

## **NUEVOS DESARROLLOS EN LA CAPACIDAD DE MANEJAR FLUJOS Y CAÑERÍAS A TRAVÉS DE UNA NUEVA MEDICIÓN DE PERFIL DE VELOCIDAD E INSTRUMENTACIÓN DE MONITOREO DE DESGASTE DE LA PARED DE CAÑERÍAS**

*Christian O'Keefe, CiDRA Minerals Processing, Inc., Wallingford, CT*

*Robert Maron, CiDRA Minerals Processing, Inc., Wallingford, CT*

*Mark Fernald, CiDRA Corporate Services, Inc., Wallingford, CT*

*Timothy Bailey, CiDRA Corporate Services Inc., Wallingford, CT*

*Alex van der Spek, ZDOOR, Róterdam, Holanda*

*Michael Davis, CiDRA Corporate Services Inc., Wallingford, CT*

### **Resumen**

Se describirán nuevos desarrollos en la medición no invasiva del perfil del flujo de pulpa en tiempo real en cañerías horizontales. Esta información puede utilizarse para determinar la aproximación y el inicio de la deposición de sólidos en el fondo de la cañería. Al tener esta información en tiempo real se puede operar a velocidades menores o con mayor concentración de sólidos, o ambos, a la vez que se evita la deposición de sólidos o la obstrucción y los costos operacionales asociados.

Además, se han hecho avances en la medición y tendencia del desgaste de cañerías en las líneas de pulpa. En contraste con los métodos manuales, el sistema de CiDRA usa un anillo de transductores de ultrasonido adaptables que se abrazan al exterior de la cañería y permanecen permanentemente o semi-permanentemente instalados. Estos transductores se usan para medir el espesor de la cañería por debajo de sus respectivas posiciones. Esto resulta en una mejor capacidad de repetición, precisión y predicción de falla junto con la reducción de los costos por mano de obra. El beneficio que se obtiene es un mejor monitoreo del desgaste de la cañería en las líneas con sólidos abrasivos. Con esto se mejora la capacidad de asegurar una operación segura y evitar los daños ambientales causados por filtraciones derivadas del desgaste de la cañería que resultan tan costosos en términos operacionales.

### **Introducción**

Históricamente, las mediciones de flujo en la industria de procesamiento de minerales han sufrido limitaciones impuestas por la tecnología de los flujómetros existentes incluyendo los

instrumentos comúnmente utilizados tales como medidores ultrasónicos, medidores magnéticos, medición por turbina, medidores de placas de orificio, medidores de flujo de vórtice, Coriolis y Tubo de Venturi. La tecnología de arreglo sonar para la medición de flujo, que ingresó a la industria del procesamiento de minerales hace unos cuatro años atrás, ha superado muchas de estas limitaciones. El desarrollo de esta tecnología comenzó hace unos diez años atrás con el objetivo específico de obtener un sistema no invasivo de medición de los flujos de fases múltiples en la industria del petróleo. Posteriormente se adoptó la misma tecnología en la industria del procesamiento de minerales donde ha experimentado una rápida adhesión.

La tecnología específica del sensor, basada en la disposición de sensores piezoeléctricos, proporciona capacidades únicas de medición. La primera de éstas es la capacidad de medir en forma no invasiva las tensiones localizadas en las paredes de las cañerías. Combinado con los algoritmos de proceso de arreglo sonar, el arreglo de tales sensores puede medir las velocidades del flujo dentro de una cañería. Utilizando este principio, grupos de estos sensores en arreglo axial, en diferentes puntos de la circunferencia de una cañería, pueden medir diversas velocidades de fluido a diferentes alturas en la cañería, entregando de esta forma un perfil de velocidad en tiempo real.

Una segunda aplicación de esta tecnología basada en un sensor piezoeléctrico utiliza nuevamente el arreglo circunferencial de sensores de película piezoeléctrica permanentemente instalados, pero sin los componentes del arreglo axial. Al estimular activamente los sensores de película piezoeléctrica, se pueden obtener múltiples mediciones del espesor de la pared de la cañería en un único punto, entregando así medios muy precisos y repetibles para monitorear el desgaste de la cañería causado por el flujo de pulpa abrasiva.

## Medición No Invasiva del Perfil de Velocidad

### *Principio de Operación para Medición de Flujo Basada en Arreglo Pasivo Utilizando los Algoritmos de Procesamiento Sonar*

Los medidores de flujo basados en arreglos sonares rastrean y miden las velocidades promedio de las alteraciones coherentes que se desplazan en dirección axial en 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 – flujo líquido), propagación en el fluido o pulpa (velocidad de rango medio - acústicos) y propagación en las paredes de la cañería (la mayor velocidad - vibraciones). Los medidores con arreglo sonar discriminan entre los tres modos principales de propagación 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 variaciones de densidad, variaciones de temperatura, remolinos turbulentos u otros fenómenos. Dentro de la mayoría de los procesos industriales, la turbulencia es la interferencia más común. Los remolinos turbulentos, o vórtices, existen en forma natural en los sistemas de flujo donde los números de Reynolds son mayores a 4000. Los números de Reynolds representan la razón entre las fuerzas inerciales y las fuerzas viscosas. Los números mayores a 4000 se consideran turbulentos y los inferiores a 2300 son considerados como laminares. Mientras mayor sea el número de Reynolds, más amplio será el rango de remolinos turbulentos dentro del flujo. El principio fundamental de la medición sonar de flujo se basa en el seguimiento de estos remolinos turbulentos mientras pasan a través de un arreglo de sensores (Gysling y Mueller, 2004). En la **Figura 1** se muestra una ilustración de estos remolinos turbulentos dentro de una cañería bajo una banda del sensor de arreglo sonar.

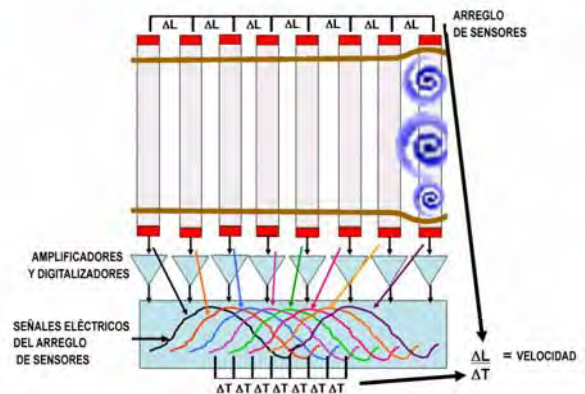


**Figura 1.** Corte ilustrativo de una cañería mostrando los remolinos turbulentos debajo de la banda del sensor de arreglo sonar

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 procesamiento. La secuencia de eventos que se produce para que esta medición sea posible, es la siguiente:

