

Calibración de flujómetros en terreno: un servicio profesional plenamente desarrollado que ya está listo para la minería

Bob Maron

CiDRA Minerals Processing, USA

Ville Laukkanen

Indmeas Oy, Finlandia

RESUMEN

Los procesos automatizados de minería requieren más que simplemente un medidor preciso de flujo. Lo que necesitan es una medición precisa de flujo. La calibración en terreno puede proporcionarla. Finalmente, luego de 25 años de trabajo y más de 10.000 calibraciones realizadas, una empresa en Finlandia ha logrado desarrollar una calibración de flujómetros en terreno robusta y totalmente profesional con referencia trazable a estándares industriales. Aun cuando su valor ha sido con creces comprobado en Finlandia y los países vecinos, este tipo de calibración aún no ha sido utilizado fuera de esta área geográfica. Este valioso servicio está listo para ser utilizado por la industria minera. Puede ayudar a resolver muchos problemas complejos que surgen debido a la creciente necesidad de medir y automatizar procesos relacionados con la medición de flujo.

La calidad de la cadena completa de medición sólo puede asegurarse en terreno cuando el medidor está en operación y en posición de instalación real. En una calibración en terreno, los componentes de error producidos por diferentes partes de la cadena de medición de flujo se identifican y corrigen. Años de experiencia en la calibración en terreno en áreas distintas al procesamiento de minerales han demostrado con mucho que los mayores errores de medición se originan no en los flujómetros, sino en otras partes de la cadena de medición.

Este documento presente el método de calibración en terreno más ampliamente aplicable, el método de tiempo de tránsito del radiotrazador que puede dar cuenta de los errores en la cadena de medición. El método es ampliamente usado en otras industrias pero no en igual proporción en el procesamiento de minerales. Es flexible en condiciones de planta y proporciona referencias trazables para flujos turbulentos de líquidos puros o pulpas con una incertidumbre certificada de sólo 0,5%. Se entregan ejemplos.

Mantener una lectura de flujo precisa por períodos prolongados también requiere de un flujómetro estable y confiable. El medidor de flujo de arreglo sonar no invasivo está bien constituido para enfrentar los desafíos de estas aplicaciones en el procesamiento de minerales, y resuelve los problemas de confiabilidad y estabilidad que desde hace tanto tiempo permanecían sin solución. Se muestran unos ejemplos de unas aplicaciones con una pulpa compleja.

INTRODUCCIÓN

La necesidad de una medición de calidad

A continuación, la Figura 1 expone un ejemplo típico demostrando un error de medición de un flujo crítico que causó un alto costo al cliente.

Una calibración de medición de flujo fue hecha en terreno con un trazador en una aplicación de tratamiento de aguas. El flujo principal a la planta tenía un error de medición de +30%. Esta medición controlaba directamente la dosificación de químicos que se agregaban al agua y, debido al error en la medición, también la dosificación y los costos de los químicos para el tratamiento del agua eran un 30% más alto que lo necesario.

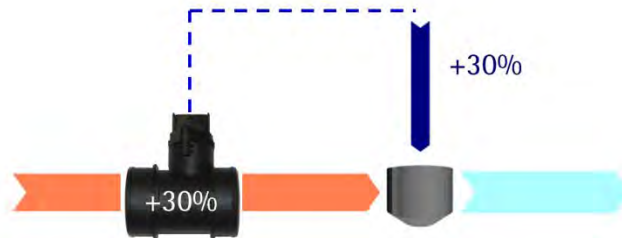


Figura 1 Dosificación de químicos excedida en un 30% debido a error de medición en el flujo de agua

En un nivel más general se puede indicar que un prerequisite para el control de proceso moderno es que los flujos importantes sean medidos con precisión. Tanto la evaluación ambiental, como la optimización de procesos, la facturación por mediciones y los cálculos de balances imponen requerimientos específicos con relación a la calidad de la medición del flujo.

La calidad de medición en terreno

Para el usuario final del flujómetro, la característica más importante es la exactitud de la medición del flujo total, lo que significa a su vez la exactitud de la cadena completa de medición. La cadena de medición incluye todo el procesamiento necesario para construir el valor final informado.

Los flujómetros utilizados por la industria hoy tienen una muy alta calidad. De acuerdo con las especificaciones de los fabricantes, la exactitud de los flujómetros es generalmente mejor que +/- 1% de la lectura. El medidor en sí mismo, sin embargo, sólo representa una parte de la cadena de medición. Y resulta que los problemas de calidad generalmente surgen en otros puntos de la cadena de medición distintos del medidor mismo (Kuoppamäki, Baoyu, Lide, & Xiaona, 1996).

