

# Descripción de la Tecnología Basada en Arreglo Sonar No Invasivo y su Aplicación a Medición de Flujo en Pulpas y Pastas Únicas y Complejas

**C.V. O’Keefe** *CiDRA Corporation, Estados Unidos de Norteamérica*

**R.J. Maron** *CiDRA Corporation, Estados Unidos de Norteamérica*

**P.J. Rothman** *CiDRA Corporation, Estados Unidos de Norteamérica*

**J. Poplawski** *CiDRA Corporation, Estados Unidos de Norteamérica*

## 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 realiza dos mediciones independientes – tasa de flujo y caracterización de fluido. Primeramente, el medidor entrega la tasa de flujo volumétrico de la mezcla midiendo la velocidad a la que naturalmente ocurren las estructuras tales como remolinos turbulentos, o a las cuales convectan las variaciones de densidad con el flujo pasando a través de un arreglo axial de sensores. En segundo lugar, el medidor usa técnicas similares basadas en arreglo sonar y sonidos de ocurrencia natural en la pulpa de proceso para medir los niveles de aire arrastrado y, en algunas ocasiones, la composición del sonido. El resultado es una habilidad única para medir la tasa de flujo y el nivel de aire arrastrado en la mayoría de los fluidos - líquidos limpios, pulpas con alto contenido de sólidos, pasta, líquidos y pulpas con aire arrastrado.*

*También se presentará la aplicación de esta plataforma de tecnología basada en arreglo sonar en una variedad de aplicaciones de beneficio en hidrotransportes y proceso de minerales. Los ejemplos de estas situaciones incluyen mediciones de volumen de flujo en líneas de relave, descarga de espesadores, cañerías con alto contenido de sólidos, tuberías de pulpa con contenido de magnetita y otros minerales magnéticos, cañerías de pulpa con materiales abrasivos o corrosivos, líneas de alta presión, y líneas con y sin pulpa con evidencia de acumulación de descamaciones o residuos. Se analizarán las ventajas operacionales y el valor de estas mediciones, aun en presencia de acumulación de residuos. También se cubrirán temas como los recientes desarrollos realizados para aplicar esta tecnología en la solución de problemas tan particulares y únicos como es la confirmación del movimiento de válvula, la determinación del perfil de pulpa por medios no invasivos y la detección de arenas.*

## 1 Introducción

Las condiciones y ambientes para el control de procesos en la mayoría de las aplicaciones en procesamiento de minerales pueden constituirse en un desafío. En particular, la medición de flujo de las pulpas con alto contenido de sólidos, como las pastas o los relaves espesados, no puede ser adecuadamente cubierta por la generación anterior de flujómetros como los medidores de ultrasonido, los medidores electromagnéticos, medidores de turbina, medidores de placa orificio, medidores de Coriolis y Venturi. También, en el pasado, la incapacidad de medir la cantidad de aire arrastrado dentro de estas pulpas ha degradado la precisión de los medidores nucleares de densidad y los flujómetros. Ambos problemas de medición – flujo y aire arrastrado - se resuelven usando una nueva clase de instrumentación que utiliza un arreglo de sensores pasivos y algoritmos de proceso con base sonar para medir el flujo y la composición del fluido, incluyendo los niveles de aire arrastrado.

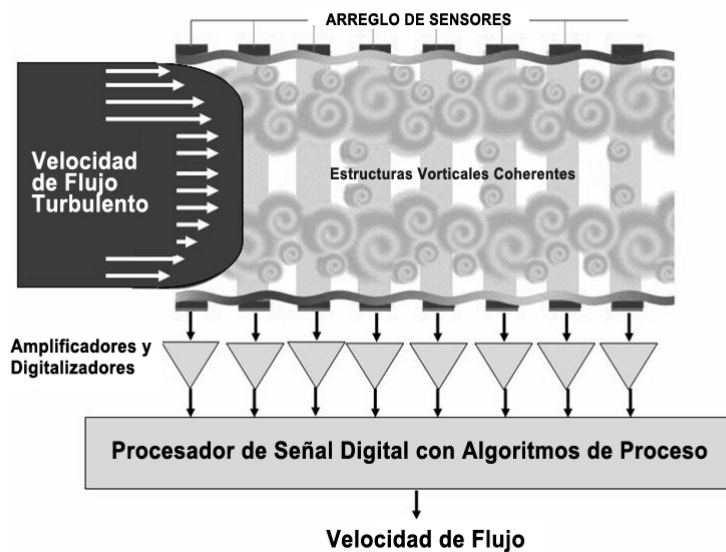
## 2 Principio de Operación

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 pueden corresponder a variaciones de densidad, variaciones de temperatura,

remolinos turbulentos 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.