- Como estos remolinos turbulentos pasan por cualquier punto de la cañería, ejercerán una pequeña presión dinámica en el interior de la pared de la cañería.
- La tensión inducida en la pared de la cañería por causa de estas fluctuaciones de presión dinámica es convertida en una señal eléctrica a través de un sensor pasivo parcial o totalmente enrollado alrededor de la cañería (**Figura 2** - aumentado) – no se requiere gel ni líquidos de acople ya que éstas son tensiones mecánicas de baja frecuencia y no son ultrasónicas.
- La señal eléctrica única de cada recolección de remolinos turbulentos 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 separación entre los sensores del arreglo es menor que la longitud de coherencia de los remolinos turbulentos, resultando entonces en señales de voltajes similares para cada sensor del arreglo con sólo un retraso en el tiempo.
- Cuando el procesamiento de arreglo sonar se aplica a las señales de salida del arreglo, se determina la velocidad a la que estos remolinos turbulentos pasan a través del arreglo de sensores, entregando así la velocidad de propagación del líquido dentro de la cañería (Nelson, 2001).

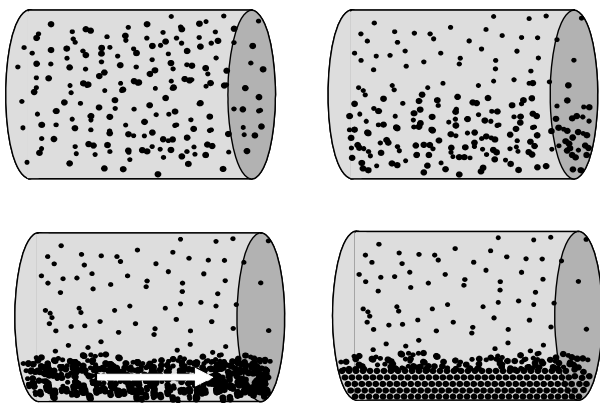
Este proceso se ilustra con una recolección de remolinos turbulentos en la **Figura 2**, pero en la práctica se aplica a gran cantidad de recolecciones de remolinos turbulentos.



**Figura 2.** Ilustración de señal detectada por sensores pasivos en un arreglo desde una recolección de remolinos turbulentos

### Perfil de Velocidad en Cañerías Horizontales

En las aplicaciones en minería y arenas asfálticas la mayor parte del transporte del producto y los relaves es realizado como pulpa. Los regímenes de flujos horizontales pueden ser clasificados en cuatro distintos grupos: Flujos homogéneos con partículas completamente suspendidas, flujos heterogéneos con todas las partículas suspendidas con lecho móvil y flujos con lecho estacionario (Cheremisinoff 1986). El régimen de flujo depende de las propiedades de la pulpa tales como el tamaño de partícula, densidad, velocidad de flujo, viscosidad y distribución de tamaño de partícula, así como también de los atributos físicos de la tubería, como el diámetro y la aspereza de la superficie. La **Figura 3** muestra la distribución de partículas para cada uno de estos regímenes.



**Figura 3** (Superior Izquierda) Flujo Homogéneo (Superior Derecha) Flujo Heterogéneo / partículas totalmente suspendidas (Inferior Izquierda) Flujo Heterogéneo – lecho móvil (Inferior Derecha) Flujo Heterogéneo – lecho estacionario

En los flujos de líquidos homogéneos totalmente desarrollados, el perfil es simétrico alrededor del eje de la cañería y no constituye peligro de desarrollar un lecho de arena que pueda potencialmente derivar en obstrucción de la cañería. En este tipo de flujo, el perfil tiene una dependencia de la posición radial. Pocos flujos de pulpa serán flujos puramente homogéneos. La mayoría de los flujos de pulpa caen dentro de la categoría de flujos heterogéneos y algunos contendrán las características de ambos, homogéneos y heterogéneos. En los flujos heterogéneos existe estratificación de sólidos con una mayor concentración de ellos en el fondo de la cañería. Para el mismo tamaño de partícula, densidad, viscosidad, distribución de tamaño de partícula y atributos físicos de la cañería, la velocidad del flujo determinará el tipo de flujo heterogéneo, es decir, si se ha desarrollado o no lecho de arena y las características del lecho de arena. En los flujos

líquidos heterogéneos, el perfil no es simétrico alrededor del eje de la cañería. En su lugar, es simétrico alrededor del eje horizontal pero asimétrico con respecto del eje vertical por causa de la distribución vertical de las partículas.

### Medidor de Perfil de Velocidad con Arreglo Sonar

El medidor de flujo estándar con abrazaderas se basa en el uso de un arreglo único de elementos múltiples que está preparado para la medición de la velocidad promedio de flujo en una cañería. Esta tecnología de tipo abrazadera ha sido extendida implementando múltiples arreglos ubicados en diferentes posiciones circunferenciales en una misma banda para medir el perfil de velocidad del líquido. Esta nueva herramienta ofrece a los operadores de proceso una herramienta de medición no invasiva que tiene la capacidad de monitorear y controlar el perfil de sus flujos de proceso. Las siguientes secciones resumen los resultados de pruebas de circuitos de flujo y pruebas en terreno realizadas en un sistema de arreglo sonar para determinación de perfiles y demuestran algunos de los beneficios potenciales, uno de los cuales corresponde a la habilidad de detectar el inicio de condiciones de bloqueo por arenas. La detección temprana de esta condición permite a los operadores aplicar oportunamente las acciones correctivas y evitar catastróficas detenciones de proceso. Además, el monitoreo del perfil puede entregar información muy útil sobre las propiedades del líquido de proceso que puede permitir a los operadores ajustar las variables de producción para optimizar el proceso.

El medidor de perfil de velocidad utiliza arreglos ubicados circunferencialmente en el exterior de la cañería, en la parte superior, a 45 grados de la parte superior, en el costado, a 135 grados desde la parte superior y en el fondo de la cañería. En la **Figura 5** se muestra la posición circunferencial del arreglo sensor. El tamaño de los elementos del arreglo, el tamaño de la cañería y la posición circunferencial de cada arreglo en la cañería, determinan la distancia vertical sobre la que se promedia el flujo para cada arreglo. Se han realizado pruebas a esta tecnología en diversas instalaciones de clientes y en puestos de investigación.