La calidad general de la medición puede a menudo ser estimada en forma aproximada a partir de los balances de volumen o masa. La Figura 2 a continuación muestra un ejemplo de un balance de agua-vapor industrial. Cuando se consideran las pérdidas, recirculaciones y acumulación, el balance hídrico comparable debería ser igual al 100% en cada punto de balance. Generalmente esto no es así. El siguiente ejemplo tomado de la vida real muestra valores medidos mensualmente que están en el rango de 82%...111%. Todas estas diferencias se deben a errores de medición.



Figura 2 El balance hídrico mensual de una planta de generación de energía muestra el efecto de los errores de medición.

La Figura 2 representa una situación típica de incertidumbre en una industria si no se han tomado medidas especiales para asegurar la calidad de la medición. Se consideran las recirculaciones y acumulaciones de manera que todos los puntos de balance deben agregarse hasta llegar al 100%.

Aseguramiento de la calidad de la medición

Para lograr una incertidumbre razonable en las mediciones de flujo, se necesita algún tipo de aseguramiento de calidad. El enfoque tradicional es enviar las mediciones de flujo crítico a calibración en laboratorio y luego tratar de controlar las condiciones de medición en terreno para que se ajusten a las especificaciones. Sin embargo, existe un gran número de cosas que pueden resultar mal cuando se instala un medidor en terreno y se pone en uso. Algunas de ellas se describen en la Figura 3 a continuación. Generalmente los mayores errores no los causa el medidor en sí sino que surgen de algún otro punto en la cadena de medición. Muy pocas veces se cumple con los requerimientos de instalación del medidor. A modo de ejemplo se puede mencionar que en casi 6.000 calibraciones realizadas por primera vez por Indmeas, se encontró que el 58% de las mediciones de flujo tenían un error sistemático de más del 2% y el 16% tenía un error sobre el 10%.

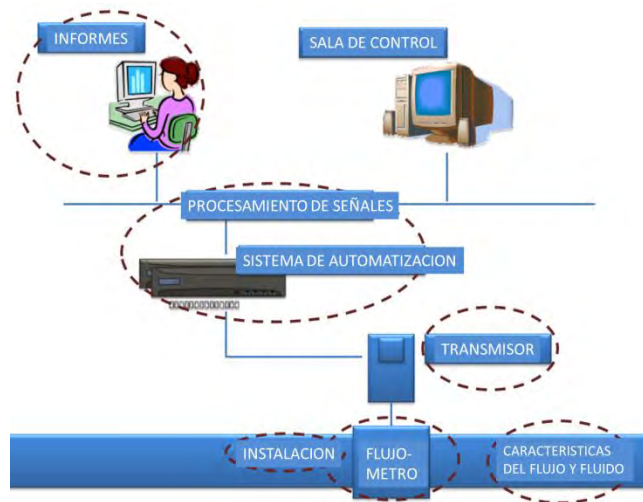


Figura 3 Las principales fuentes de errores de medición surgen de la cadena de medición, con frecuencia no del flujómetro.

La única forma de controlar la operación de la cadena completa de medición es controlar la medición utilizando calibración en terreno.

METODOLOGÍA

Calibración en terreno y métodos de verificación en general

Los probadores del tipo pistón son el método de calibración más exacto para los flujos líquidos, pero también el más caro. El principio de estos probadores se basa en medir el tiempo requerido para recolectar un volumen de líquido conocido dentro de un cilindro de pistón. La incertidumbre de la calibración es del orden de 0,2%, pero las desventajas incluyen no sólo los altos costos sino también la difícil implementación porque el flujo necesita dirigirse a través de un cilindro de prueba separado. Los probadores generalmente son utilizados en la industria petroquímica, especialmente en plataformas en alta mar (Kuoppamäki, 2003).

Una comparación con respecto del nivel de estanque o el pesaje de líquidos utilizando un camión cuba y una romana es un método comúnmente utilizado para verificar la medición del flujo. Esto, sin embargo, siempre es difícil y a menudo imposible de disponer, particularmente cuando se trata de flujos mayores.

Existen también dos métodos disponibles que usan trazadores para calibración de flujo: El método de dilución y el método de tiempo de tránsito (Organización Internacional de Estandarización, 1977). En general estos métodos tienen la ventaja de que no se requiere hacer modificaciones a las tuberías de proceso ni a la operación.

En el método de dilución, el trazador es inyectado en forma continua al flujo y se determina su concentración diluida. Entonces, a partir de la tasa de dilución, se calcula el flujo. El trazador puede ser un isótopo radioactivo de vida media corta o algún otro elemento químico fácilmente detectable como el litio o la rodamina. Estas técnicas presentan mayores incertidumbres que otras técnicas de calibración o verificación, pero son generalmente muy idóneas para mediciones de flujo de canal abierto.

