

Nuevos Desarrollos en la Medición de Perfil de Velocidad y Monitoreo de Desgaste de Paredes en Cañerías de Hidrotransporte

Christian O’Keefe¹, Tel.D., Director

Robert J. Maron¹, PE, Director

Mark Fernald², V.P.

Tim Bailey²

Alex Van der Spek³, Ph.D.

¹CiDRA Minerals Processing Inc.

50 Barnes Park North

Wallingford, CT 06492, U.S.A

Teléfono: 203-265-0035

Website: www.cidra.com

Email: cokeefe@cidra.com

²CiDRA Corporate Services

50 Barnes Park North

Wallingford, CT 06492, U.S.A

Teléfono: 203-265-0035

Website: www.cidra.com

³ZDOOR

Sleedoornlaan 23

3053 ZN Róterdam, Holanda

Teléfono: 31 10 418 6989

Email: zdoor@xs4all.nl

Palabras Clave: Flujómetro, Perfil de Velocidad, Desgaste de Cañería, Degaste de Tubería

RESUMEN

La tecnología no invasiva de medición de flujo concebida sobre un arreglo sonar se está convirtiendo en un método aceptado, y muchas veces el preferido, para realizar la medición de los complejos flujos de fase única y de fase múltiple en la industria de procesamiento de minerales. Esta tecnología sensora y de medición ha sido también extendida a dos desarrollos que posibilitan nuevas capacidades de medición útiles para monitorear y administrar los flujos de pulpa y las cañerías.

El primer desarrollo corresponde a una medición no invasiva del perfil del flujo de pulpa en tiempo real en cañerías horizontales. Los sensores múltiples pasivos no invasivos miden las velocidades localizadas y se combinan para proporcionar una medición de perfil de velocidad. Esta información puede utilizarse para determinar la aproximación y el inicio de la deposición de sólidos en el fondo de la cañería. Tener esta información en tiempo real puede permitir operar a velocidades menores y/o mayor concentración de sólidos, a la vez que se evita la deposición de sólidos o la obstrucción y los costos operacionales asociados.

El segundo desarrollo corresponde a la medición no invasiva del desgaste de la cañería en líneas de pulpa. Actualmente esas mediciones se hacen con calibradores ultrasónicos de espesor portátiles y con método manual. Las numerosas fallas asociadas al método manual se solucionan con el uso de un conjunto de transductores que se abrazan permanentemente o semi-permanentemente al exterior de la cañería. Este anillo de sensores contiene una serie de transductores adaptables espaciados alrededor de la circunferencia y que se usan para medir el espesor de la cañería bajo sus respectivas posiciones. Comparado con los métodos manuales, este sistema y procedimiento resultan en mejor repetibilidad y precisión. También disminuye los costos por labores de inspección y requerimientos de acceso a las cañerías. Se mostrarán las mínimas variaciones de precisión ante la presencia de temperaturas ambientales variables. Se ilustrará la tendencia del espesor de pared de la cañería en líneas de alto desgaste. Se analizarán los beneficios de un monitoreo del desgaste de cañería significativamente mejorado en las líneas de hidrot transporte con sólidos abrasivos y la mejora asociada a la capacidad de asegurar una operación segura y evitar los costosos daños ambientales causados por filtraciones provocadas por desgaste de cañerías.

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 dispuestos en la dirección circunferencial de una cañería, pueden

medir diversas velocidades del líquido 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 líquido 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 2000 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.

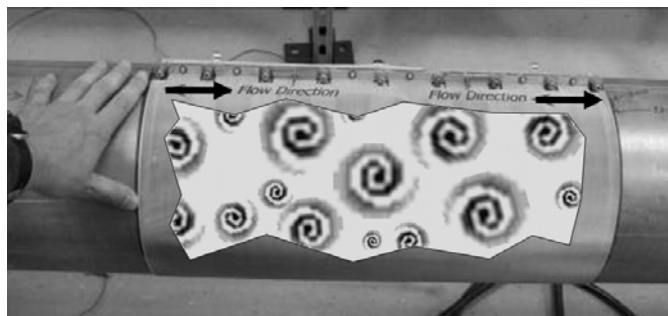


Figura 1: Corte ilustrativo de una cañería mostrando los remolinos turbulentos debajo de la banda del sensor de arreglo sonar

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. Cada elemento del sensor pasivo dispuesto en un arreglo de sensores detectará la señal eléctrica única de cada recolección de remolinos turbulentos. 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.