### Circuito de Flujo y Prueba Realizadas en el SRC

Se realizó una serie de pruebas en un circuito de prueba de pulpa, mostrado en la **Figura 7**, en el Centro de Tecnología de Flujos en Cañerías del Consejo de Investigación Saskatchewan (SRC) en Canadá. El alcance era someter a esta prueba las pulpas representativas de diversos procesos y en diferentes etapas del proceso. En la primera prueba con pulpa se seleccionó un tamaño de partícula de 89  $\mu\text{m}$  d50 con densidad de mezcla de 1300  $\text{kg}/\text{m}^3$ . La segunda prueba se inició con pulpa de arena más gruesa con contenido de partículas de 186  $\mu\text{m}$ . La arcilla y piedras de mayor tamaño fueron agregadas posteriormente a la mezcla. Se realizó una prueba de reducción de velocidad para cada tipo de pulpa para medir el perfil de velocidad como una función de la velocidad.

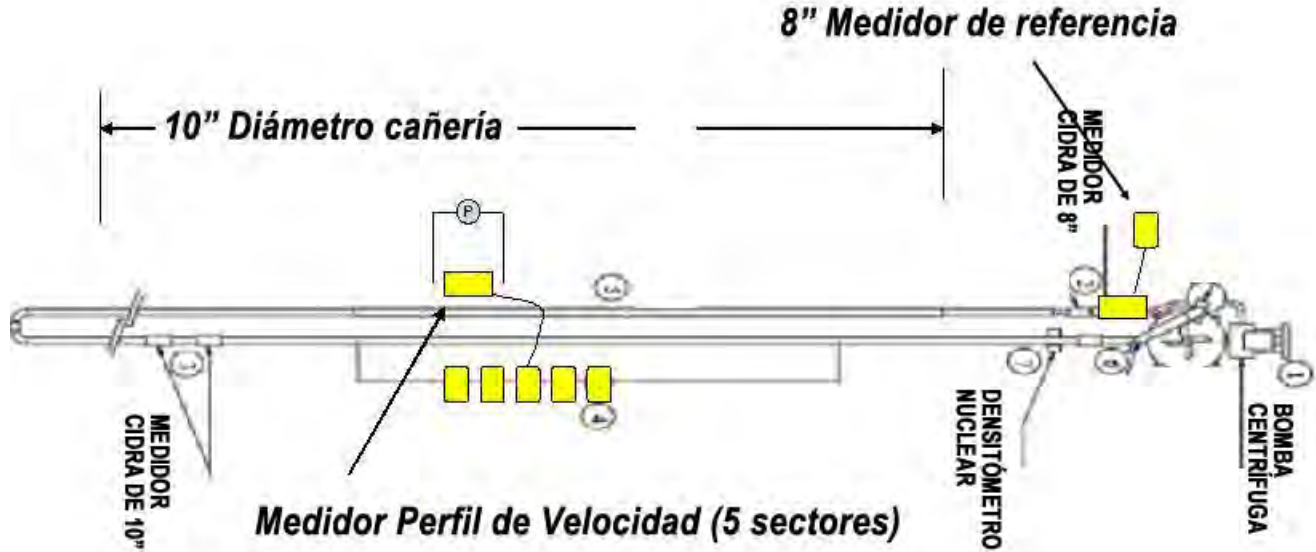


Figura 4: Circuito de prueba

#### Resultados Prueba de Pulpa – Pulpa de 89 $\mu\text{m}$

En la *Figura 5* se grafican los resultados de la pulpa de 89  $\mu\text{m}$ . La velocidad fue reducida en la siguiente secuencia para desarrollar un lecho de arena – 4 m/s, 3 m/seg, 2 m/s, 1,75 m/s, 1,5 m/s, 1,4 m/s, 1,3 m/s, 1,2 m/s, 1,1 m/s, 1,0 m/seg, 0,9 m/s, 0,8 m/s, y 0,7 m/s. El flujo se mantuvo por un período de 5 minutos en cada tasa de flujo para permitir que el ciclo se estabilizara. Se registró la información del flujo continuo durante todo el tiempo que duró la prueba. La *Figura 5* muestra la reducción en la tasa de flujo y las correspondientes velocidades medidas en cada una de las posiciones de los cinco sensores. También se muestra el resultado obtenido en un medidor de densidad instalado cerca del fondo ( $y/D = 0,05$ ) de la cañería para medir los sólidos que se estratifican en el fondo. Para obtener una velocidad de flujo de referencia, se instaló un medidor de flujo en una sección del circuito de 8” donde la mayor velocidad impedía la deposición de sólidos. Esta tasa de flujo fue entonces convertida a una velocidad “equivalente en 10 pulgadas” y graficada con los datos de perfil de velocidad que se muestran en la *Figura 5*.

En la medida que se reduce la tasa de flujo, el perfil de velocidad cambia para reflejar las variaciones de estratificación dentro de la cañería. Puede observarse que en la medida que la tasa de flujo disminuye, la lectura del medidor de densidad aumenta sólo levemente hasta aproximadamente 1,5 m/s. A esta velocidad la lectura de densidad sufre un cambio drástico que refleja un aumento de sólidos en el fondo de la cañería.

Se puede observar un buen grado de concordancia entre el rápido aumento de la lectura del Medidor de Densidad Gamma (dispuesto para medir la densidad a través del fondo de la cañería) y las velocidades relativas de los dos sensores inferiores. Ambos indican la formación de lecho al mismo tiempo. Cuando la tasa de flujo cae por debajo de la velocidad de deposición, se comienza a formar un lecho en el fondo de la cañería y el medidor de densidad Gamma detecta el rápido aumento de la densidad. El sensor

instalado en el fondo del medidor de perfil generalmente lee una velocidad menor que el sensor instalado a 135 grados. Esto se debe a la estratificación de la pulpa que produce capas móviles más densas y más lentas cerca del fondo. Cuando el lecho del fondo deja de moverse, el sensor del fondo detecta señales provenientes de la parte superior de la cañería donde la velocidad es mayor. Esta condición puede causar que las velocidades informadas del fondo y en los sensores instalados a 135 grados sean más similares. La *Figura 6* muestra las condiciones de alarma que pueden ser generadas basándose en las diferencias de velocidad medidas por las diferentes bandas del sensor. En la *Figura 7* y la *Figura 8* se muestran los perfiles de velocidad medidos a tres diferentes velocidades de flujo, cada uno mostrando tres diferentes regímenes de flujo: Mayormente homogéneo con todas las partículas suspendidas (Izquierda, *Figura 7*), flujo heterogéneo con todas las partículas suspendidas (Derecha, *Figura 7*) y flujo heterogéneo con lecho estacionario (*Figura 8*). En el último caso, se detectó la señal característica observada en la deposición de un lecho de arena y la velocidad calculada para la altura de la cañería en el fondo y cerca del fondo de la cañería llegó a cero.