## 2.1 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. Estos remolinos turbulentos se crean continuamente. Una vez creados, se disgregan en cada vez más pequeños vórtices hasta que se hacen tan diminutos que son disipados en forma de calor a través de los efectos viscosos del fluido. En diferentes diámetros de cañerías de flujo descendente y de creación natural, 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 (Gysling y Mueller, 2004).

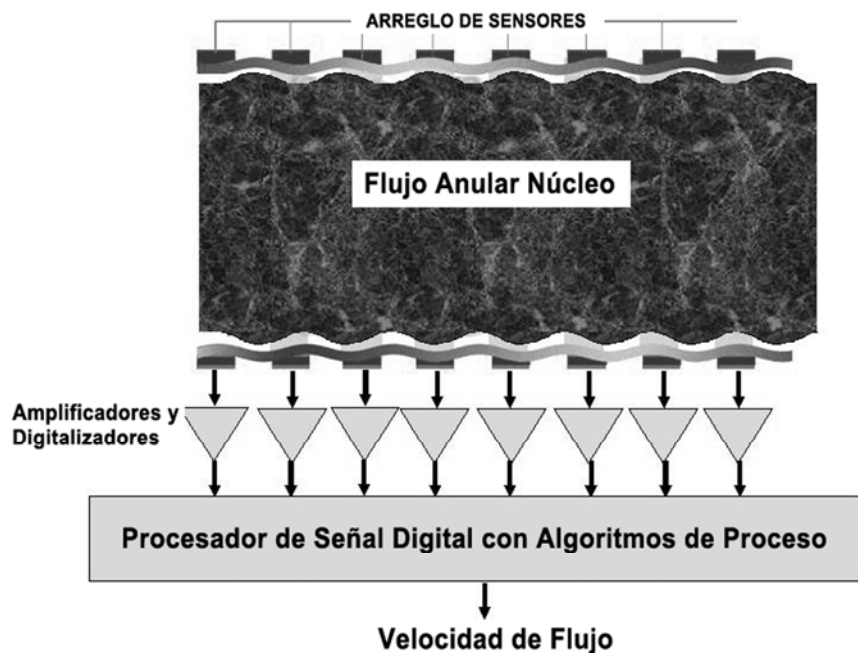


**Figura 1 Diagrama de cañería con flujo turbulento mostrando perfil completamente desarrollado y remolinos turbulentos**

## 2.2 Variaciones en la Densidad de Pulpa/Pasta y Velocidad de Flujo

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 existe 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 sólidos 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. Estas fluctuaciones u ondas permanecen coherentes durante una distancia suficiente para poder realizar un seguimiento a través de un arreglo de sensores pasivos (Gysling y Mueller, 2004).



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

### 2.3 Medición de velocidad de flujo con arreglo sonar

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 (Figuras 1 y 2 muestran ampliación)
- 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.

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 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).

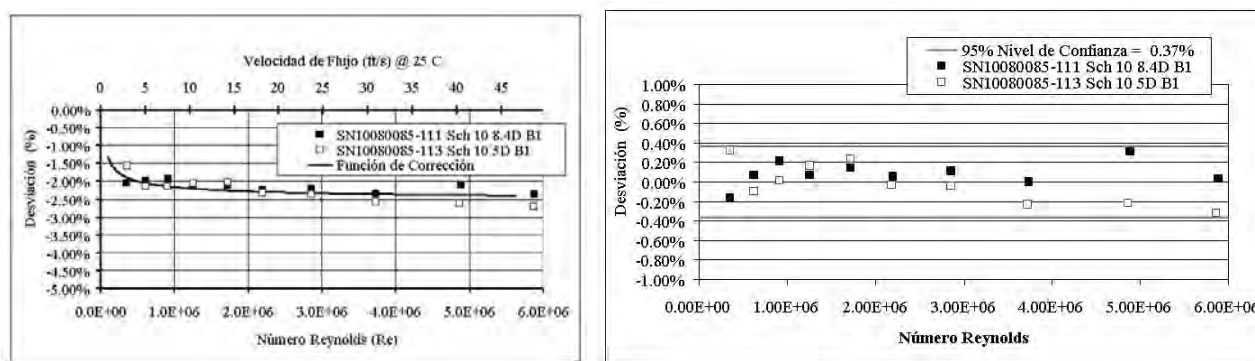
La tecnología es aplicable a la generación de un indicador de robustez de medición, conocido también como factor de calidad. La mayoría de los otros medidores de flujo no entregan ninguna indicación de la calidad de la medición.

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 0,9 m/s (3 pies/s) a 9 m/s (30 pies/s). La tecnología se puede aplicar para realizar mediciones en prácticamente cualquier tamaño de cañería siempre que el flujo sea turbulento y en el caso de algunos fluidos no-Newtonianos, incluso sin presencia de turbulencias. 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.