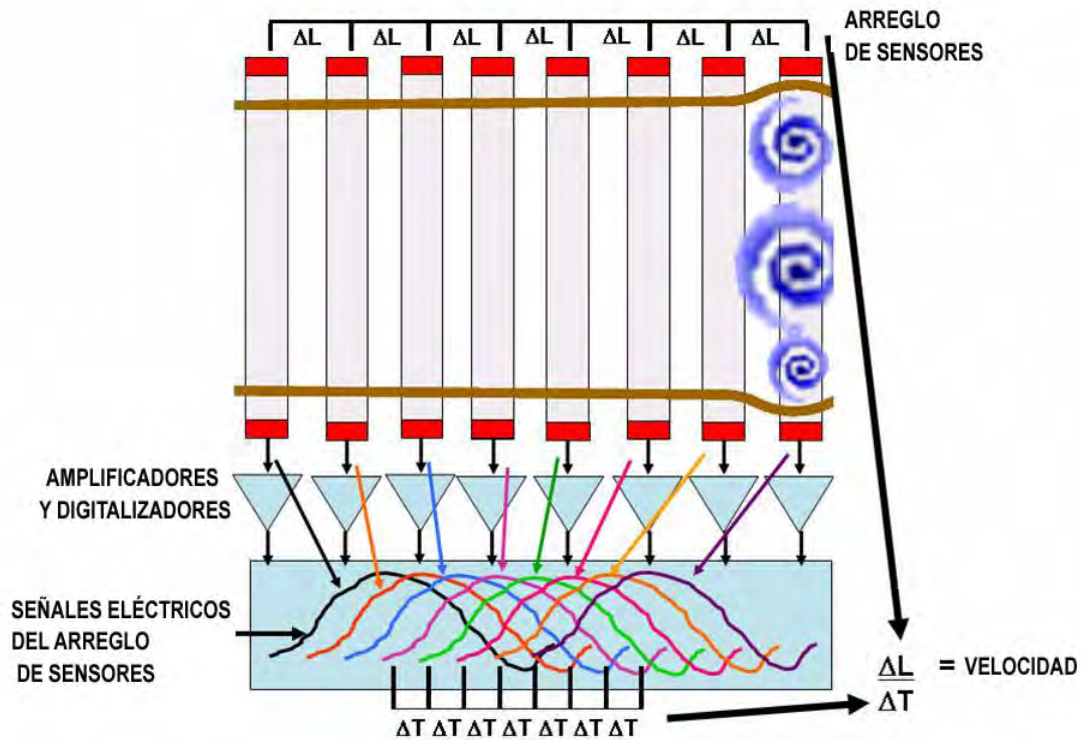


Figura 2: Ilustración de señal detectada por sensores pasivos en un arreglo desde una recolección de remolinos turbulentos

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 totalmente 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.

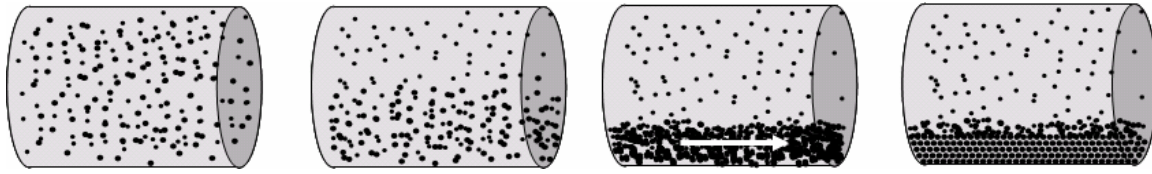


Figura 3: (De izquierda a derecha) a) Flujo Homogéneo b) Flujo Heterogéneo - partículas totalmente suspendidas c) Flujo Heterogéneo – lecho móvil d) Flujo Heterogéneo – lecho estacionario

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. Este informe resume los resultados de pruebas de circuitos de flujo realizadas en un sistema de arreglo sonar de determinación de perfiles y demuestra 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 4](#), en el Centro de Tecnología de Flujos en Cañerías del Consejo de Investigación Saskatchewan (SRC) en Canadá.

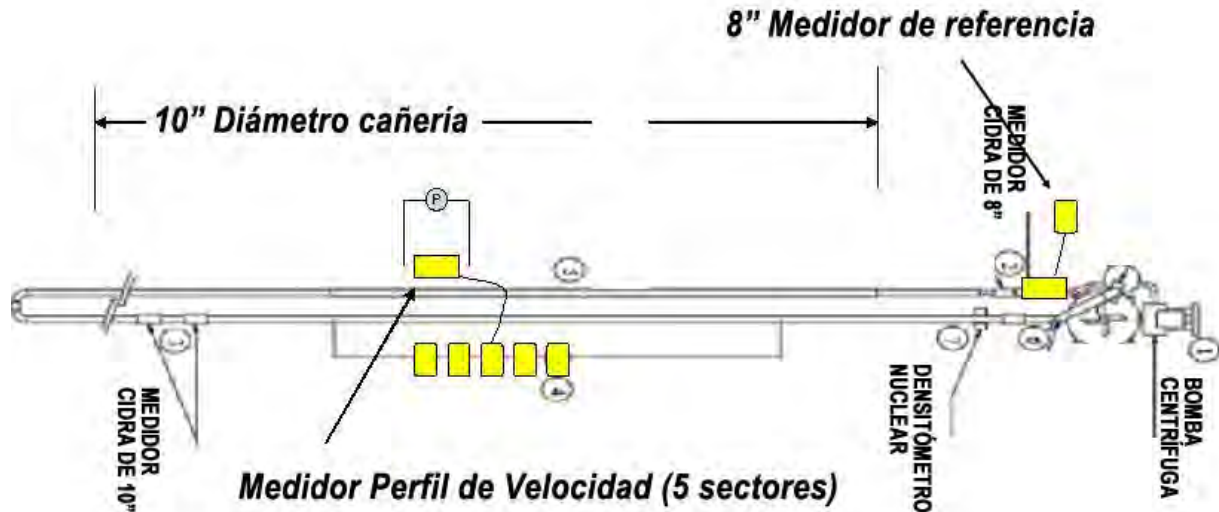


Figura 4: Circuito de prueba

Pulpas Sometidas a Pruebas

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 kg/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.