#### Resultados Prueba de Pulpa – Pulpa con 186 $\mu\text{m}$

Para comparar con la pulpa de 89  $\mu\text{m}$  que ya analizamos, la *Figura 9* muestra una prueba de reducción con pulpa conteniendo partículas de 186  $\mu\text{m}$  d50. Nuevamente, como la tasa de flujo ha sido reducida, el perfil de velocidad varía para reflejar los cambios de estratificación dentro de la cañería. Puede observarse que mientras la tasa de flujo disminuye, la lectura del medidor de densidad permanece relativamente constante en 1600 - 1700  $\text{kg/m}^3$  hasta que aproximadamente a los 2,4 m/s repentinamente sufre un cambio drástico que refleja un aumento de sólidos en el fondo de la cañería. Además, la *Figura 9* muestra la caída de presión que se midió.

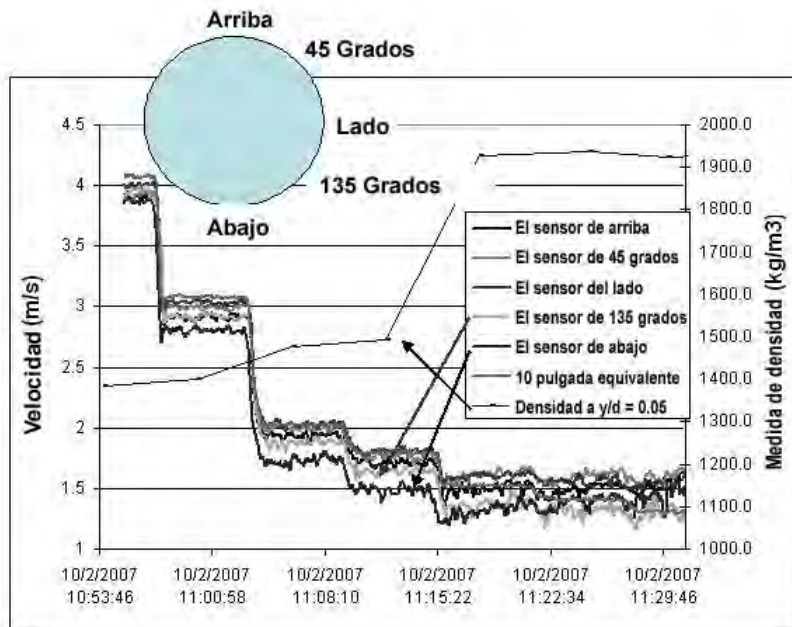


Figura 5: Perfil de velocidad de pulpa de proceso de mineral de 89 µm.

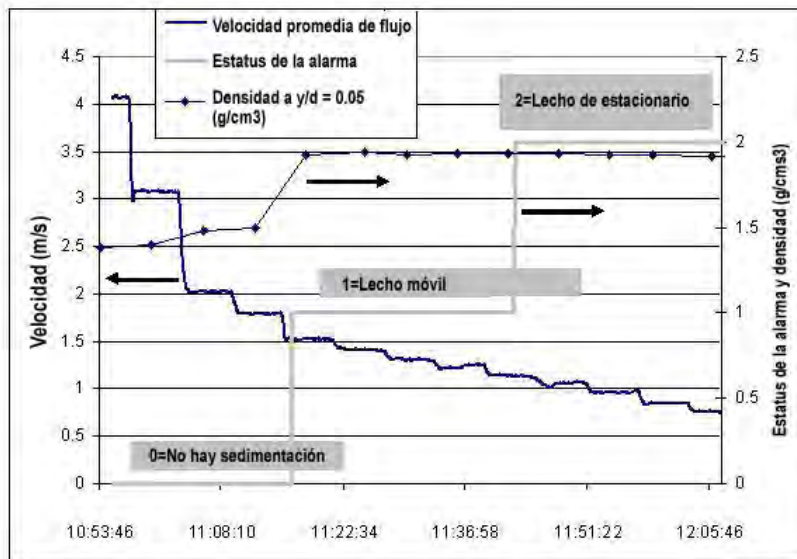


Figura 6: Estados de Alarma – Pulpa de 89 µm.

A continuación se grafican los perfiles de velocidad seleccionados para diferentes velocidades de referencia:

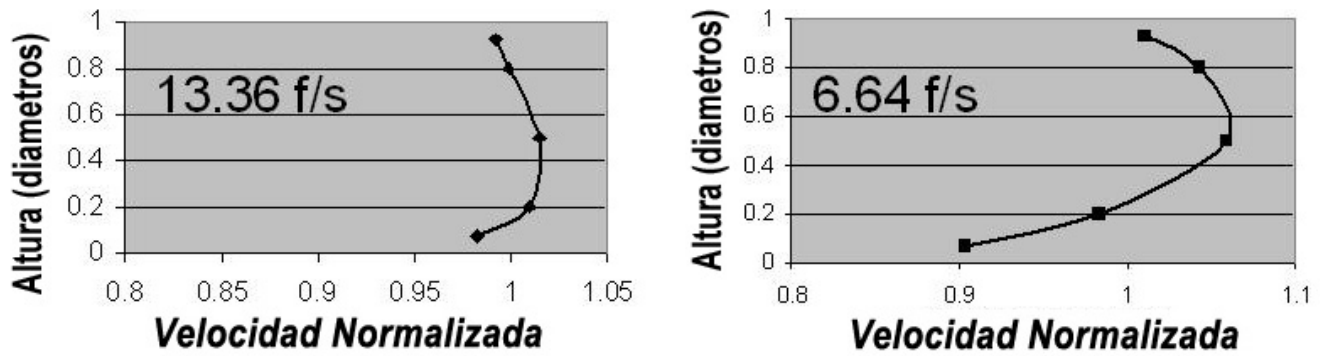


Figura 7: (Izquierda) Mayormente flujo homogéneo, partículas suspendidas y (Derecha) flujo heterogéneo, partículas suspendidas

