

APLICACIÓN DE TECNOLOGÍA SONAR PASIVA EN SITUACIONES DE MEDICIÓN DE FLUJO EN EL PROCESAMIENTO DE MINERALES

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

Extracto

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 en 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. Algunos ejemplos de estos problemas incluyen mediciones de flujo en líneas de espuma y de alimentación de flotación con aire arrastrado, líneas de pulpa con magnetitas y otros minerales magnéticos, líneas de pulpas con materiales abrasivos o corrosivos, líneas de alta presión y líneas con presencia de acumulación de descamaciones en su interior. También se cubrirán

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. Primero enfoquémonos en las

Robert Maron, CiDRA Corp., Wallingford, CT

Paul Rothman, CiDRA Corp., Wallingford, CT

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

aspectos relacionados con el desarrollo de tecnología reciente.

Introducción

La industria de procesamiento de minerales enfrenta diversas condiciones y ambientes de control de proceso únicos y llenos de desafíos. En términos de medición de flujo, muchas de estas situaciones no están siendo adecuadamente cubiertas por los flujómetros tradicionales tales como medidores ultrasónicos, medidores magnéticos, medición por turbina, medidores de placas de orificio, medidores de flujo de vórtice, Coriolis y Tubo de Venturi. Se ha desarrollado una nueva clase de flujómetro que opera bien en estas situaciones tan particulares y resuelve los problemas de medición de flujo. Esta nueva tecnología de medición de flujos utiliza algoritmos de proceso sonares y un arreglo de sensores pasivos para medir no sólo el flujo, sino también la composición del fluido. La 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.

Principio de Operación

interferencias que convectan con el flujo. Las interferencias o alteraciones que convectan con el flujo pueden corresponder a variaciones de densidad, de temperatura o remolinos turbulentos. La inmensa mayoría de los flujos industriales tendrán remolinos turbulentos haciendo convección con el flujo,

proporcionando de esta manera excelentes medios para medir la tasa de flujo como se describe más adelante.

Remolinos Turbulentos y Velocidad de Flujo

En la mayoría de las aplicaciones de medición de flujo en el procesamiento de minerales el flujo dentro de la cañería será turbulento. 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, los remolinos se disgregan en cada vez más pequeños vórtices hasta que se transforman en lo suficientemente diminutos como 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 promediadas de todos los vórtices, se puede obtener una medición que es cercana a la velocidad promedio del flujo.

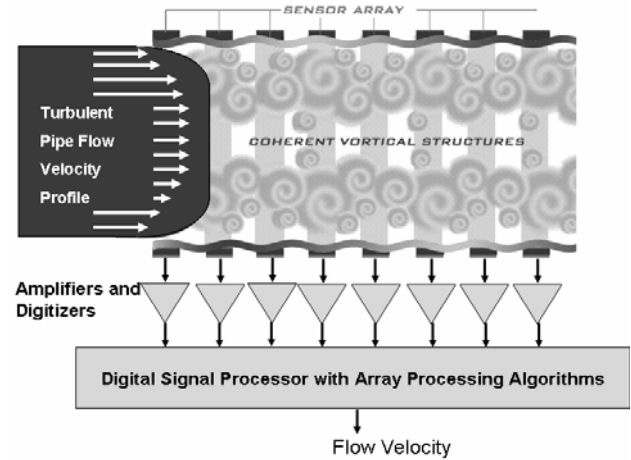


Figura 1. Diagrama de cañería con flujo turbulento donde se muestra un perfil de flujo completamente desarrollado y los remolinos turbulentos.

Medición de Velocidad de Flujo a través del Arreglo de Sensores

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

- El movimiento de los remolinos turbulentos crea un leve cambio de presión en el interior de la pared de la cañería
- Este pequeño cambio de presión resulta en una presión dinámica de la pared misma (**Figura 1** 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 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 generalmente será mucho menor que la presión dinámica proveniente de las vibraciones de una cañería y las ondas acústicas que se propagan en el fluido. La fortaleza de la habilidad del algoritmo de proceso es su capacidad de aislar y medir las velocidades de estos diferentes componentes, incluyendo la débil señal de los remolinos turbulentos que convectan, y las fuertes señales provenientes de las ondas acústicas y vibraciones. La velocidad de las ondas acústicas se usa para calcular la composición del fluido o la cantidad de aire arrastrado (fracción libre de gas), siendo estos dos últimos temas analizados en otro documento.

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 fuerza de la señal proveniente del flujo contra los niveles de energía de respaldo. Se genera un factor de calidad que va de 0 a 1,0, considerando que para cualquier medición de flujo, un factor de calidad por sobre 0,1 a 0,2 (dependiendo de la aplicación) otorga 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. La cañería debe estar llena pero puede contener aire arrastrado en forma de burbujas bien mezcladas.