## 2.4 Calibración de tasa de flujo y su mantenimiento

La medición del volumen de flujo proporcionada por el seguimiento de los remolinos turbulentos no requiere de ajuste o calibración alguna. En la práctica la calibración ajusta el producto informado sólo en un pequeño porcentaje, dependiendo del Número de Reynolds. Como un ejemplo del factor de corrección aplicado - observe en el lado izquierdo de la Figura 3, el grado de corrección que se necesita para una cañería DN 250 mm (10-inch) Tipo 10 con agua. En este ejemplo, después de aplicar el factor de corrección, el valor compensatorio llega a +/- 0,4% como se muestra en el lado derecho de la Figura 3.

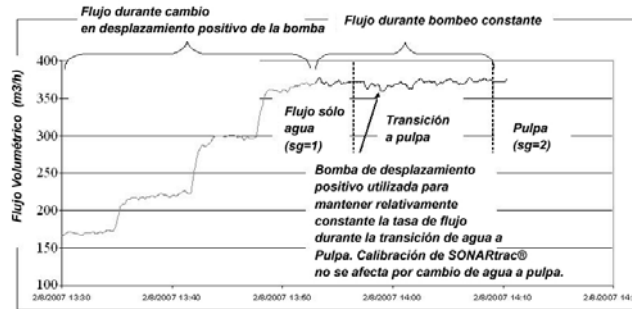


**Figura 3 (Izquierda) Velocidad de flujo y desviación a partir de referencias de calibración anterior y (Derecha) desviación después de calibración**

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 de 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 faena. Como resultado, el impacto de la estabilidad del reloj puede ser descartado.

## 2.5 Mantención de calibración entre el agua y las pulpas

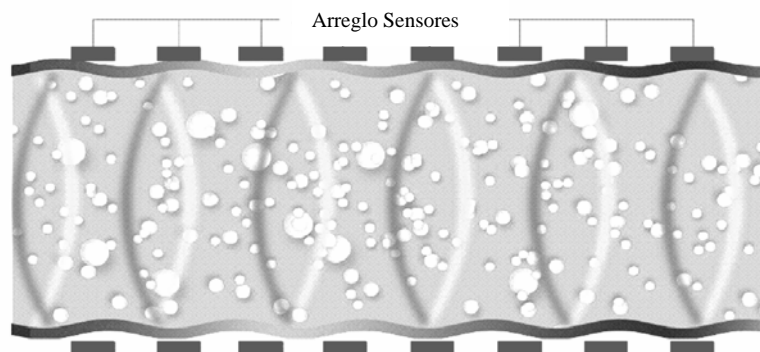
El medidor de flujo sonar está diseñado para medir flujos de pulpa agresiva con contenidos variables de sólidos. La Figura 5 muestra la medición de flujo volumétrico durante una transición de agua a pulpa de concentrado de hierro (s.g. = 2), mientras el desplazamiento positivo de la bomba mantenía una 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. Otras pruebas de llenado o reducción de contenido de estanque han verificado el uso de los mismos coeficientes de calibración para los fluidos que están en el rango de agua a pulpas espesas, incluyendo una pasta de arena con peso de masa de 67%.



**Figura 4 Medición de Agua y Pulpa con el mismo medidor y los mismos coeficientes de calibración no muestran cambio en el flujo medido. El uso de una bomba de desplazamiento positivo mantiene la tasa de flujo sin variación**

## 2.6 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 5 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 (Gysling et al, 2005).



**Figura 5 Ilustración de ondas producidas en forma natural en una cañería y que se propagan 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.

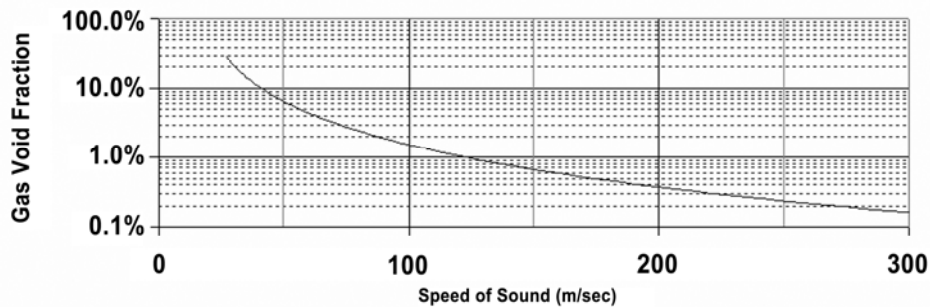
Este fluido puede ser de multifase, o bien, de multicomponentes de fase única. En un fluido de fase única, la velocidad acústica será una función de la razón y las propiedades acústicas de los dos fluidos, así esta medición puede ser utilizada para determinar las relaciones de mezcla a través de la aplicación de la regla simple de mezcla (volumen promedio de velocidad). La velocidad acústica resultante  $c_M$  puede estar dada por:

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

Usando  $\phi_2=1-\phi_1$  esto puede dar: 
$$\phi_1 = \frac{c_M - c_2}{c_1 - c_2}$$

En los fluidos de fase múltiple que consiste 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 (Wood, 1930).