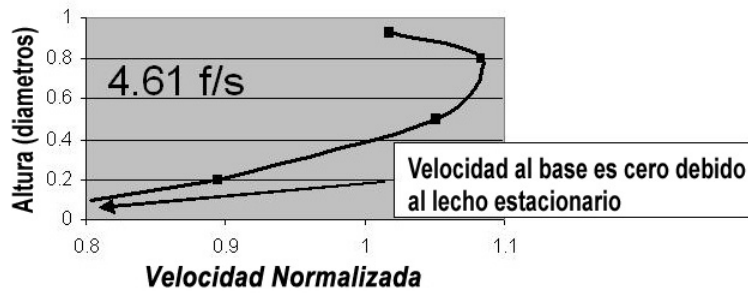


Figura 8: Flujo heterogéneo, lecho estacionario de sólidos

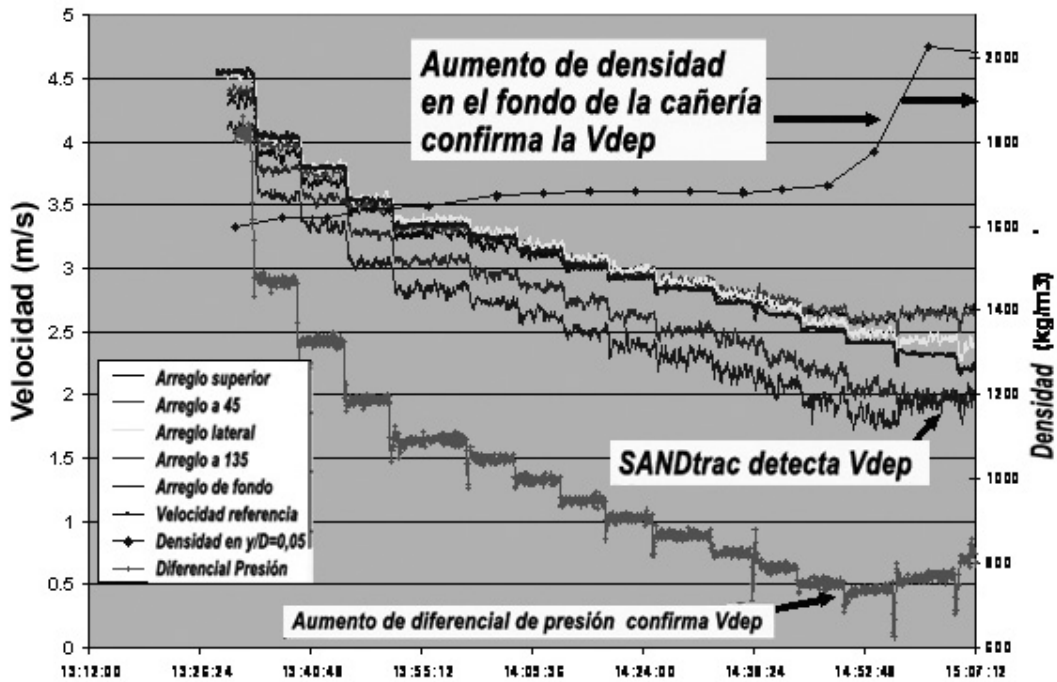
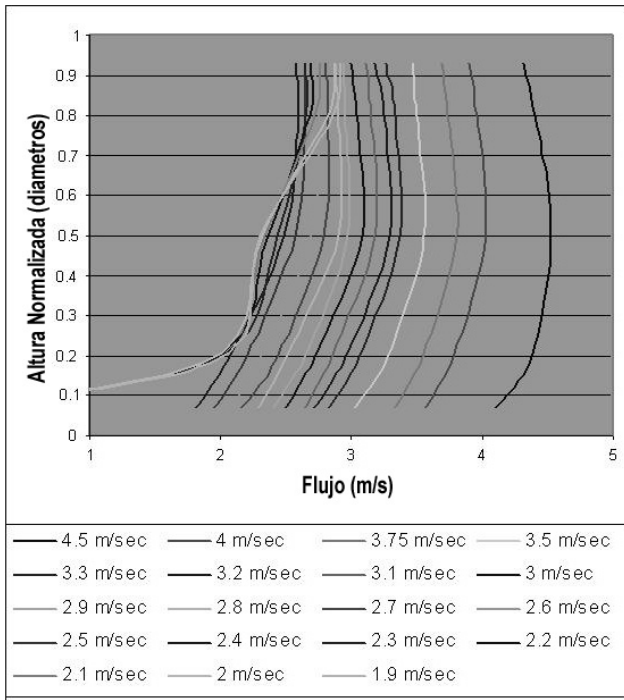


Figura 9: Deposición de sólido en pulpa de 186  $\mu\text{m}$  detectada por el medidor sonar, el medidor de densidad y el diferencial de presión

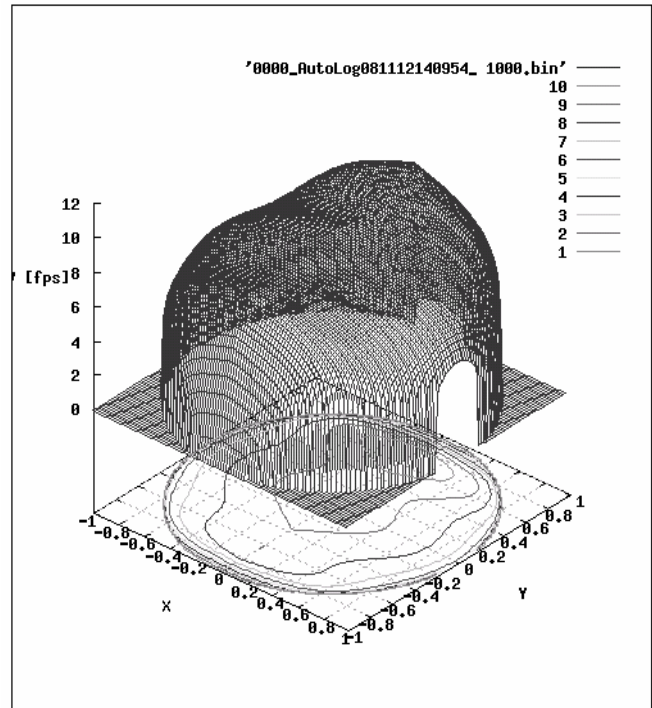
a través del medidor de perfil de velocidad, que en este caso muestra un aumento repentino que coincide con el aumento en el medidor de densidad y el traslape de velocidad en el fondo y en los arreglos a 135° del medidor de perfil de velocidad. Por lo tanto, la formación del lecho estacionario de sólidos fue detectada por el medidor sonar de velocidad y confirmada por la medición de densidad y la medición del diferencial de presión.

En la **Figura 10** se muestra el perfil de velocidad versus la velocidad de flujo de referencia. Este gráfico muestra que en la medida que la tasa de flujo se reduce, en el perfil ocurren dos cambios diferentes. El primer cambio corresponde a la velocidad detectada en el fondo de la cañería, que es la menor velocidad debido a la alta concentración de sólidos. Esta velocidad es menor con respecto a la velocidad del centro de la cañería. De la misma manera, las velocidades medidas en la sección superior de la cañería comienzan a moverse más rápido con respecto del dentro de la cañería. El segundo cambio corresponde a que a medida que la velocidad sigue disminuyendo, los sólidos se depositan en el fondo de la cañería como se observa en las tasas de flujo de 1,9 m/s y 2,0 m/s.



**Figura 10:** Perfiles de velocidad versus velocidad de referencia

La **Figura 11** es una representación del flujo derivada de los datos del perfil de velocidad cuando se asocia con los modelos de perfil de velocidad. Los cálculos de velocidad resultantes en las orientaciones horizontal y vertical pueden observarse en formato tridimensional y a través de los contornos.