Calibración y mantención

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.

Dado que la medición de flujo 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 2** se muestran fotos de la liviana banda del sensor.

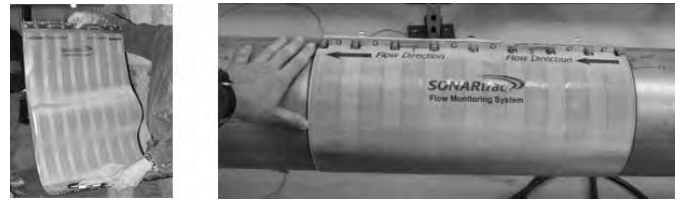


Figura 2 Fotos de la banda del sensor con elementos de sensor

La estabilidad del reloj supera el 0,01% y por lo tanto es 50 veces mejor que la necesaria para mantener el flujómetro en la precisión típica de +/- 1% 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 no puede ser negado. En la **Figura 3** se puede observar los resultados al aplicar los mismos coeficientes de calibración a seis flujómetros, todos del tipo 6 pulgadas y todos probados en una instalación trazable NIST. Como se puede ver, la variación de medidor a medidor es muy pequeña, dentro de 0,5% y se debe agregar la ventaja de que no cambiará en el transcurso del tiempo.

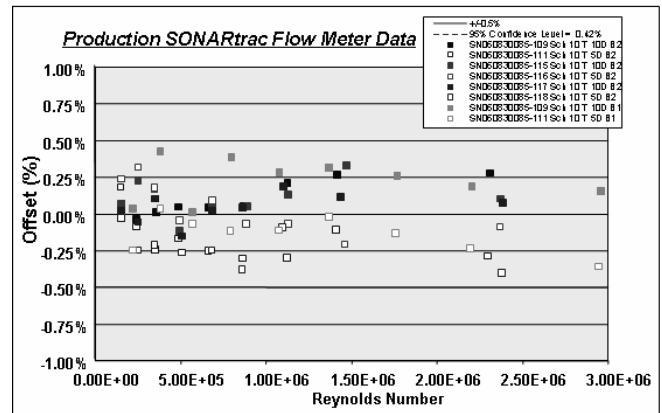


Figura 3 Ilustración de Consistencia de Calibración de Medidor a Medidor. Todos los medidores tienen los mismos coeficientes de calibración

Aplicación de la Tecnología Basada en Arreglo de Sensores para Resolver Problemas de Medición de Flujo Volumétrico

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

Medición de Flujo en Procesos Continuos donde la Seguridad y la Operación Libre de Mantenimiento son Fundamentales

Una planta de proceso industrial como una refinera de alúmina o un concentrador de cobre mide sus resultados según su tasa de producción anual a la vez que cumple los objetivos de costos, seguridad y calidad del producto. Estos requerimientos obligan a la gerencia de planta a tomar complejas decisiones relacionadas con cuánto monitorear su proceso y luego, cómo ejecutarlo. Estas decisiones deben considerar elementos tales como precisión, costo de capital, costo de instalación, tiempo de detención del proceso, costos de mantención, seguridad, capacitación y recursos humanos. Las soluciones que cumplan con los requerimientos de desempeño, se instalen sin detención del proceso y ofrezcan una operación sin necesidad de mantención, serán consideradas en primer lugar. El Flujómetro Sonar es un aparato que ha sido diseñado para cumplir con todos estos requerimientos.

Dado que la banda del sensor y la cubierta van montadas en el exterior de la cañería, no es necesario detener el proceso para realizar la instalación. Esto también significa que no hay temas de seguridad involucrados por la apertura de la cañería de proceso o la limpieza de las conexiones a presión. La instalación es

fácil, como se aprecia en la **Figura 4** y generalmente demora unas dos horas. La instalación se realiza arenando suavemente la cañería para luego asegurar la banda e instalar la cubierta del sensor. No se necesita gel de acoplamiento y los sensores no requieren alineación.



Figura 4 Procedimiento de Instalación a) Preparación de cañería b) Banda del sensor c) Instalación de la banda en la cañería d) Instalación de la cubierta del sensor

Las refinерías de alúmina generalmente usan un proceso que ellos llaman Bayer para extraer la alúmina del mineral de Bauxita. Este proceso se basa en el uso de soluciones cáusticas calientes para disolver y precipitar la alúmina. Por lo tanto, en esos casos, existen cañerías que transportan soluciones cáusticas calientes a través de toda la planta. Tradicionalmente estas plantas usan placas de orificio y transductores de presión para medir la tasa de flujo. Esto impone exigentes requerimientos de mantención y seguridad para el equipo de trabajo encargado de la mantención. En la **Figura 5** se puede ver un ejemplo del uso de la placa de orificio.