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

Los resultados de la prueba de la pulpa de $89 \mu\text{m}$ se grafican en la [Figura 5](#). 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 de la tasa de flujo y las velocidades correspondientes medidas en cada una de las posiciones del arreglo de 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. Luego, esta tasa de flujo fue convertida a una velocidad "equivalente de 10 pulgadas" y se graficó con la información de perfil de velocidad que se muestra 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 (Figura 7), flujo heterogéneo con todas las partículas suspendidas (Figura 7) y flujo heterogéneo con lecho estacionario (Figura 8). En el último, el sensor ubicado a 135 grados está midiendo una combinación del lecho de arena y el flujo líquido sobre el lecho de arena, lo que resulta en la característica forma de "gancho" que se observa en el fondo de la figura.

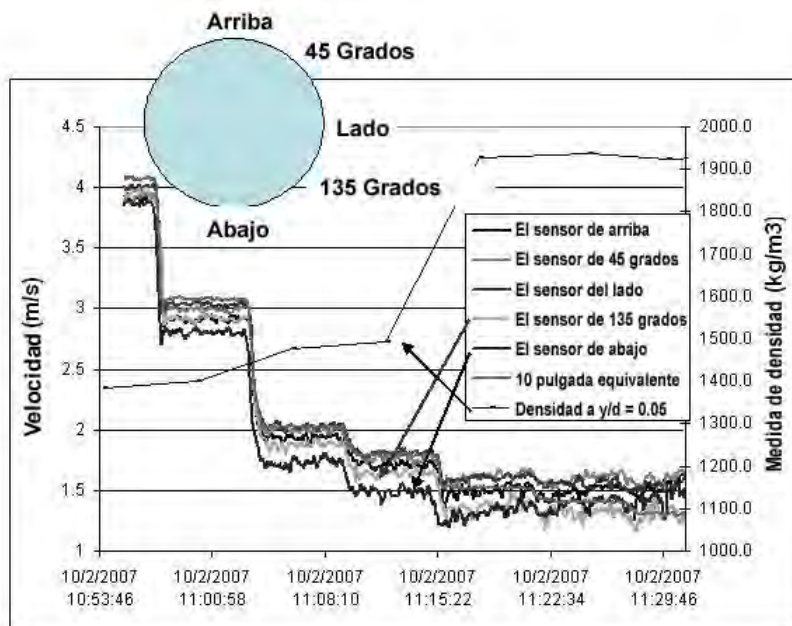


Figura 5: Perfil de velocidad de pulpa de proceso de mineral de 89 µm.

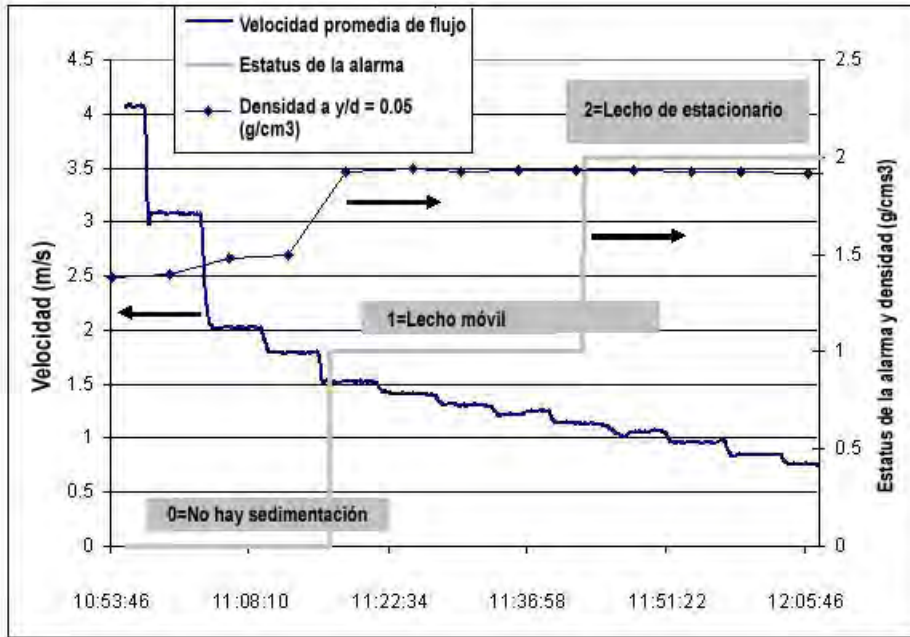


Figura 6: Estados de Alarma – Pulpa de 89 μ m

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

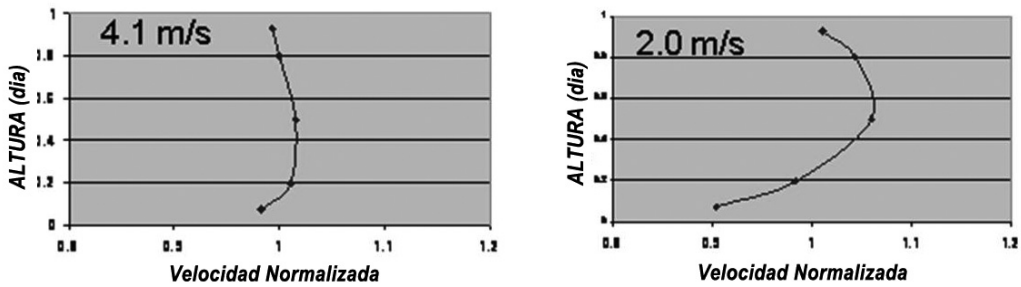


Figura 7: (Izquierda) Mayormente flujo homogéneo, partículas suspendidas y (Derecha) flujo heterogéneo, partículas suspendidas