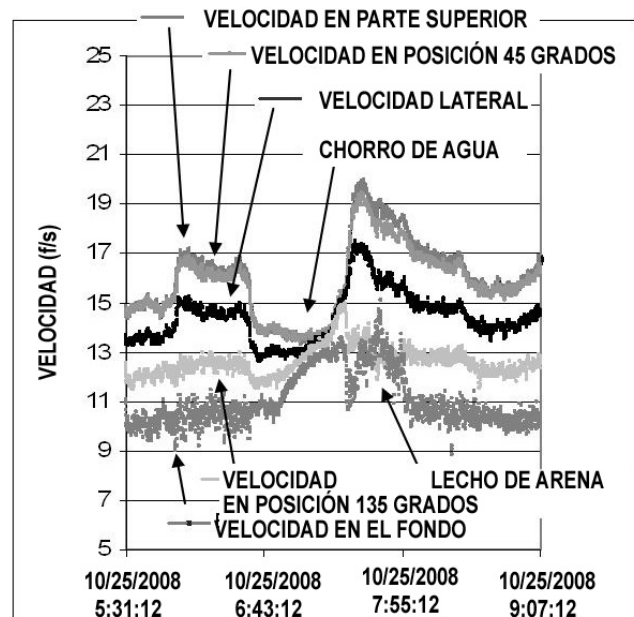
**Figura 11:** Perfiles tridimensionales de velocidad y contornos de velocidad en un flujo no homogéneo

### Implementación en Terreno

Un sistema de terreno ha estado monitoreando el perfil de velocidad en una solución de pulpa con un amplio rango de tamaños de partículas. Este sistema informa directamente el perfil de flujo y la condición de las arenas. En la **Figura 12** se muestra una foto de este sistema. Los arreglos de sensores múltiples se han incorporado a una banda única que se instala por debajo de la cubierta como se observa en la figura. Este sistema monitorea y registra la velocidad en las posiciones circunferencias descritas anteriormente que pueden ser procesadas para determinar las condiciones que conducen a una condición de potencial desarrollo de lecho de arena. En la **Figura 13**, se muestra la velocidad y los estados de alarma provenientes de este sistema instalado en terreno. El grado de estratificación y otras indicaciones se usan para determinar cuando se ha desarrollado un lecho de arena y cuando es probable que se desarrolle un lecho de arena. La pulpa que está siendo monitoreada tiene una amplia distribución de tamaños y como resultado de ello, se espera un alto nivel de estratificación, incluso a las tasas de flujo relativamente altas que experimenta esta cañería. En **Figura 14** se pueden observar tres estados, flujo heterogéneo, flujo homogéneo durante un chorro de agua y flujo heterogéneo con un lecho de arena.



**Figura 12** Operación del sistema de monitoreo de perfil de velocidad en las instalaciones de terreno del cliente.



**Figura 14** Detección de chorro de agua (sin estratificación) y deposición de arena en cañería de pulpa en terreno

#### Monitoreo de Espesor de Pared de Cañería

Existe una larga historia de uso de pruebas no destructivas basadas en elementos de ultrasonido para determinar el espesor de las cañerías metálicas. Hasta la fecha, el uso de este método para determinar el espesor de pared ha resultado costoso, poco confiable y de utilidad limitada para la determinación de tasas de tendencia de desgaste. Para reducir los altos costos de mano de obra asociados a este método y para disminuir también la varianza existente en estas mediciones realizadas de forma manual, se ha estado desarrollando y probando una nueva forma de abordar el monitoreo de espesor de pared. Con el nuevo sistema, HALO™, los costos por mano de obra se reducen, se obtiene mejor repetibilidad de medición y resultados más oportunos en la medición de desgaste de la cañería. También ha permitido realizar las mediciones a paredes de cañerías donde los inspectores no podrían ejecutarlas actualmente de forma segura y con facilidad. En la *Figura 15* se muestra una disposición conceptual del sistema.

#### Principio de Operación para el Monitoreo de Espesor de Cañería

El nuevo sistema de monitoreo de desgaste de cañería, HALO™, usa una serie de transductores ultrasónicos adaptables que son montados permanente o temporalmente alrededor del perímetro de una cañería. Estos transductores se acoplan a un pulsador/receptor ultrasónico que envía una señal eléctrica al transductor ultrasónico. El transductor ultrasónico convierte la señal eléctrica en una onda progresiva de tensión (onda de ultrasonido) que se propaga a través de la pared de la cañería, se refleja en la superficie interior de la cañería y retorna al transductor ultrasónico. Entonces el transductor ultrasónico



**Figura 13** Detección de lecho de arena y desarrollo de lecho de arena en cañería de pulpa en terreno



reconvierte esta onda de tensión que retorna en una señal eléctrica que es amplificada y procesada por el pulsador/receptor ultrasónico. Luego, el pulsador/receptor ultrasónico determina la cantidad de tiempo que ha demorado la onda de tensión en recorrer desde el transductor a la superficie interna de la cañería y de regreso al transductor. Utilizando la ya conocida velocidad de estas ondas de tensión en el material de la pared de la cañería, el espesor puede ser determinado con precisión. Este sistema ha sido diseñado para medir el espesor de las paredes de cañerías de acero pero puede posiblemente ser extendido a aplicaciones en cañerías de polímero, dependiendo del espesor de la pared y las propiedades acústicas del material.



**Figura 15:** Disposición conceptual del sistema HALO™ y foto del sistema operando en instalaciones del cliente en terreno.

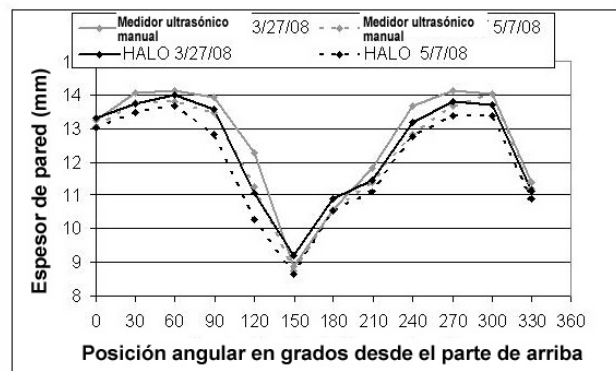
**Comparación con Instrumentación y Técnicas Convencionales de Ultrasonido para la Medición de Espesor**

La técnica de medición de espesor de pared de cañería de referencia actual consiste en un transductor ultrasónico manual y un pulsador/receptor portátil. Una comparación entre el sistema HALO™ y una herramienta manual sofisticada para la medición de espesor de cañería revelaron resultados similares. No fue posible tomar las mediciones en los mismos puntos pues el sistema HALO™ fue instalado antes de que se pudieran realizar las mediciones convencionales con ultrasonido. La diferencia de ubicación fue en la dirección axial, pero en la circunferencial las posiciones se mantuvieron iguales a las mostradas en la **Figura 16**.



