar) que se observaban en un flujómetro.

Las mediciones de flujo resultantes, como se aprecian en la **Figura 5**, muestran claramente las señales de los dos flujómetros (líneas oscuras) en la parte superior de ellas. La única forma de ver las pequeñas diferencias entre ambas lecturas es observando la razón de los dos resultados (línea clara). Excepto donde las transiciones causan diferencia de flujo entre los medidores superior e inferior por el tiempo de tránsito del cambio de flujo en la cañería, la razón promedio está dentro de +/- 1%, lo que está dentro también de las especificaciones de los medidores y los requerimientos de la planta.

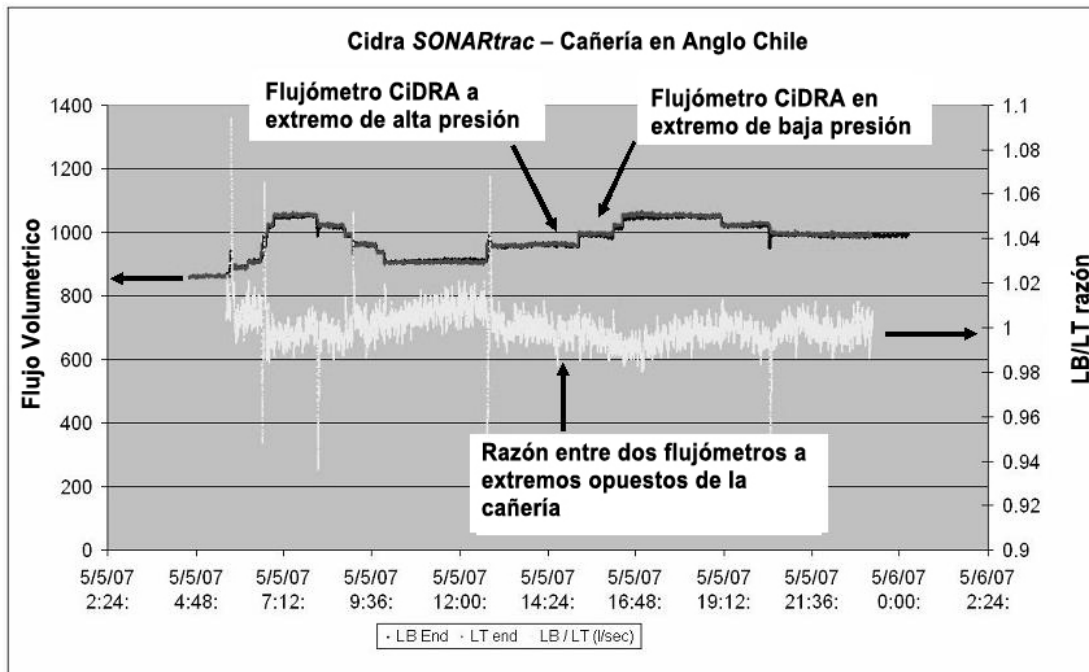


Figura 5 Resultados de detección de filtración utilizando flujómetros basados en arreglo sonar en los que las líneas oscuras que se superponen corresponden a los resultados arrojados por el flujómetro y las claras corresponden a la razón entre los dos resultados.

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 circuito de flujo provisto de medidor nuclear de densidad. Como se esperaba, cuando se aumentó la tasa de inyección de aire, mostrada como el valor estándar de pies cúbicos por hora (SCFH) en la **Figura 6**, el resultado disminuyó en 5%, como se observa en la línea discontinua más clara. El flujómetro basado en arreglo sonar en la misma línea midió 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 +/- 0,25%.

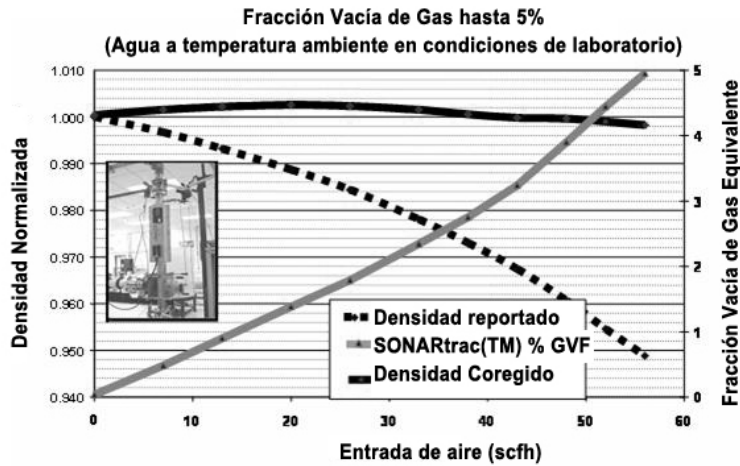


Figura 6 Corrección al medidor nuclear de densidad utilizando un flujómetro basado en arreglo sonar