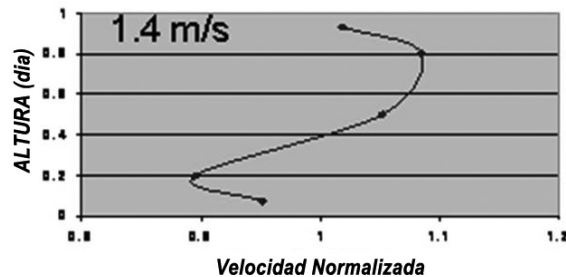


Figura 8: Flujo heterogéneo, lecho estacionario de sólidos

Resultados Prueba de Pulpa – Pulpa con 186 μ m

Para comparar con la pulpa de 89 μm que ya analizamos, la **Figura 9** muestra una prueba de reducción con pulpa conteniendo partículas de 186 μm 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 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. Adicionalmente, la **Figura 9** muestra la caída de presión medida a través del medidor de perfil de velocidad, que, en este caso, muestra un repentino aumento que coincide con el aumento del medidor de densidad y el traslape de velocidad del fondo y el arreglo del medidor perfil de velocidad instalado a 135 grados. 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.

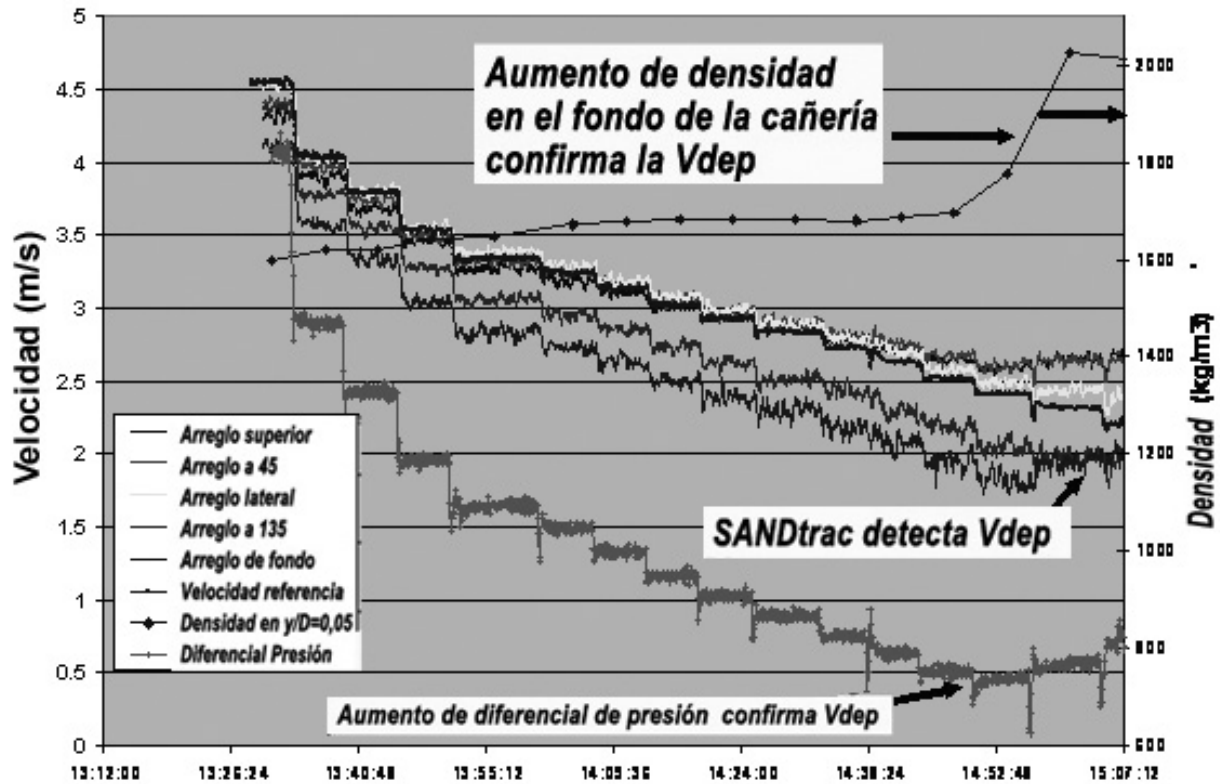


Figura 9: Deposición de sólido en pulpa de 186 μm detectada por el medidor sonar, el medidor de densidad y el diferencial de presión

En la **Figura 10** se muestra el perfil de velocidad versus la velocidad del flujo de referencia y la **Figura 11** muestra una representación donde todas las velocidades están normalizadas con respecto de la velocidad del centro. La gráfica de la **Figura 11** enfatiza cómo los efectos del flujo estratificado impactan el perfil de velocidad. Juntas, estas representaciones muestran que al estar la tasa de flujo reducida, ocurren dos cambios distintos en el perfil. 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 en la medida que la velocidad descende, los sólidos se depositan en el

fondo de la cañería causando una aparente “inversión de velocidad” entre el fondo y los arreglos instalados a 135 grados.