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 6 se muestra un ejemplo de la relación resultante.



**Figura 6 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 (Gysling et al, 2005).

## 2.7 Configuración de componentes para implementación de principio de medición y proceso de instalación

El principio de medición de composición de flujo y fluido puede implementarse a través de diversas configuraciones de componentes. Para aprovechar la capacidad no invasiva de esta técnica se ha desarrollado un instrumento envolvente que se instala en forma externa. Para comprender la implementación de este componente es más recomendable ver el proceso de instalación como se muestra en la Figura 7. No se necesita gel de acoplamiento y los sensores no requieren alineación. La instalación es fácil, generalmente sólo se requiere de una persona y toma normalmente dos horas.





**Transmisor**

**Figura 7** Procedimiento de instalación desde preparación de la cañería (superior izquierda) hasta la limpieza de la cañería, hasta montaje de la banda del sensor que es flexible y de bajo peso (superior centro y superior derecha), pasando por la limpieza y suave arenado de la cañería (superior centro y superior derecha) hasta la instalación de la cubierta del sensor y conexión de la cubierta con el transmisor a través de un cable tenso (inferior centro e inferior derecha)

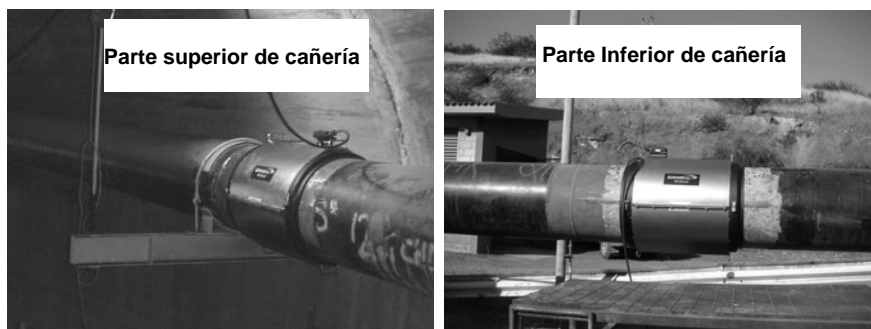
### 3 Soluciones para la Medición

Esta tecnología puede ser usada en la mayoría de las aplicaciones en las que se usa la generación más antigua de flujómetros, tales como los electromagnéticos, de presión diferencial y de ultrasonido. También tiene un desempeño sobresaliente en muchas aplicaciones en las que otros flujómetros no funcionan bien o, simplemente no funcionan en absoluto, tienen vida útil limitada o implican algún riesgo a la seguridad. Entre estas aplicaciones se incluyen fluidos altamente abrasivos/corrosivos, líneas de alta presión, pulpas con aire arrastrado, cañerías con acumulación de descamaciones, pulpas con mineral magnético y otras.

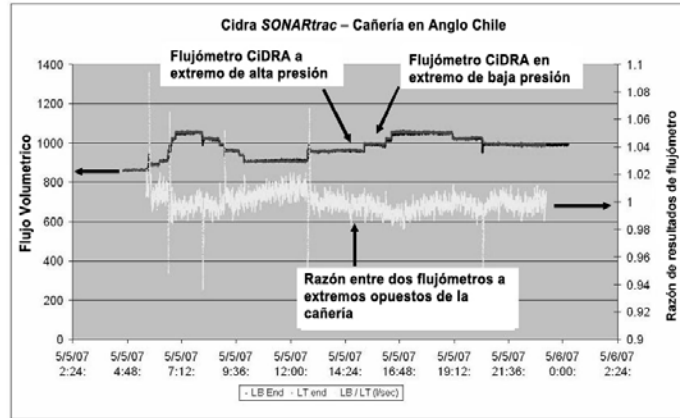
#### 3.1 Mediciones de flujo precisas no invasivas para aplicaciones de alta presión y detección de filtración

Debido a su naturaleza no invasiva y a su fácil instalación, el flujómetro de arreglo sonar se ajusta idealmente a las aplicaciones de condiciones abrasivas y/o de alta presión. Como ejemplo, existía en una planta la necesidad de contar con un flujómetro confiable para medir el flujo al inicio y al final de una cañería >50 km. El requerimiento era medir con precisión el flujo para detectar la presencia de filtraciones, además de monitorear la tasa de descarga. El desafío para la planta era realizarlo sin tener que ingresar a la cañería dadas las altas presiones (>70 bar) que se observan en el sitio de instalación del segundo flujómetro. Una foto de la instalación de alta presión (Figura 8) muestra cómo la naturaleza externa del flujómetro permite una instalación rápida y segura, además de una operación segura.