Figura 5 Medidor de flujo de placa de orificio y tipo invasivo con conexiones de presión.

El equipo de trabajo encargado de la mantención generalmente limpiará las conexiones de presión una vez por turno para asegurarse de que las líneas se mantengan libres de suciedad. Cada vez que ellos realizan esta acción corren el riesgo que implica la exposición del técnico a la solución cáustica caliente. Esto constituye un gran costo anual de mantención y también correr riesgos innecesarios en materias de seguridad. Los beneficios del Flujómetro Sonar que no necesita mantención han sido probados en diferentes refinерías a través del mundo y han permanecido en servicio por varios años.

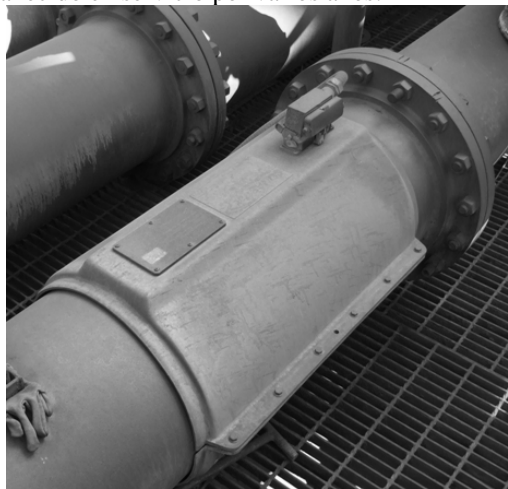


Figura 6 Flujómetro basado en arreglo sonar no invasivo

En la industria de la minería, la operación de molienda en las plantas concentradoras es continua para lograr capitalizar los altos precios del mineral. El mineral es chancado finamente y clasificado con hidrociclones. Las líneas de alimentación a las baterías de hidrociclones están en la principal arteria del proceso que transporta la pulpa de mineral y agua. Si una de estas líneas se detiene, la tasa de producción se reduce proporcionalmente. Por lo tanto, esta condición se evita a toda costa. Tradicionalmente se utilizan dispositivos de medición en línea para medir la tasa de flujo volumétrico que alimenta la batería de hidrociclones. Estos aparatos están en contacto con la pulpa, que es altamente abrasiva y necesitan recibir mantención regularmente. Este ciclo de mantención tendrá un promedio de 6 meses a 5 años, dependiendo del cuerpo del mineral y la velocidad de la pulpa.



Figura 7 Medidor magnético dañado con la pulpa



Figura 8 Flujómetro basado en arreglo sonar muestra vida útil > Cañería

El reemplazo de un aparato instalado en la línea puede tomarle a una cuadrilla unas ocho horas y requerirá de equipo de levantamiento. Durante ese tiempo el proceso está detenido y se sacrifica la producción. La instalación o reemplazo del medidor sonar no requiere que el proceso sea detenido.

Mediciones de Flujo Precisas con Medio No Invasivo en Aplicaciones 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 salida de la carga. 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 la segunda estación del flujómetro. Una foto de la instalación de alta presión (**Figura 9**) muestra cómo la característica de instalación externa del flujómetro se adapta para conseguir tanto una instalación como una operación segura.



Figura 9 Seguridad en líneas de alta presión (>1000 psi, >70 bar)

Las mediciones de flujo resultantes, como se aprecia en la **Figura 10**, 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% aproximadamente, lo que está dentro también de las especificaciones de los medidores y los requerimientos de la planta.

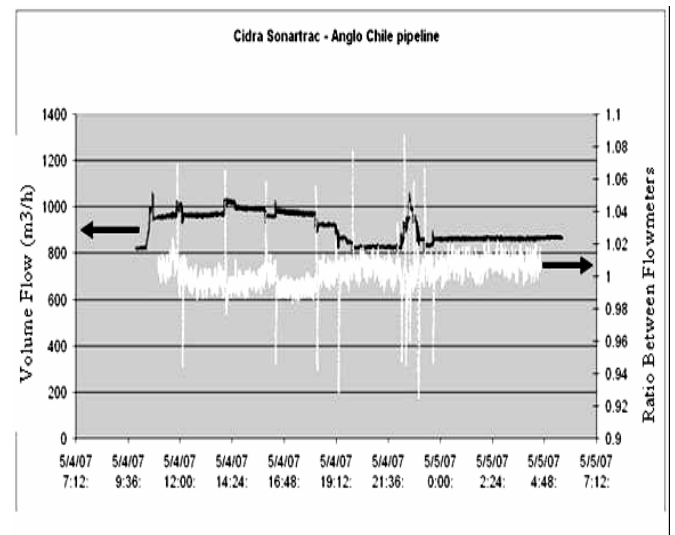


Figura 10 Detección de filtración con medidores de flujo basados en arreglo sonar. Las líneas oscuras que se traslapan corresponden a los resultados del medidor de flujo. La línea clara corresponde a la razón entre los dos resultados.