Flujo de Relaves Espesados

Como se describió anteriormente, el medidor de flujo basado en arreglo sonar puede medir pulpas no-Newtonianas. En la industria de la minería un ejemplo de ellas lo constituyen las pulpas con alto contenido de sólidos que generalmente se conocen como relaves espesados y pasta. La **Figura 7** muestra un ejemplo de un flujómetro de arreglo sonar midiendo flujo de Relaves Espesados a bajas velocidades, por debajo de 1 m/s. En la medida que se producía la transición de flujo de agua a pulpa a más de 2 m/s, la velocidad disminuyó a 1,2 m/s y luego continuó reduciéndose lentamente hasta que la cañería completa se obstruyó a 0,5 m/s. Posteriormente la cañería fue destapada y limpiada con flujo de agua, como se muestra. Esta secuencia señala que con tales pulpas la alta densidad produce un campo de presión coherente auto-generado suficientemente alto como para poder ser rastreado por el flujómetro de arreglo sonar. En esta prueba, realizada para Antofagasta Minerals S.A., Chile, por PSI-JRI Ltda., (ambas empresas chilenas) la precisión del flujómetro sonar fue verificada con la ejecución pruebas de estanque lleno como se muestra en el gráfico.

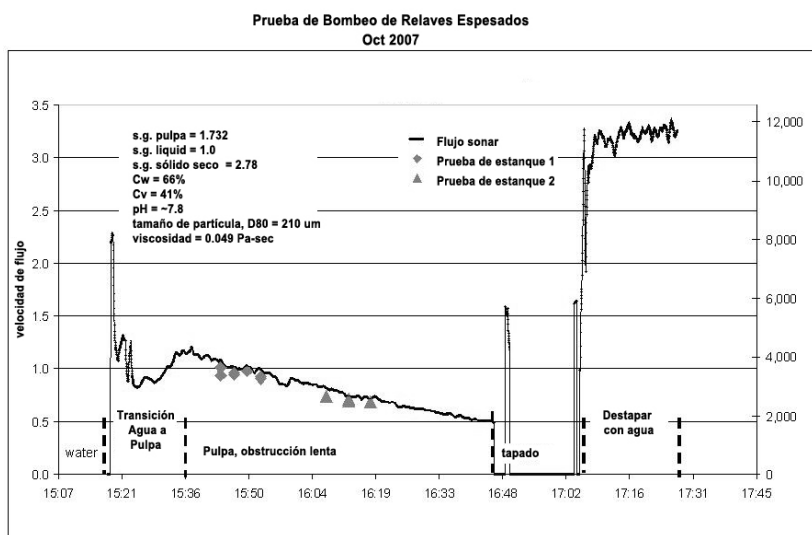


Figura 7 Prueba de pulpa espesada realizada para Antofagasta Minerals, Chile, con medición de flujo utilizando flujómetro de arreglo y que muestra la precisión verificada a través de pruebas de estanque lleno y la capacidad de operar a velocidades de flujo por debajo de las especificaciones.

CAPACIDAD PARA REALIZAR MEDICIONES ADICIONALES

Además de las dos mediciones básicas de tasa de flujo y composición de fluido que se han descrito anteriormente, el sistema de medición sonar de flujo puede realizar mediciones adicionales que lo diferencian y hacen destacar las capacidades de su tecnología única. A continuación se describen algunas de estas nuevas capacidades de medición. Estas capacidades han sido sometidas a exitosas pruebas de laboratorio y terreno donde su desempeño ha sido validado. Sin embargo, dado que algunas de las mediciones resultan nuevas para la industria de control de procesos, su implementación detallada en el sistema general de control de procesos todavía debe ser determinada por la comunidad de automatización y control de procesos.

Monitoreo Acústico de Equipos de Proceso y Cañerías

Durante el curso de la medición de flujo, el flujómetro basado en arreglo sonar desarrollado por CiDRA detecta los niveles acústicos dentro de la cañería. Al monitorear estos niveles acústicos sobre las frecuencias seleccionadas, se puede obtener información adicional sobre los eventos que ocurren en una cañería o proceso. Por ejemplo, el movimiento de válvula en una estación de reducción de presión se corresponde con cambios en los niveles acústicos durante el movimiento, así como también antes y después del movimiento cuando el flujo es derivado a través de otra cañería. El flujo mostrado como la línea oscura en la **Figura 8** cambia en aproximadamente 8% por causa del cambio de posición de la válvula que dirige el flujo a través de otro paso en la estación de derivación. El nivel acústico cambia por factor de tres o cuatro (200% a 300%) durante el movimiento de válvulas y por un factor de tres (200%) entre las posiciones de válvulas. La combinación de la medición de flujo y el nivel acústico proporcionan la información necesaria para

monitorear la válvula. Este concepto puede ser extendido al monitoreo de eventos de rupturas de disco y cañerías.