**Figura 16:** Puntos de medición de espesor de pared de cañería para comparar la técnica convencional con HALO™

Las pequeñas variaciones entre la técnica convencional de ultrasonido y HALO™ se deben a las diferencias en la ubicación axial. La comparación fue realizada en dos períodos diferentes para asegurar la capacidad de medir las tendencias de espesor de pared de cañería. Los resultados que se muestran en la **Figura 17** revelan que existen algunas diferencias en el espesor de pared absoluto medido pero, más importante aun, que existen diferencias en las tendencias registradas entre ambos instrumentos. El sistema HALO™ midió una reducción en el espesor de pared en todos los puntos, lo que era esperable. En contraste, la aproximación utilizando ultrasonido convencional indicó que en algunos puntos de medición se mostraba desgaste mínimo o ningún desgaste.



**Figura 17:** Medición de espesor de pared de cañería con ultrasonido convencional (UT) versus mediciones con HALO™

### Medición y Visualización del Desgaste de Cañería

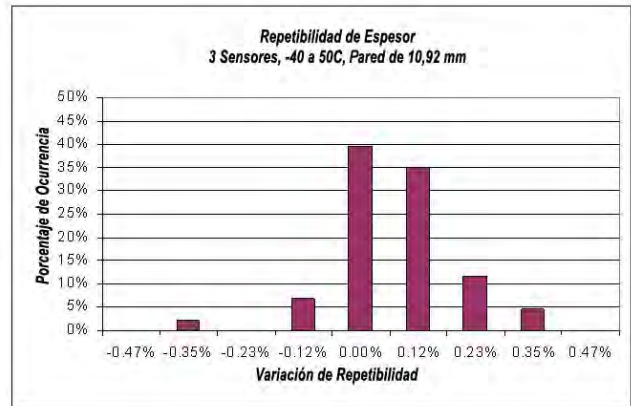
Las mediciones de espesor de cañería pueden ser graficadas en una representación polar para proporcionar una indicación visual del espesor de pared como una función de la distancia angular desde un determinado punto de referencia en la cañería. Se ha implementado un software que interpola entre los puntos del sensor y proporciona robustez ante la posibilidad de datos erróneos o falla del sensor. Los componentes, el análisis y manejo de datos, consideran las rotaciones de la cañería para monitorear las tendencias de desgaste y proyectar en el tiempo el punto en el cual la pared de la cañería ha traspasado los márgenes de seguridad. En la **Figura 18** se muestra un ejemplo de la visualización del espesor de la pared alrededor de la cañería. En las representaciones gráficas se puede observar paredes más delgadas en varios puntos angulares alrededor de la cañería por causa de las rotaciones intencionales de la cañería realizadas para aumentar la vida útil de la misma. En otras situaciones, el desgaste disparado será el resultado de los cambios de los perfiles de flujo después de los codos u otros efectos de la geometría de la cañería.



**Figura 18:** Visualización de espesor de pared de cañería obtenida del software de HALO™

### Efectos de Temperatura a Corto Plazo y Repetibilidad

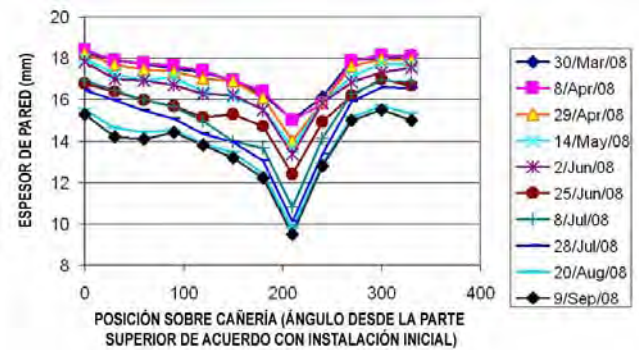
Este sistema ha sido sometido a prueba para determinar la repetibilidad, impacto de los cambios de temperatura ambiental y el impacto de la variabilidad de transductor a transductor. Los resultados de la variación de estos tres factores han sido consolidados en un conjunto único de datos como se muestra en la **Figura 19**. Un examen del gráfico revela que sobre el 81% de los datos está dentro del  $\pm 0,12\%$  o  $\pm 0,013$  mm, y todos los resultados están dentro de  $\pm 0,47\%$  o  $\pm 0,05$  mm. La repetibilidad está dentro de los requerimientos para determinar la falla inminente de la cañería por causa del debilitamiento del espesor de la pared o por las tasas de desgaste controladas con acuosidad.



**Figura 19:** Se muestra una pequeña expansión en los datos sobre el rango de 90°C de temperatura y sobre tres sensores

### Monitoreo de Tendencia de Desgaste

Se ha demostrado en terreno la capacidad de monitorear y cuantificar las tasas de desgaste de las cañerías. En la **Figura 20**, la tasa de desgaste en un ambiente de alta corrosión muestra la rápida disminución del espesor de la pared en un período de 23 semanas.