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 descenso. La mayoría de los flujómetros presentarán alteraciones con el tiempo y/o 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 11** 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.

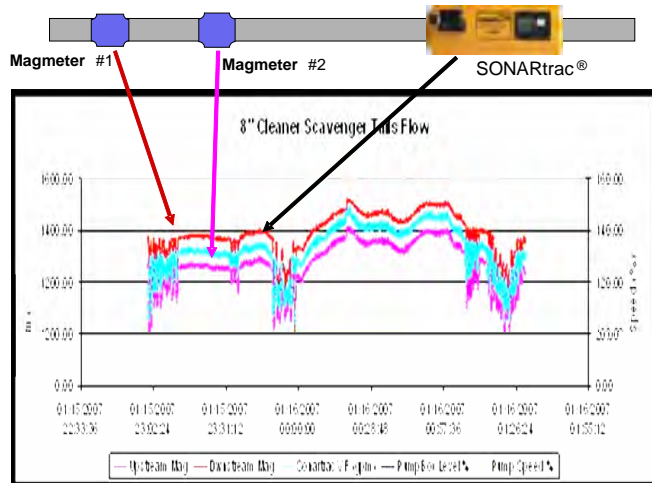


Figura 11 Dos medidores magnéticos en serie con medidor de flujo basado en arreglo sonar

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.

Medición de Flujo en Cañerías con Acumulación de Descamación en sus Paredes

Una situación común en las líneas de aguas duras, líneas de depuradores, líneas de bauxita y líneas transportando cal, es la acumulación de descamaciones en el interior de las paredes de la cañería. Esta acumulación puede variar desde una capa delgada hasta una de varias pulgadas de espesor, dependiendo del material de la cañería y su revestimiento, la composición del fluido, la tasa de flujo y el intervalo entre las actividades de mantención realizadas para remover tales acumulaciones. El impacto de la acumulación de descamaciones en la mayoría de los medidores de flujo varía desde poco, como un aumento en el ruido, a mucho, como una variación en la medición informada del flujo o una falla completa del medidor por la cual simplemente no informa flujo alguno. Ningún medidor de flujo es realmente inmune a los efectos de acumulación de descamaciones, pero aquellos que generalmente se usan en el procesamiento de minerales, como por ejemplo los medidores magnéticos y los de ultrasonido, son particularmente sensibles.

El Impacto de la Acumulación de Descamaciones en los Flujómetros Electromagnéticos y de Ultrasonido

En los medidores de flujo por tiempo de tránsito, una onda ultrasónica inyectada dentro del fluido debe viajar entre dos transductores utilizando la curvatura conocida o refracción de la onda de ultrasonido en la interfaz del fluido de la cañería. El impacto de la descamación en este medidor tiene tres efectos: 1) atenuación de la señal ultrasónica en la descamación, 2) dispersión de la señal de ultrasonido en la descamación hacia la interfaz del fluido y 3) cambio en el ángulo de refracción en la descamación hacia la interfaz del fluido.

Los medidores de flujo de ultrasonido Doppler operan con un principio diferente a los flujómetros por tiempo de tránsito y su disposición del transductor difiere también, sin embargo sufren los mismos problemas a causa de la descamación. Sin embargo, aun cuando el cambio en el ángulo de refracción puede no necesariamente causar que la señal de ultrasonido de un transductor pierda el segundo transductor, ciertamente provocará cambios en el flujo informado. La conversión de la frecuencia Doppler a una lectura de flujo requiere que el instrumento conozca el ángulo existente entre la dirección de propagación de la onda ultrasónica y la dirección axial de la cañería. La descamación cambiará este ángulo produciendo una lectura errónea de flujo.

Los medidores magnéticos operan utilizando la interacción de un campo magnético con un fluido conductor para crear un campo magnético dentro del fluido. A su vez, el campo eléctrico es detectado y medido por un par de electrodos ubicados en lados opuestos del interior de la cañería. La acumulación de descamación sobre los electrodos los aislará eléctricamente evitando que el medidor de flujo pueda leer el voltaje inducido por el flujo. El único recurso es detener el proceso o diferir el flujo, retirar el medidor magnético y eliminar la acumulación de descamaciones.