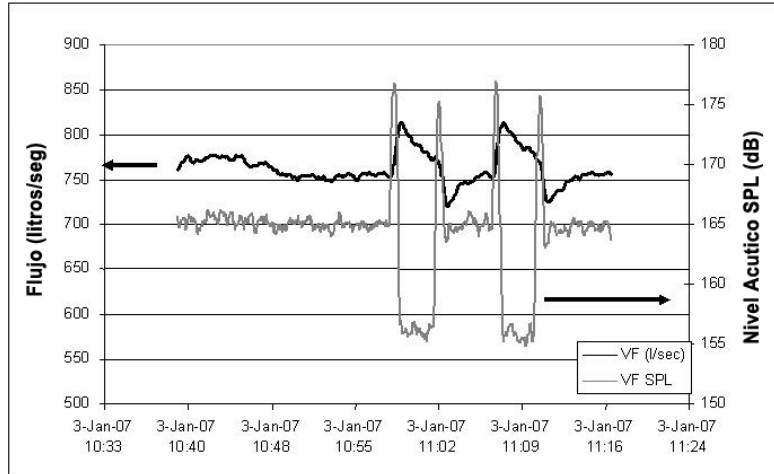


Figura 8 Medición de flujo y de nivel acústico para el movimiento de válvulas en una estación de regulación

Perfil de Flujo y Detección de Arenas

Un problema fundamental que acompaña a los operadores de cañerías de hidrotransporte es la posibilidad de que algún material sólido se asiente en el fondo de la cañería y provoque un bloqueo. Los operadores dedican muchos esfuerzos a evitar esta condición de “bloqueo por arena” manteniendo una tasa de flujo sobre cierto valor calculado o determinado empíricamente. Desafortunadamente, los modelos incompletos y los cambios en las propiedades de la pulpa, incluyendo viscosidad, contenido de finos y cambios en la distribución del tamaño de partícula, pueden provocar grandes barras de error (desviaciones) al utilizar cualquiera de estas aproximaciones.

Una mejor solución es monitorear activamente el perfil de flujo en la cañería para determinar la reducción de la velocidad de flujo en el fondo de cañería mientras las partículas de mayor tamaño y mayor densidad se asientan y aproximan a una velocidad muy lenta. Utilizando un instrumento diferente con un sensor cuya ingeniería fue especialmente diseñada, la velocidad del flujo puede ser determinada en puntos definidos a través del diámetro de la cañería. Como ejemplo, se puede comparar el flujo en el fondo de la cañería con el flujo en la parte superior de la cañería. Los resultados de las pruebas realizadas a este instrumento se pueden observar en la **Figura 9**. Aquí resulta evidente el cambio en el perfil de flujo por causa de la estratificación de partículas en las velocidades más lentas que se aprecian cerca del fondo de la cañería en la medida que se va aproximando a la condición de “bloqueo por arena”.

Al procesar algunas características propias del perfil de flujo, se puede generar una condición de alarma. Al extender este procesamiento para examinar no sólo condición donde ha ocurrido un “bloqueo por arena” sino de bajo nivel que no ha alcanzado un nivel mayor en la cañería (>25% de

la altura de la cañería), podemos configurar un nivel más alto en la alarma. Esto queda ilustrado en el lado derecho de la **Figura 9**.