**Figura 20:** Se muestra la medición del espesor de pared de cañería como función de la posición angular y el tiempo

### Efectos de la Superficie de la Cañería, Ciclo Térmico y Temperatura Elevada a Largo Plazo

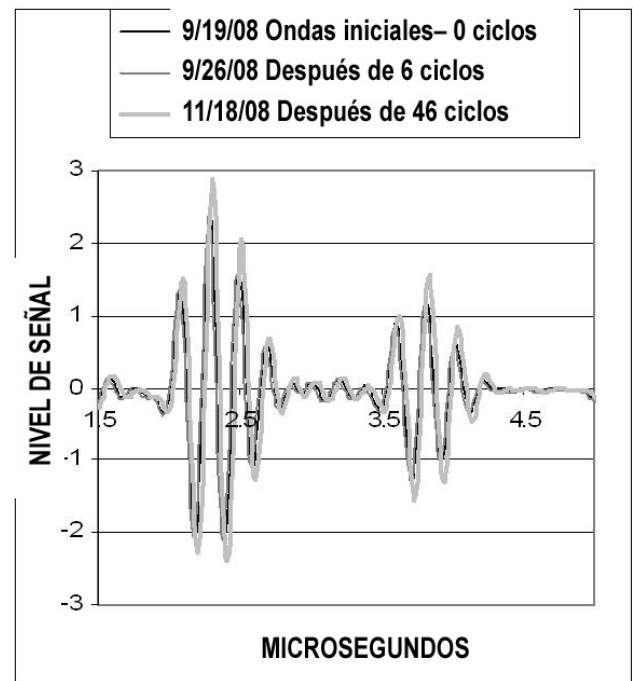
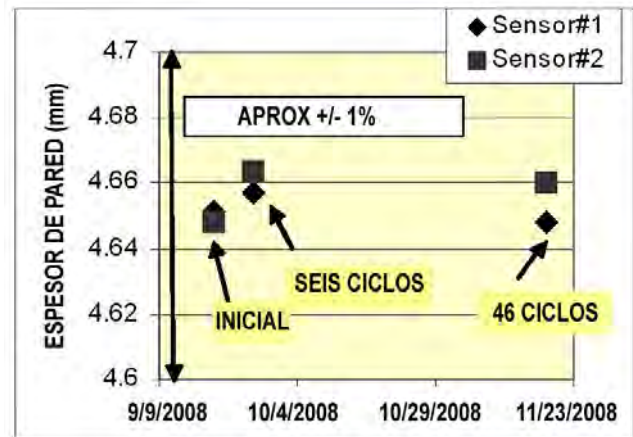
Se espera que la superficie interior de la cañería tenga un impacto en la fuerza y forma de la señal reflejada en el ultrasonido. Los efectos a largo plazo incluyendo los ciclos de temperatura y la degradación por alta temperatura, también juegan un rol en la confiabilidad de estas mediciones. Se están realizando pruebas para comprender completamente el impacto de estos efectos. A la fecha, una diversidad de tipos de cañerías, desde acero a cromo-acero con diferentes topologías de superficies interiores, ha sido estudiada y probada con buenos resultados, como ha sido verificado con las mediciones realizadas con instrumentos de medición de calibre. En la **Figura 21** se muestran tres de estas superficies.



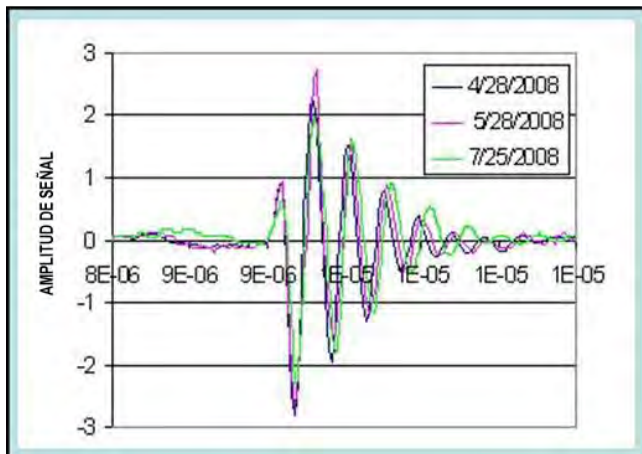
**Figura 21:** Irregularidades de superficie interior observada en una cañería de cromo-acero con desgaste

Se ha iniciado un ciclo de temperatura de  $-40^{\circ}\text{C}$  a  $+40^{\circ}\text{C}$  con 10 horas de retención, en un sistema semi-permanente utilizando gel de acople de ultrasonido y los resultados de los primeros 46 ciclos térmicos no revelan diferencias perceptibles en el espesor de la pared de la cañería, como puede observarse en la **Figura 22**. Además, una comparación de amplitudes de las señales de uno de los sensores indicó que no hay degradación en la amplitud, como se observa en la **Figura 22**. Después de 46 ciclos, la amplitud de la señal aumentó con respecto del pulso inicial y el pulso después de 6 ciclos. La prueba de largo plazo a  $50^{\circ}\text{C}$ - $70^{\circ}\text{C}$  no mostró ningún cambio detectable en la medición del espesor de la cañería, es decir, ningún cambio no detectable en el tiempo desde el inicio de la gatillación del pulso a la detección de la señal de ultrasonido. La amplitud de la señal que tiene relación con la confiabilidad del sistema sensor y la señal de ruido, mostró cierta degradación inferior al 20% de amplitud durante un período de tres meses, como se observa en la **Figura 23**. Se ha implementado un nuevo diseño con el cual se espera ver cambios de amplitud

mucho menores en las señales de ultrasonido durante pruebas de largo plazo similares. Además, se espera utilizar un sistema permanente que no utilice gel de acople de ultrasonido para observar cambios incluso menores.



**Figura 22:** Impacto del Ciclo de Temperatura en la Medición del Espesor de Pared y la Amplitud de Señal ( $-40^{\circ}\text{C}$  a  $+40^{\circ}\text{C}$  con 10 horas de retención)



**Figura 23:** Prueba de Alta Temperatura a Largo Plazo

### Conclusiones

La tecnología de medición de flujo basada en arreglo sonar que hoy existe, ha sido extendida a dos nuevas aplicaciones. Se ha demostrado que un medidor con arreglo sonar puede medir el perfil de velocidad en tiempo real en una cañería horizontal para pulpa. Los cambios que se han medido en el perfil de velocidad muestran la capacidad para detectar diferentes regímenes de flujos: tanto flujos homogéneos como heterogéneos con partículas sólidas en total suspensión y flujos con lechos estacionarios. La capacidad de detectar un lecho estacionario fue confirmada por las mediciones separadas de densidad realizadas a través del fondo de la cañería y la presión diferencial a través del medidor de perfil de velocidad. Un beneficio potencial de esta medición para la operación de las líneas de hidrotransporte es la reducción de uso de agua y energía al operar con concentraciones más altas de sólidos y/o menores velocidad mientras que, además, se ahorran los problemas y costos ocasionados por la deposición de sólidos.

La capacidad de proporcionar mediciones oportunas del espesor de la pared en forma confiable, precisa y efectiva desde la perspectiva de costos, ha sido demostrada. La repetibilidad sobre una variedad de condiciones de operación, incluyendo la variación de sensor a sensor, rangos de temperatura y tiempo, ha quedado claramente demostrada en las pruebas de laboratorio y las realizadas en terreno. Esta tecnología se expande fácilmente al monitoreo de la mayoría de las estructuras encontradas en una línea de cañerías, incluyendo codos, válvulas y muchas otras. Los ahorros resultantes en inspecciones de cañería y en la producción a través de una mejorada vida útil, son muy significativos. Más importante aun, el impacto potencial de los ahorros en materias de seguridad del personal y del medio ambiente, serán enormes.

### REFERENCIAS

- Cheremisinoff, N.P., (1986). Encyclopedia of Fluid Mechanics. Vol. 5, Slurry Flow Technology, Golf Pub. Co.
- Gysling, D. and Mueller, E., (2004). Application of Sonar-Based Clamp-On Flow Measurement in Oilsand Processing. *ISA 2004 Presentación y Conferencia*.
- Nelson, R.O., (2001). Sonar Signal Processing, Artech House Inc., Norwood, MA, USA, ISBN 0-89006-453-9