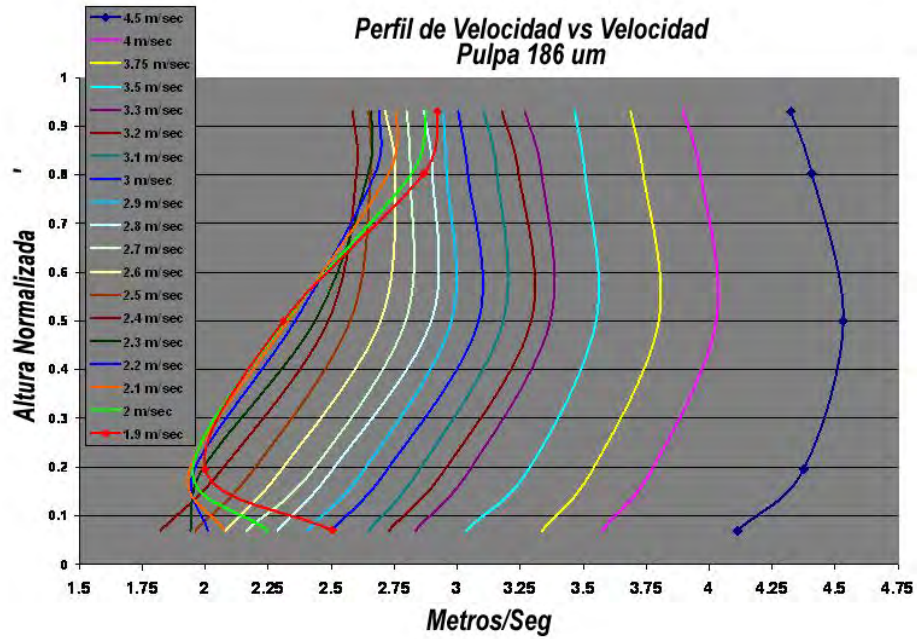


Figura 10: Perfiles de velocidad versus velocidad de referencia

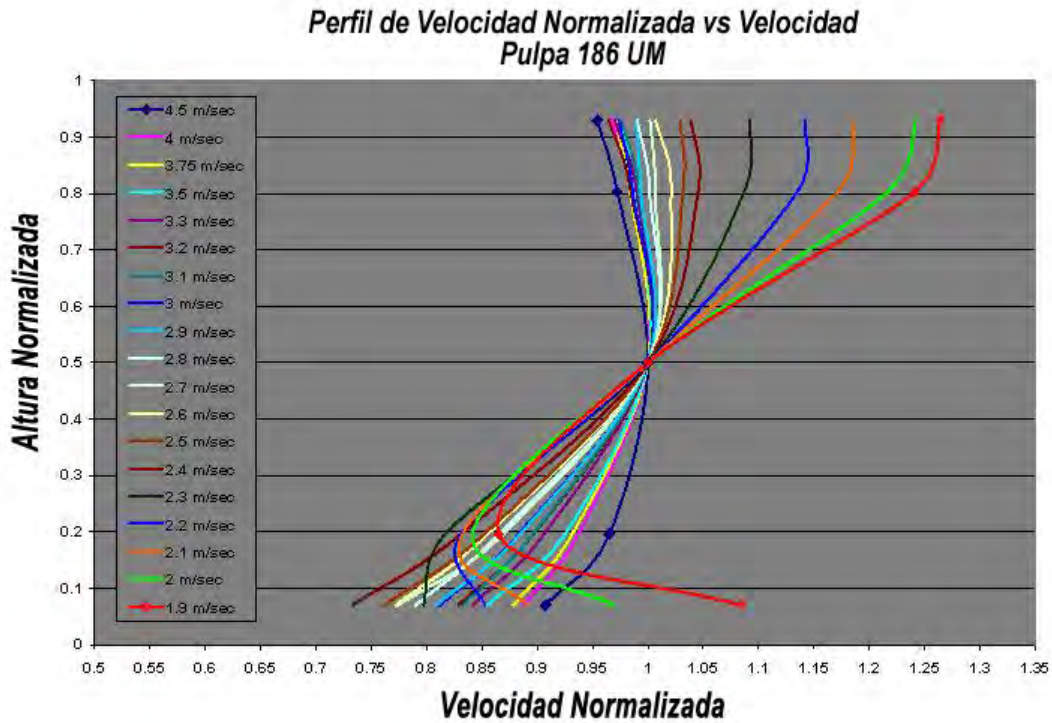


Figura 11: Perfiles de velocidad (normalizados a la velocidad del centro de la cañería) versus velocidad de referencia

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 12** se muestra un arreglo de de 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 acústica) 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 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.