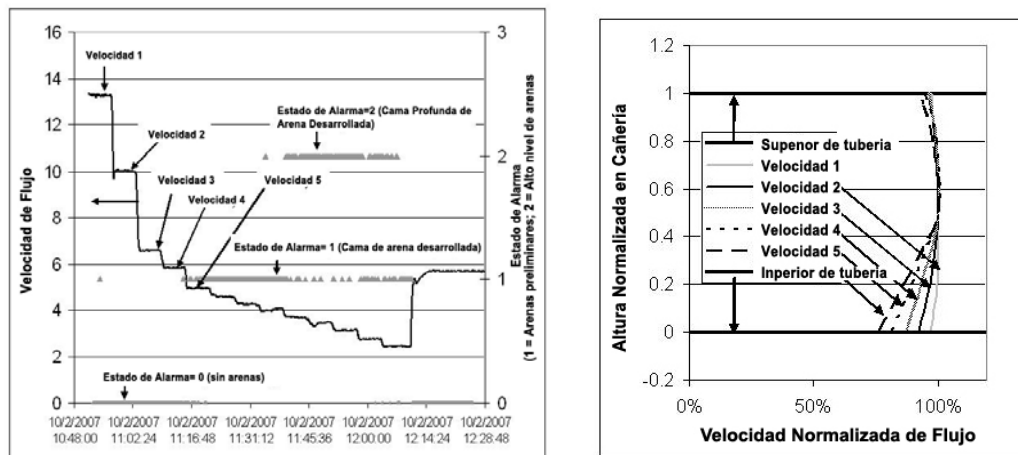


Figura 9 (Izquierda) Perfiles de velocidad normalizados a diferentes tasas de flujo mostrando una caída en la velocidad en el fondo de la cañería a tasas más bajas. (Derecha) Velocidad de Flujo & Condición de Alarma para bajo nivel de arenas (Nivel de alarma=1) y para altos niveles de arenas (Nivel de alarma -2)

CONCLUSIONES

Los medidores de flujo de arreglo sonar son una nueva clase de tecnología de medición de flujos y se ajustan perfectamente para resolver muchos de los problemas de medición de flujo latamente existentes en la industria del procesamiento de minerales. Combinan e impulsan la nueva tecnología de sensores con los más de 60 años de desarrollo sonar para producir esta plataforma tecnológica. Esta tecnología permite alcanzar nuevos niveles de control de proceso pues ahora es posible obtener mediciones confiables, de alta calidad y sin necesidad de mantenimientos en aplicaciones donde antiguamente las mediciones eran poco confiables y de mala calidad. Uno de los ejemplos que se presentó correspondía a la medición de la tasa real de flujo líquido en presencia de aire arrastrado, lo que, en el mejor de los casos, causaría error de medición y, en el peor, falla completa de la medición. Otro ejemplo corresponde a la corrección en línea de la medición nuclear de densidad.

Además de las dos mediciones básicas de tasa de flujo y composición de fluido descritas, también se presentaron ejemplos de extensión de esta plataforma de tecnología para agregar capacidades únicas. Una de ellas era la capacidad de monitorear eventos basados en ciertas características acústicas y así detectar las condiciones anómalas tales como el accionamiento inadecuado de una válvula. La otra correspondía a la capacidad de medir el perfil de velocidad de la pulpa y así poder predecir y detectar las condiciones de las arenas. Esta capacidad para hacer más confiables y precisas las mediciones comunes del proceso, como es la tasa de flujo, combinada con la capacidad de ejecutar mediciones que no estaban disponibles anteriormente, como por ejemplo, el aire arrastrado, entregan la oportunidad de mejorar las mediciones y control del proceso. El hecho de que estas mediciones puedan ahora ser realizadas de forma no invasiva, eliminando las limitaciones por presión de la línea, degradación por causa de desgaste abrasivo y detención del proceso para las

labores de instalación, ofrece la oportunidad de mejorar las mediciones y control del proceso en las instalaciones de procesamiento de minerales, tanto en las ya existentes como en las nuevas.

AGRADECIMIENTOS

Deseamos agradecer por la cooperación y autorización para usar la información incluida a:

- Anglo American Chile: Medición de flujo de cañería y detección de filtración, monitoreo acústico de equipos y procesos.
- Antofagasta Minerals S. A., PSI-JRI Ingeniería Ltda. (empresas de Chile): flujo de relaves espesados.

REFERENCIAS

- ¹ Nielson, R.O., “Sonar signal processing”. Artech House Inc, Norwood, MA, 2001, ISBN 0-89006-453-9
- ² Landau M.T., Mollo-Christensen, E., “Turbulence and Random Processes in Fluid Mechanics”. 2nd Edition, Cambridge University Press, Cambridge, UK, ISBN 0-521-42213-2, 1992.
- ³ Gysling, D.L., Mueller, E., “Application of sonar based, clamp on flow meter in oil sand processing”, ISA 2004 Exhibit and Conference, Edmonton section, April 2004.
- ⁴ Beranek, L.L., Ver, I.S., “Noise and Vibration Control Engineering”, section 14.6, John Wiley and Sons, New York, ISBN 0-471-61751-2, 1992.
- ⁵ McWilliam, D., Duggins, R.K., “Speed of sound in bubbly liquids”, Proc Instn Mech Engrs, Vol 184, Part 3C, 1969-1970.
- ⁶ Wood, A., “A textbook of sound”, New York, NY, 1st edition, 1930.