Las mediciones de flujo resultantes que se observan en la Figura 9 claramente muestran las dos señales del flujómetro (líneas oscuras) traslapándose en su parte superior. 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, a su vez, dentro de las especificaciones de los medidores y los requerimientos de la planta.



**Figura 8** Seguridad en cañerías o líneas de alta presión (>70 bar), utilizando el mismo medidor para ambas aplicaciones, de alta y baja presión

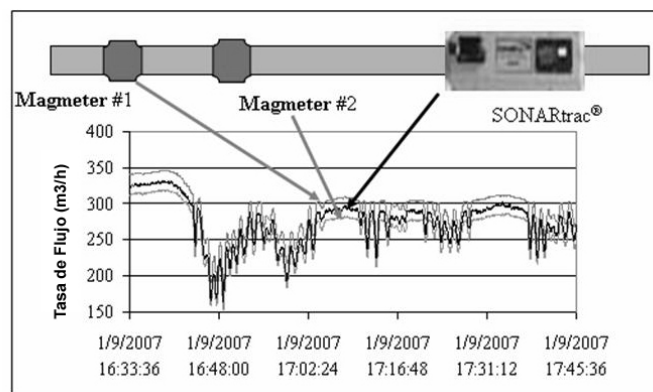


**Figura 9 Resultados de detección de filtración utilizando flujómetros basados en arreglo sonar en los que las líneas oscuras que se superponen corresponden a los resultados arrojados por el flujómetro y las claras corresponden a la razón entre los dos resultados.**

### 3.2 Medición Precisa de Flujo sin Alteraciones

Existen muchos casos donde las mediciones entregadas por los flujómetros no pueden ser verificadas a través de una prueba estándar de excelencia de precisión como son la prueba de llenado de estanque o la prueba de vaciado. La mayoría de los flujómetros presentarán alteraciones por efecto del tiempo y/o la temperatura, provocando un cambio de señal que no se nota o no puede ser verificada. Como un ejemplo se puede mencionar que los medidores magnéticos descansan en la estabilidad de los elementos electrónicos análogos que pueden resultar alterados con el tiempo y la temperatura, la ausencia de partículas magnéticas en el mineral y/o electrodos limpios para informar el flujo en forma precisa. Cuando alguna de estas condiciones no se cumple, lo que ocurre frecuentemente, el operador ni siquiera se da cuenta de que se ha producido un error a menos que el medidor magnético se compare con otro medidor o sea recalibrado a través de una prueba estándar de excelencia.

Como un ejemplo, en la Figura 13 se muestran los datos obtenidos de los medidores magnéticos instalados en serie a mucha proximidad uno de otro en una planta de oro y cobre. En esa figura las dos líneas oscuras corresponden a los resultados del medidor magnético mientras que la línea clara entre las dos líneas oscuras corresponde al medidor de flujo basado en arreglo sonar. El medidor de flujo de arreglo sonar fue configurado usando los coeficientes universales de calibración correspondientes para este medidor. En este caso los dos medidores magnéticos difieren en el promedio en más del 12%. La información proporcionada por un medidor de flujo de arreglo sonar corresponde a una lectura que es aproximadamente un promedio de los dos medidores magnéticos, pero con la confianza de que no será alterada con el tiempo. La mantención de la precisión relativa puede ser verificada moviendo el flujómetro de arreglo sonar sin detener el proceso a un punto donde se pueda realizar una prueba de estanque.

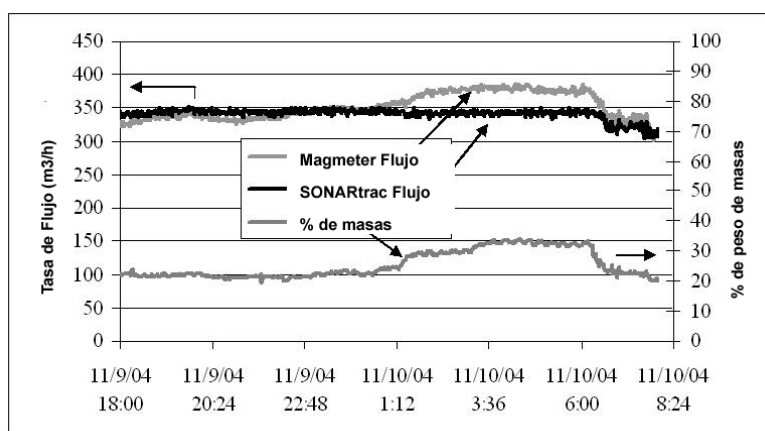


**Figura 10 Dos medidores magnéticos en serie con flujómetro de arreglo sonar, se muestran desviaciones de >12% entre los medidores magnéticos y medición precisa por parte del flujómetro de arreglo sonar.**