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

La tecnología de arreglo sonar pasivo no descansa en el contacto de ningún electrodo con el flujo ni en la inyección o recuperación de una señal dentro del fluido. Las señales de presión inducidas por los remolinos turbulentos simplemente presionan la acumulación de descamación, que a su vez presiona la pared de la cañería y luego los sensores. El impacto de la acumulación de descamaciones es que la dureza o rigidez efectiva de la cañería puede aumentar, lo que reducirá la magnitud de la presión. Dado que la magnitud absoluta no se usa en el cálculo del flujo, no se produce cambio en la medición de la velocidad del flujo. Como la mayoría de los medidores de velocidad, el medidor de flujo de arreglo sonar usa el área seccional cruzada interior efectiva de la cañería para convertir la velocidad en flujo volumétrico. La acumulación de descamaciones reducirá el área de sección cruzada interior requiriendo algunos ajustes al valor de diámetro interior ingresado en el transmisor. La diferencia es que, distinto de los flujómetros de generación anterior, como los medidores magnéticos, medidores de ultrasonido, medidores basados en presión diferencial, etc. el flujómetro basado en arreglo sonar seguirá operando y eliminará los períodos de "operación en ciego" que tiene que atravesar el operador en esos puntos de medición.

Esta tecnología ha sido probada en diferentes tipos de cañerías con acumulación de descamaciones de depuradores de agua, licor verde de bauxita y cal. En la **Figura 12** se muestra un ejemplo de capacidad de operar en presencia de acumulación de descamaciones. En este caso un medidor de flujo sonar está operando en una cañería de 18 pulgadas que está alimentando agua al molino de bolas. Basados en limpiezas anteriores realizadas al medidor magnético, se estima que la cañería tiene una acumulación de unas dos pulgadas (5 cm) de descamación de cal. Flujo abajo del medidor existe un medidor magnético que se limpia cada cierta cantidad de meses para eliminar la descamación acumulada en los electrodos y permitir así al medidor funcionar

nuevamente. Esta operación demanda un trabajo intenso, provoca pérdida de las mediciones de fracción de gas por volumen y descansa en un sistema de derivación para evitar la detención total del proceso. Lamentablemente, la válvula utilizada para derivar el flujo está desarrollando problemas por causa de la acumulación de descamaciones, limitándose entonces su vida útil. Como se puede observar en la figura, ambos medidores de flujo muestran similitud en los niveles de ruido, en las respuestas a los cambios de tasa de flujo y similares resultados. La diferencia está en los requerimientos de mantención y el tiempo que debe dejarse de medir el flujo.

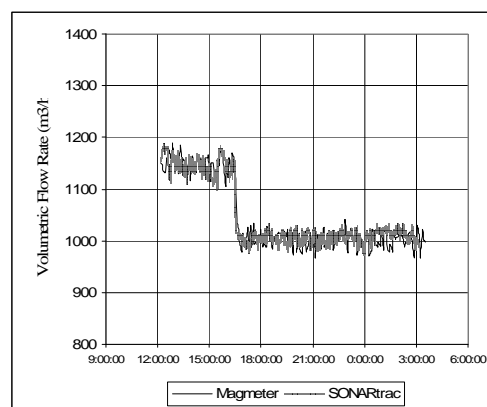


Figura 12 Operación de flujómetro basado en arreglo sonar en una cañería de agua con acumulación de descamaciones de dos pulgadas. Se muestra la comparación con medidor magnético recientemente limpiado.

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 magnético 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 13** se ilustra un ejemplo en el que se compara un flujómetro de arreglo sonar con un medidor magnético. 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.

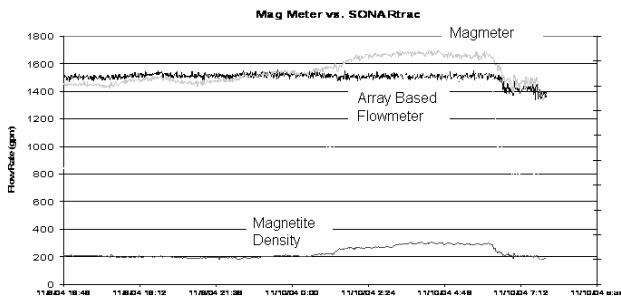


Figura 13 Los medidores magnéticos responden erróneamente a la magnetita mientras que el flujómetro de arreglo sonar entrega lecturas correctas

Medición de Flujo Volumétrico en Presencia de Aire Arrastrado

En la mayoría de los casos, los ingenieros en las plantas desconocen la cantidad de aire arrastrado dentro de la pulpa de sus procesos. No importa si se ha puesto el mayor cuidado en el diseño de la planta, el aire puede ingresar a la pulpa a través de diversas fuentes, incluyendo filtraciones en el lado de succión de las bombas, bajos niveles en los colectores, descarga dentro de un depósito o desde los hidrociclones y los molinos. No sólo puede la misma cabeza de sensor y el transmisor medir el flujo volumétrico en presencia de altos niveles de aire arrastrado, sino, como se mencionó anteriormente, puede medir la cantidad de aire arrastrado. Esta última habilidad es tema de otro documento.