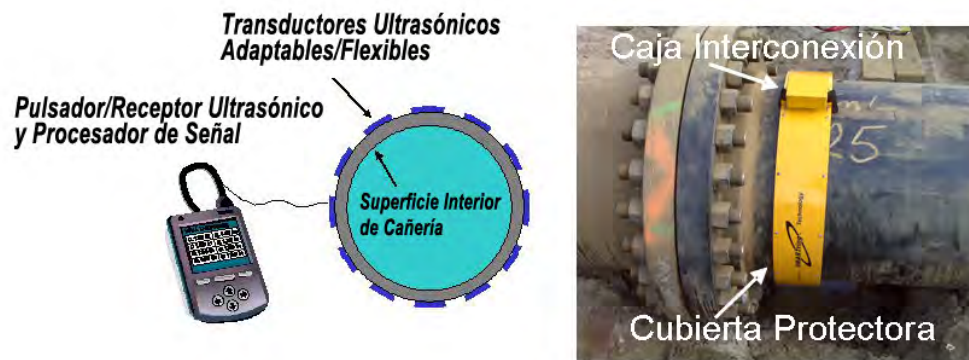


Figura 12: Disposición conceptual del sistema HALO™ y foto del sistema operando en instalaciones del cliente en terreno.

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 13](#).



Figura 13: 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 14](#) 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.

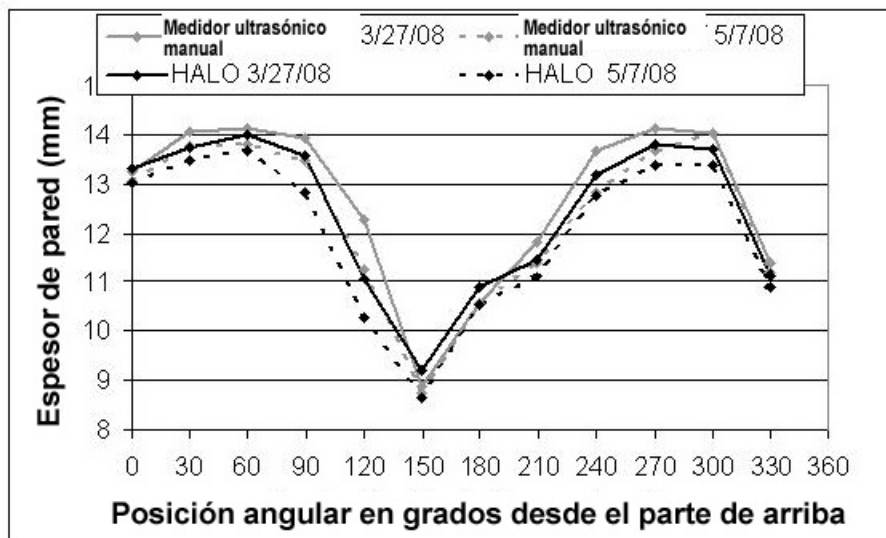


Figura 14: Medición de espesor de pared de cañería con ultrasonido convencional (UT) versus mediciones con HALO™

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 la parte superior de la cañería. Un conjunto de representaciones gráficas de la información tomada en una instalación de terreno de los clientes muestra claramente las altas tasas de desgaste en las cañerías, como se observa en la **Figura 15**. Inequívocamente se puede apreciar el grado de desgaste. En el lado izquierdo de la **Figura 15** se muestra que la alta tasa de desgaste aparece en el fondo de la cañería, como es esperable, en una situación de flujo estratificado (no homogéneo). En el lado derecho de la **Figura 15**, la alta tasa de desgaste parece estar en la parte superior de la cañería causada por una rotación intencional realizada a la cañería para aumentar su vida útil. En otras situaciones, el desgaste disparejo será el resultado de los cambios de los perfiles de flujo después de los codos u otros efectos de la geometría de la cañería.

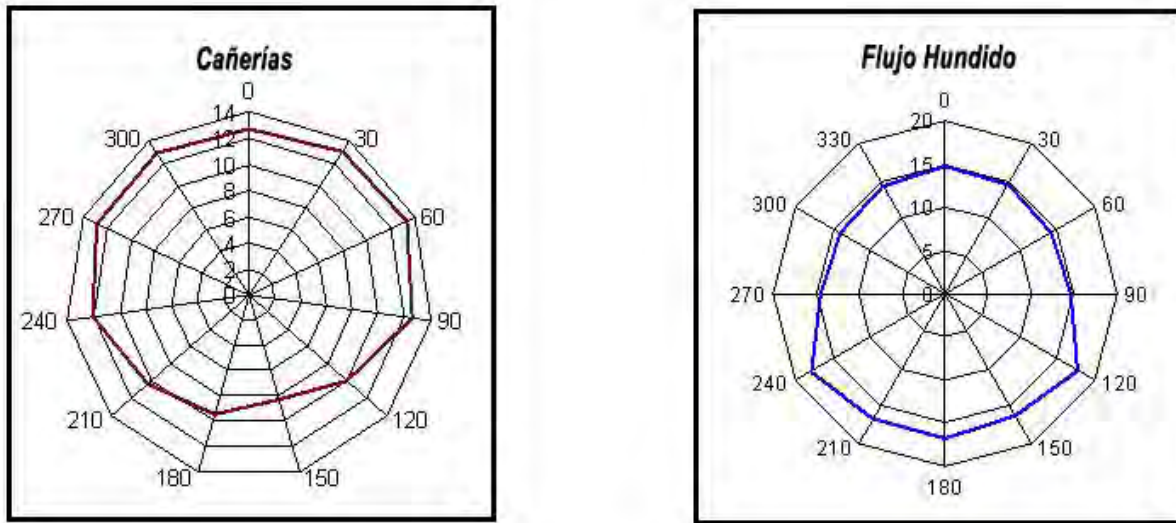


Figura 15: Espesor de cañería en milímetros como función de posición angular desde la parte superior de la cañería, como se muestra en dos cañerías diferentes en una instalación del cliente.