### 3.3 Medición de Flujo en Presencia de Mineral Magnético como Magnetita, Arsenopirita o Pirrotita

La presencia de mineral de 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 mineral de magnetita dentro o cerca de los cuerpos del mineral. El mineral magnético, 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 del mineral magnético 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 es 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. En la Figura 11 se ilustra un ejemplo en el que se compara un flujómetro de arreglo sonar con un medidor magnético. En la figura se puede apreciar que en la medida que aumenta la densidad del mineral magnético, el medidor magnético erróneamente informa una mayor tasa de flujo, mientras que el flujómetro sonar continúa informando correctamente que no hay cambio en la tasa de flujo.

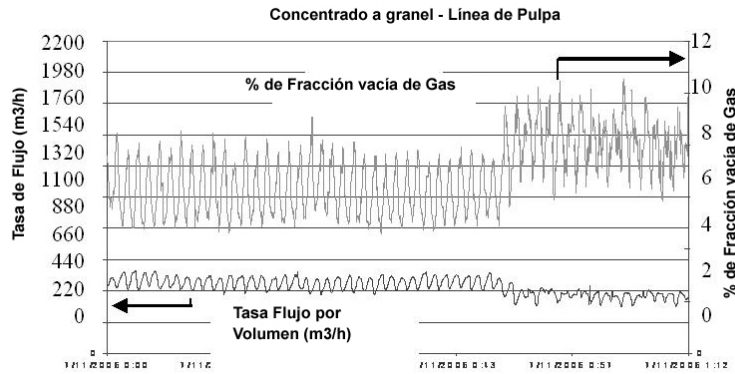


**Figura 11 Los medidores magnéticos responden erróneamente a la magnetita mientras que el flujómetro de arreglo sonar informa lecturas correctas del flujo**

### 3.4 Medición de Aire Arrastrado en la Pulpa o Fluido

Se puede introducir aire a la cañería de pulpa intencionalmente utilizando inyectores de gas que se usan para reducir las pérdidas de fricción, o bien, sin intención, a través de filtraciones, procesos de espesamiento basados en filtración o inyección de cemento. En términos de medición de flujo volumétrico, la mayoría de los flujómetros resultan afectados en forma adversa por el aire arrastrado dentro de un líquido o pulpa. Como mínimo causarán 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.

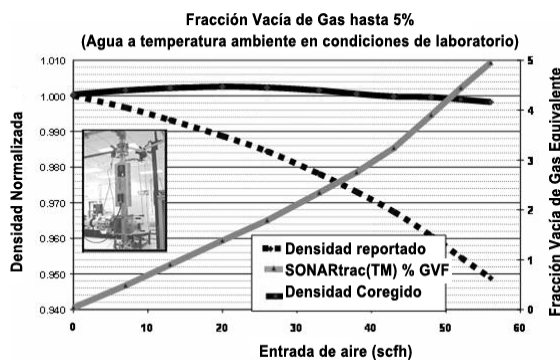
Northgate Minerals utiliza tecnología basada en arreglo sonar desarrollada por CiDRA Corporation (SONARtrac®) para medir flujos de concentrado en bruto y la alimentación a las columnas de flotación en la mina Kemess en British Columbia, Canadá. La tecnología no invasiva mide estas pulpas abrasivas con mucha precisión y sin períodos de detención de proceso por causa de mantenimiento relacionada con el medidor de flujo. La mina Kemess también usa la capacidad de la Fracción Libre 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 Figura 12 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** Las mediciones de flujo aire arrastrado (% fracción vacía de gas) muestran el impacto del aire arrastrado en la tasa de flujo y la capacidad de la tecnología para medir ambos