En términos de medición de flujo volumétrico, la mayoría de los flujómetros resultan afectados en forma muy adversa por el aire arrastrado dentro de un líquido o pulpa. 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. Algunas de estas situaciones relacionadas con la presencia de aire arrastrado y su solución utilizando la tecnología basada en arreglo de sensores, se describen en las siguientes secciones.

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®) 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 14**. La tecnología no invasiva mide estas pulpas abrasivas con mucha precisión y sin períodos de detención de proceso causados por la mantención del medidor de flujo.

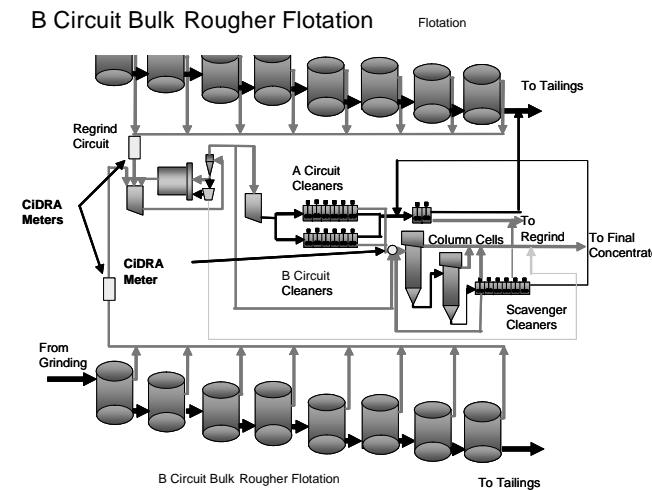


Figura 14 Hoja de Flujo de Kemess Mills mostrando la ubicación de tres medidores de flujo CiDRA con tecnología basada en arreglo sonar

Kemess también usa la capacidad 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.

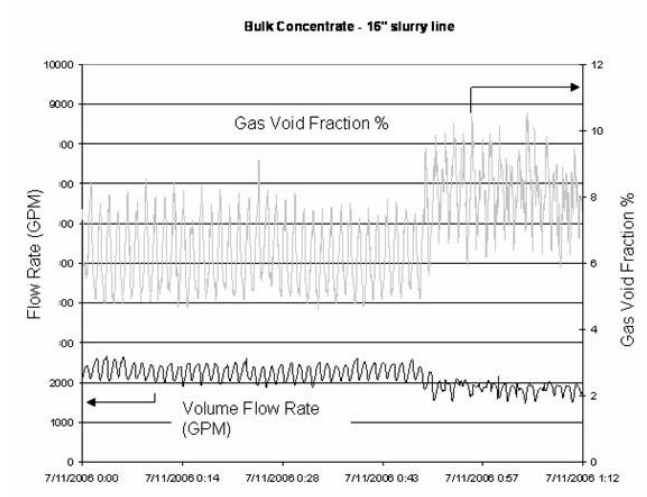


Figura 15 Mediciones de flujo y aire arrastrado (Fracción vacía de gas %) muestran el impacto de la presencia de aire en la tasa de flujo

Los niveles de aire arrastrado varían de 8% a 0,1% en las líneas de alimentación de flotación, como se observa en la **Figura 16**. 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. También, 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.

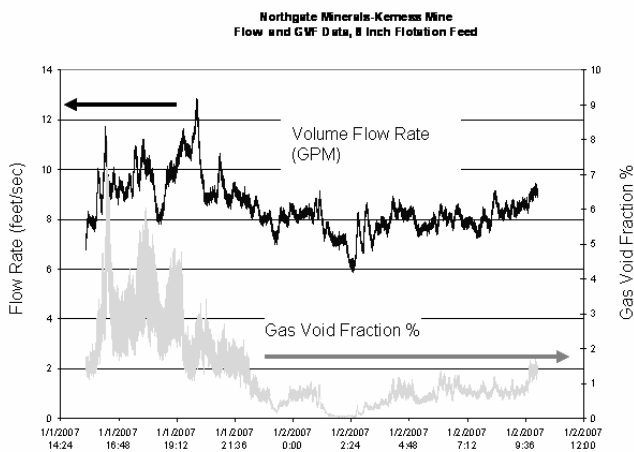


Figura 16 Línea de alimentación de flotación y niveles variables de aire medidos por instrumentación basada en arreglo sonar

El medidor basado en arreglo sonar se usa como un punto de control en el sistema experto de control de flotación y permite al operador maximizar el resultado. Así, el flujómetro con arreglo sonar entrega precisión de flujo y características de pulpa que permiten mejorar la operación del sistema de flotación.