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 16** se muestra un ejemplo de la visualización del espesor de la pared alrededor de la cañería.

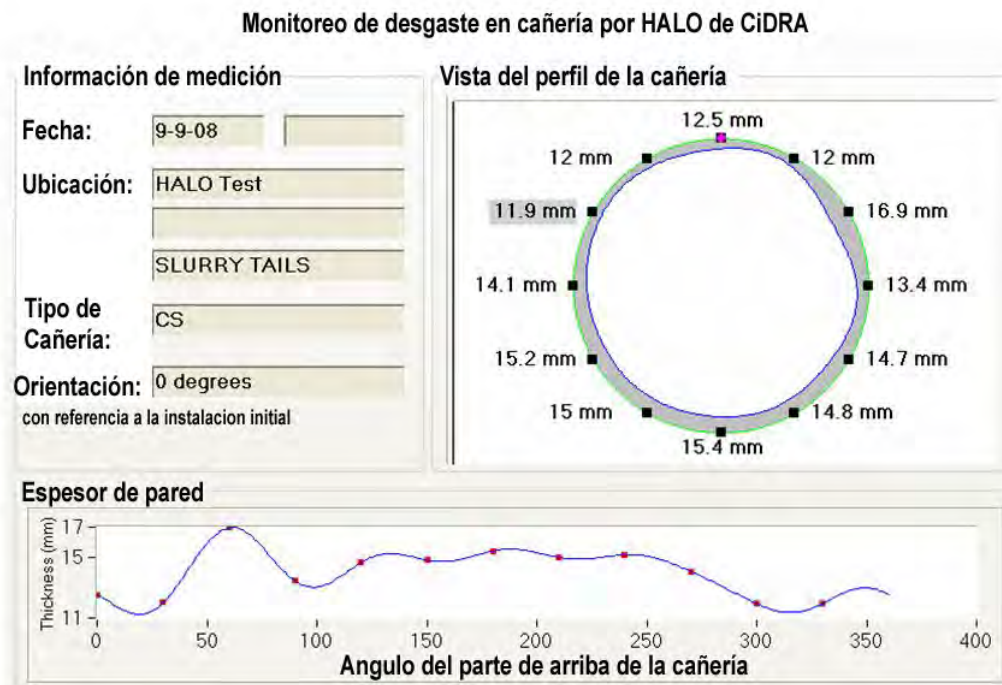


Figura 16: Visualización de espesor de pared de cañería obtenida del software de HALO™

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 17**. 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 controlados con acuciosidad.

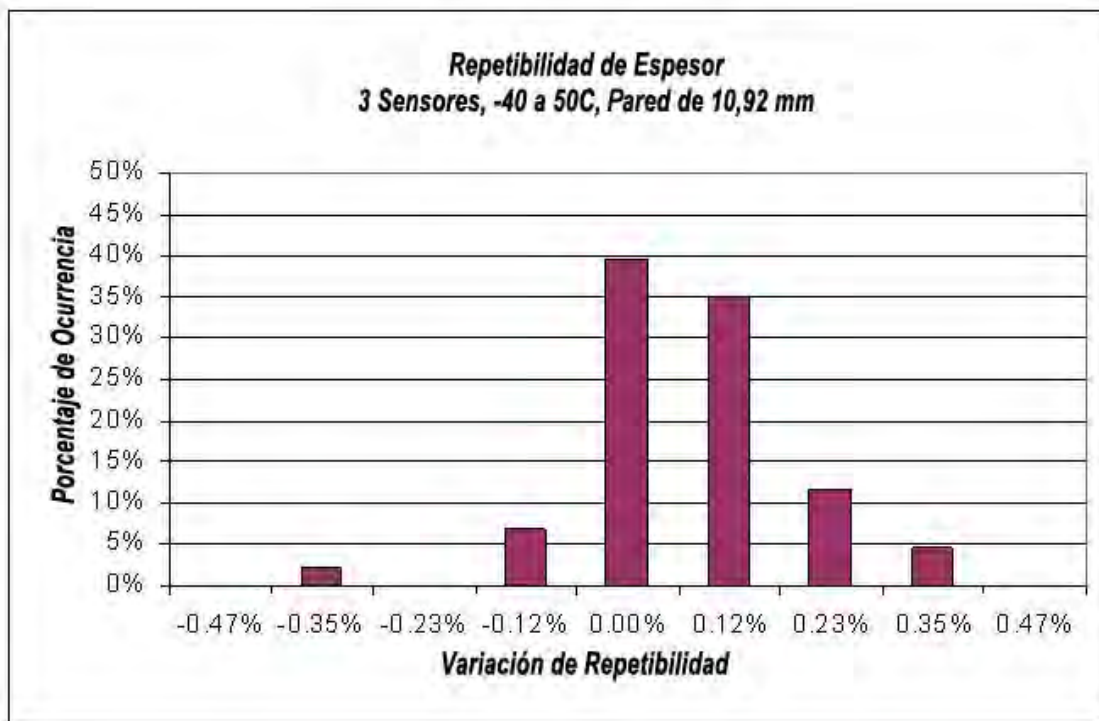


Figura 17: Se muestra una pequeña expansión en los datos sobre el rango de 90°C de temperatura y sobre tres sensores

Monitoreo de Tendencia de Desgaste de la Cañería

Se ha demostrado en terreno la capacidad de monitorear y cuantificar las tasas de desgaste de las cañerías. En la **Figura 18**, 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.