### 3.5 Corrección de los Medidores Nucleares de Densidad por Presencia de Aire Arrastrado

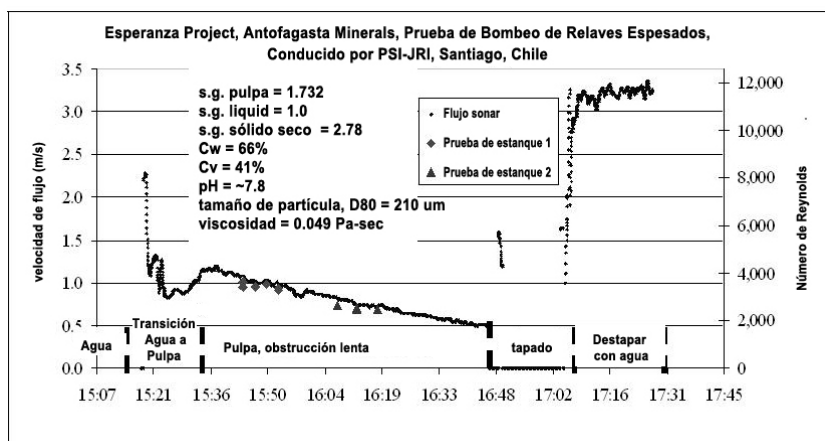
La presencia de aire arrastrado o contenido de vacío de gas reducirá directamente la gravedad específica informada por el medidor nuclear de densidad. Para poder obtener la medición correcta de densidad de la pulpa misma, la fracción vacía de gas debe ser medida y utilizada como un factor de corrección. 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 aumentaba la tasa de inyección de aire, mostrada como el valor estándar de pies cúbicos por hora en la Figura 13, el resultado del medidor nuclear de densidad disminuía, como se observa en la línea continua 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 13** Corrección al medidor nuclear de densidad utilizando un flujómetro basado en arreglo sonar

### 3.6 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 Figure 14 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 una disminución lenta adicional hasta que la cañería completa se obstruyó a 0,5 m/s. Luego la cañería fue destapada y limpiada con flujo de agua, como se muestra. Esta secuencia muestra 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.



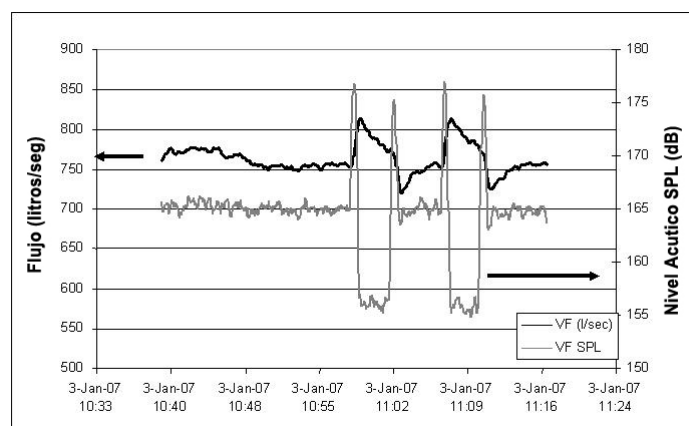
**Figura 14 Prueba de pulpa espesada realizada para Antofagasta Minerals, Chile con medición de flujo utilizando flujómetro de arreglo y que muestra la precisión verificada a través de pruebas de estanque lleno y la capacidad de operar a velocidades de flujo por debajo de las especificaciones.**

## 4 Nuevas capacidades de medición

La tecnología de arreglo sonar se aplica a otras capacidades de medición. Muchas de estas características pueden ser implementadas en el mismo componente utilizando sólo un cambio de software. Al usar sensores pasivos en la implementación de componentes como sensores acústicos, es posible monitorear las cañerías para determinar la existencia de rupturas, movimientos en las válvulas y cavitación de bombas, fallas inminentes u otros diagnósticos del equipo. Algunas de estas capacidades están siendo desarrolladas y algunas de ellas, como el monitoreo de movimiento de válvulas en las estaciones de derivación, ya han sido incorporadas al medidor. La medición de la velocidad del sonido ha sido utilizada no sólo para determinar la cantidad de aire arrastrado sino también para distinguir entre el flujo de pulpa y el flujo de agua en operaciones de coladas. Algunas nuevas capacidades de medición requieren un componente especializado. Un ejemplo de esto es el perfil de flujo y detección de arenas. Utilizando una configuración diferente de componentes, el perfil de flujo en una cañería horizontal puede ser determinado llevando entonces a la detección de arenas que pudieran provocar obstrucción de cañerías.

### 4.1 Análisis acústico para monitoreo de cañerías y válvulas

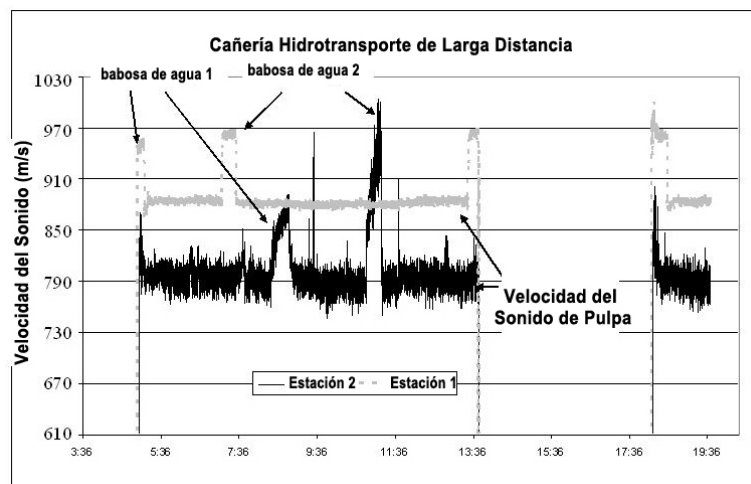
Durante el curso de la medición de flujo, el flujómetro basado en arreglo sonar desarrollado por CiDRA detecta los niveles acústicos dentro de la cañería. Al monitorear estos niveles acústicos sobre las frecuencias seleccionadas, se puede obtener información adicional sobre los eventos que ocurren en una cañería. 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 15 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 15 Medición de flujo y de nivel acústico para el movimiento de válvulas en una estación de regulación**