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. Así, es muy difícil para la generación anterior de flujómetros tales como medidores magnéticos o de ultrasonido, poder medir con precisión del flujo e incluso operar en este tipo de aplicaciones. Aun cuando se use un estanque para recolectar el rebalse de la flotación y permitir así que algo de aire se escape, la cantidad que permanece es todavía demasiado alta para los flujómetros de generación anterior. Un impacto secundario es que 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. Un flujómetro basado en arreglo sonar se utilizó en esta aplicación para resolver ambos problemas. El medidor no sólo midió robustamente el flujo volumétrico sino que también midió la cantidad de aire arrastrado (fracción vacía de gas %). Esto queda ilustrado en la **Figura 17**. Otros casos en la misma instalación demuestran su habilidad para medir el flujo volumétrico con porcentajes de fracción vacía de gas incluso mayores.

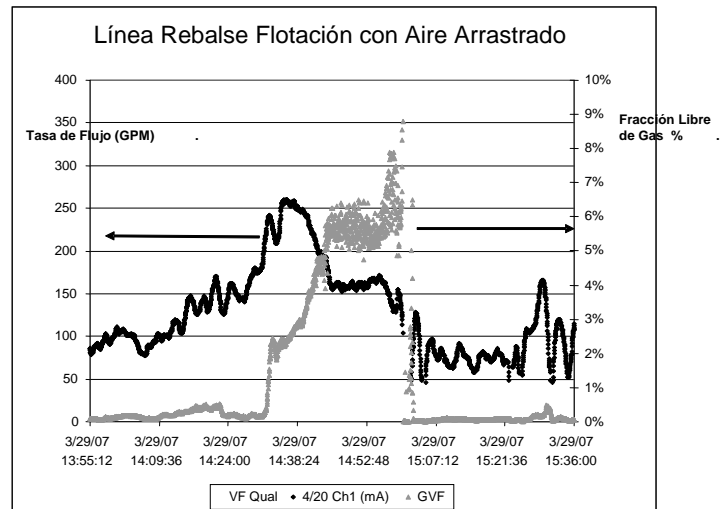


Figura 17 Solución a los problemas en la medición de flujo en presencia de aire arrastrado (Fracción vacía de gas) en un circuito de rebalse de flotación

Medición Adicional

La tecnología de arreglo sonar ha conducido al desarrollo de una plataforma de componentes que dan soporte a muchas otras capacidades de medición. Éstas incluyen el monitoreo acústico de las cañerías y el equipo así como la determinación de la estratificación de las pulpas y la formación de arenas. En otro documento se analizan otras características y capacidades de medición relacionadas con el aire arrastrado y la separación de pulpa/agua.

Monitoreo de Movimiento de Válvula

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 18** 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 regulación. 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.

Por lo tanto, el medidor entrega no sólo la tasa de flujo de la pulpa sino también la verificación de que las válvulas han cambiado de posición. Esto resulta particularmente importante en situaciones que requieren monitoreo remoto y verificación de eventos críticos.

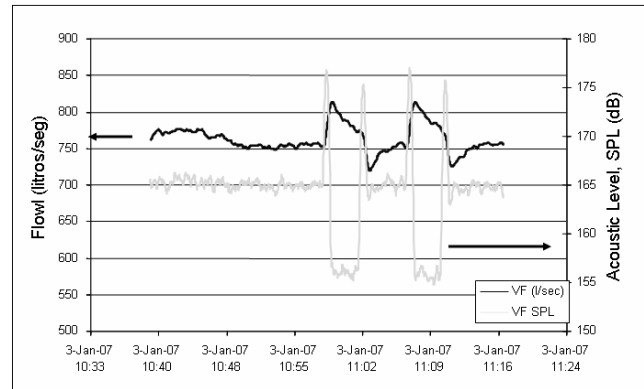


Figura 18 Medición de flujo y de nivel acústico para el movimiento de válvulas en una estación de regulación

Perfil de Velocidad y Detección de Arenas

Un problema fundamental que acompaña a los operadores de cañerías de hidrot transporte es la posibilidad de que algún material sólido se asiente en el fondo de la cañería provocando su 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, como se muestra en la **Figura 19**. A través de un instrumento diferente que incluye un sensor cuya ingeniería fue especialmente desarrollada y múltiples unidades de procesamiento, se puede medir el flujo en las alturas de la cañería.