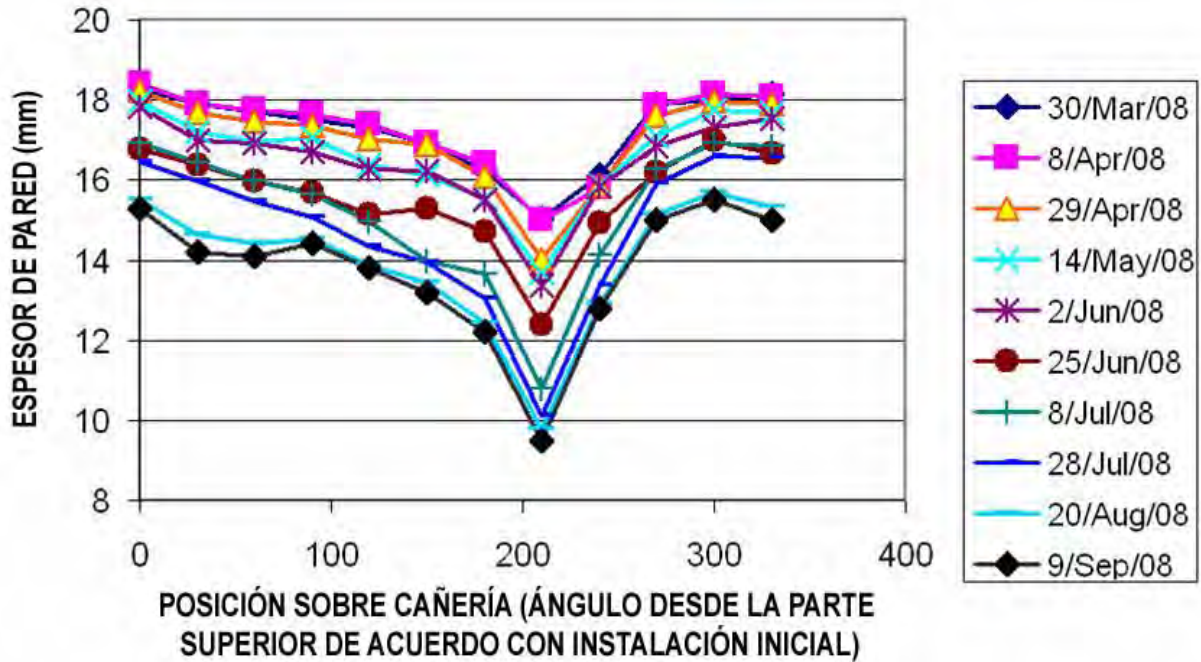


Figura 18: Se muestra la medición del espesor de pared de cañería como función de la posición angular y el tiempo

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. En la **Figura 19** se muestran tres de estas superficies.



Figura 19: Irregularidades de superficie interior observada en una cañería de cromo-acero con desgaste

Se ha iniciado un ciclo de temperatura de -40C a +40C con 10 horas de retención, en un sistema semi-permanente utilizando gel de acople de ultrasonido y los resultados de los primeros seis ciclos térmicos no revelan diferencias perceptibles en el espesor de la pared de la cañería, como puede observarse en el lado izquierdo de la Figura 39. La prueba de largo plazo a 50C-70C 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 el lado derecho de la Figura 20. 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.

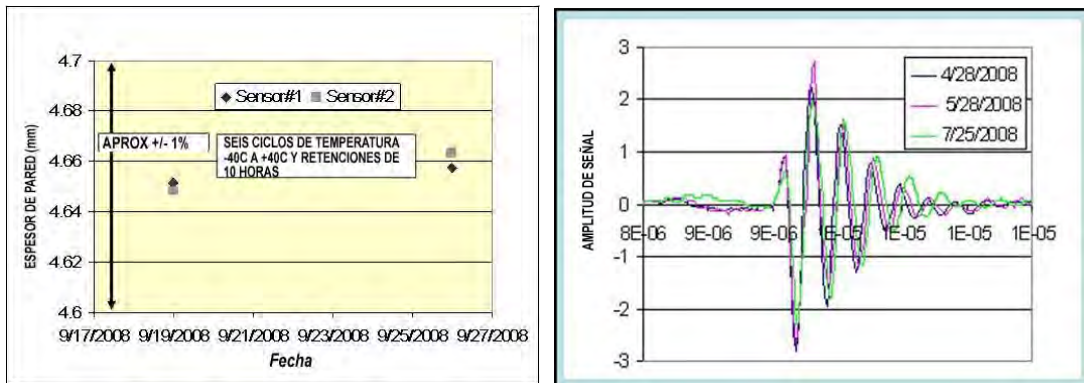


Figura 20: Ciclo de Temperatura y Prueba de Alta Temperatura a Largo Plazo

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 velocidades 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, Gulf 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