## 4.2 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 (~70 bar) en la descarga de una bomba de gran desplazamiento positivo sin detener el proceso.



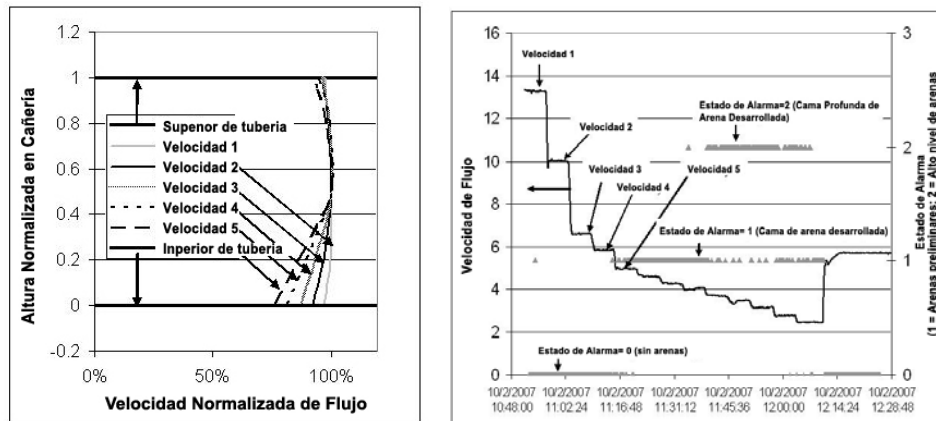
**Figura 16 Detección de Bolsas de Agua que separan las cargas de concentrado en la línea de hidrotransporte en dos diferentes ubicaciones en la cañería.**

## 4.3 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 tasas de flujo sobre cierto valor calculado o determinado empíricamente. Desafortunadamente, los modelos incompletos y los cambios en las propiedades de la pulpa, tales como viscosidad y cambios en la distribución del tamaño de partícula (PSD), 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 ella 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. Los resultados de las pruebas realizadas a este instrumento se pueden observar en la Figura 17. 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 la condición donde ha ocurrido un “bloqueo por arena”, aunque 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 17.



**Figura 17 (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)**

## 5 Resumen

Los medidores de arreglo sonar han demostrado nuevas ventajas en las mediciones de flujo y nuevas capacidades de medición. Actualmente esta tecnología se ha introducido en catorce países en cuarenta y cinco faenas mineras con más de 300 medidores ya instalados. Las ventajas de esta tecnología de medición única han sido descritas en este documento para aplicaciones que incluyen los relaves espesados, altos niveles de aire arrastrado, cañerías de alta y baja presión, detección de filtración y pulpas con contenido de mineral magnético. Además de realizar mediciones exactas del flujo bajo condiciones difíciles, esta tecnología tiene la capacidad de realizar otros tipos de mediciones. Se describieron algunas de estas mediciones, incluyendo el monitoreo acústico de los movimientos de válvulas, distinción entre pulpa y agua en una cañería y aire arrastrado.

## 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, Anglo American Chile y Antofagasta Minerals PSI-JRI Ingeniería Ltda. y Kemess Mine. Los autores desean agradecer a Antofagasta Minerals S.A. y PSI-JRI de Santiago, Chile por permitir la inclusión de la información sobre relaves espesados. 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 y Mark Fernald y Tim Bailey por realizar las pruebas de determinación de perfil de velocidad.

## Referencias

- Gysling, D. y Mueller, E. (2004) Application of Sonar-Based, Clamp-on Flow Meter in Oilsand Processing, ISA 2004 Exhibit and Conference.
- Gysling, D., Loose, D. and van der Spek, A. (2005) Clamp-on, Sonar-Based Volumetric Flow Rate and Gas Volume Fraction Measurement for Industrial Applications, Flomeko 2005 Conference.
- Wang, Z. and Nur, A. (1991) Ultrasonic velocities in pure hydrocarbons and mixtures, J. Acoustic Society of America, 89, pp. 2725-2730.
- Wood, A. (1930) Textbook of Sound, 1st Edition.