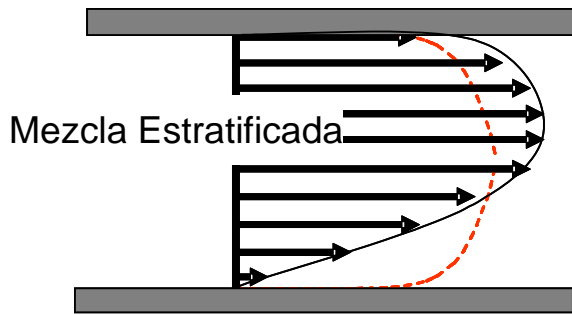


Figura 19 Ilustración del cambio de perfil de flujo ocurrido durante la formación de un "bloqueo por arena".

Los resultados de las pruebas realizadas a este instrumento se pueden observar en la **Figura 20**. 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".

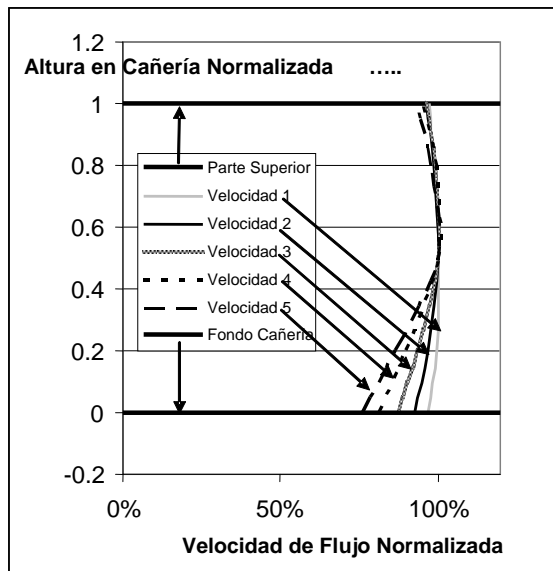


Figura 20 Perfiles de velocidad a diferentes tasas de flujo. Note la caída de velocidad en el fondo de la cañería a tasas de flujo más bajas.

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" pero 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 se ilustra en la **Figura 21**.

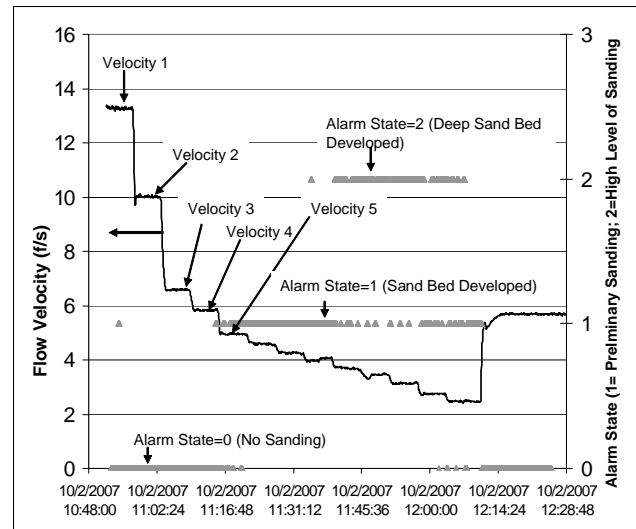


Figura 21 Velocidad de Flujo y Condición de Alarma para bajo nivel de arenas (Nivel de Alarma=1) y alto nivel de arenas (Nivel de Alarma=2)

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 flujómetros basados en arreglo sonar se instalan en todo el mundo en muchas aplicaciones industriales y se ajustan idealmente a un amplio rango de usos 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 que pueden ser también logradas por los flujómetros de generación anterior, la tecnología de arreglo sonar puede medir el flujo en situaciones en que las tecnologías de los otros medidores fallan. Las situaciones mencionadas incluyen la presencia de pulpas con mineral magnético, acumulación de descamaciones, pulpas abrasivas, altas presiones y aire arrastrado.

La tecnología de arreglo sonar del SONARtrac® junto con su sistema de abrazadera, constituye una plataforma escalable que es más que una simple tecnología de flujo. Tiene la habilidad y la capacidad de entregar diversas mediciones de valor agregado y otra información del proceso como velocidad del sonido, aire/gas arrastrado, retención de gas, perfil de velocidad y niveles acústicos.

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 Kemess Mine, además de todos aquellos no expresamente mencionados. Los autores desean agradecer también el trabajo realizado por los miembros del equipo de procesamiento de minerales de CiDRA, incluyendo a Tim Griffin por el análisis de los datos y la ejecución de las pruebas con medidor nuclear de densidad y a Mark Fernald y Tim Bailey por las pruebas de perfil de velocidad.