Actualmente, el método de tiempo de tránsito de radiotrazador parece ser el más flexible y efectivo en la industria para la calibración en terreno, como se describe en la Figura 4. Es adecuado tanto para flujos líquidos como de gas, cubre un rango muy amplio de velocidades de flujo, con una incertidumbre muy baja y sin perturbar el proceso.

Calibración en terreno con el método de tiempo de tránsito de radiotrazador

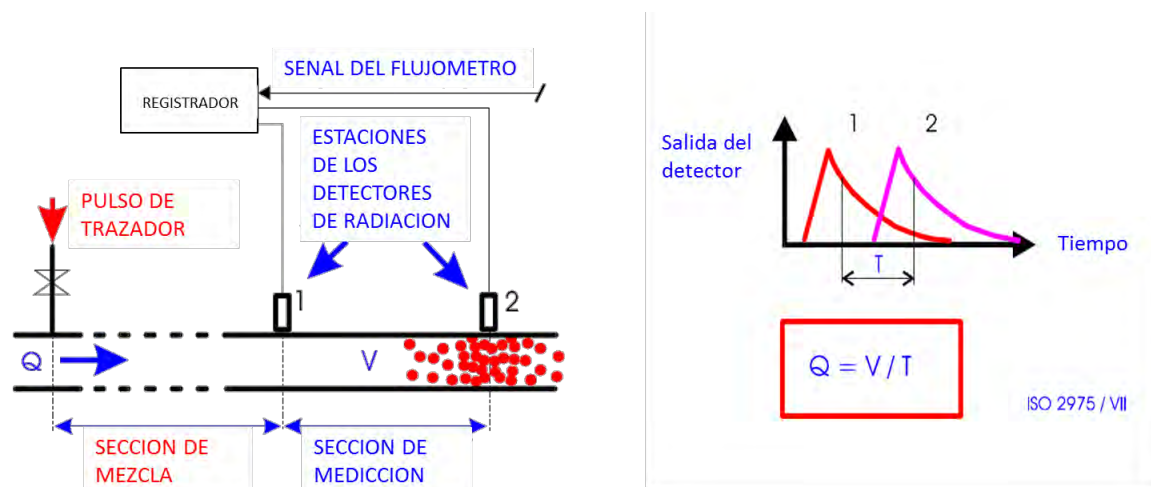


Figura 4 Método de tiempo de tránsito

Dependiendo del tipo de fluido en cuestión, se inyecta una pequeña cantidad de trazador líquido radioactivo o gas en el flujo. Aguas abajo, donde el pulso del indicador se ha mezclado en toda la

sección cruzada del flujo, se mide su velocidad en una sección de tubería recta utilizando dos detectores de radiación montados sobre la tubería. La radiación Gama emitida por el indicador penetra la pared de la tubería y es detectada por el detector. Cuando el impulso del trazador pasa el primer detector se registra la concentración de respuesta del indicador. Cuando el impulso pasa por el segundo detector se registra nuevamente una medición similar. El valor de referencia de flujo Q se obtiene a partir de la siguiente fórmula:

$$Q = \frac{V}{T} = \frac{\pi L D_{in}^2}{4T} \quad (1)$$

Donde:

V = volumen interior de la tubería entre los detectores

T = tiempo que demora el impulso del trazador entre los detectores

D_{in} = diámetro interno de la tubería

L = distancia entre los detectores



Figura 5 Calibración en terreno de una línea de flujo de gas natural

La amplia aplicabilidad del método de tiempo de tránsito de radiotrazador para la calibración en terreno en la industria de procesos ha quedado bien demostrada por Indmeas que ha utilizado este método para calibraciones validadas en terreno por más de 17 años a la fecha. El régimen de flujo reconocido es de 0,5 – 5.000 l/s para los líquidos y 5 – 5.000.000 l/s para flujos de gas. La mejor incertidumbre de calibración validada ha sido 0,5% tanto para flujos líquidos como de gas. La Figura 5 muestra una calibración en terreno en ejecución.

Desde que iniciara actividades en 1986, Indmeas ha realizado aproximadamente diez mil calibraciones en terreno en industrias de energía y procesamiento en Finlandia y Suecia. Esta cifra es importante incluso en términos globales.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Ejemplo de calibración no. 1: Sistema de balance de agua

Se evaluó el sistema de agua de una planta de procesamiento y se identificó una diferencia de balance cercana al 30%. La medición total fue calibrada y se detectó un gran error causado

principalmente por un error humano en la instalación y puesta a punto. La siguiente Figura 6 ilustra el ejemplo.

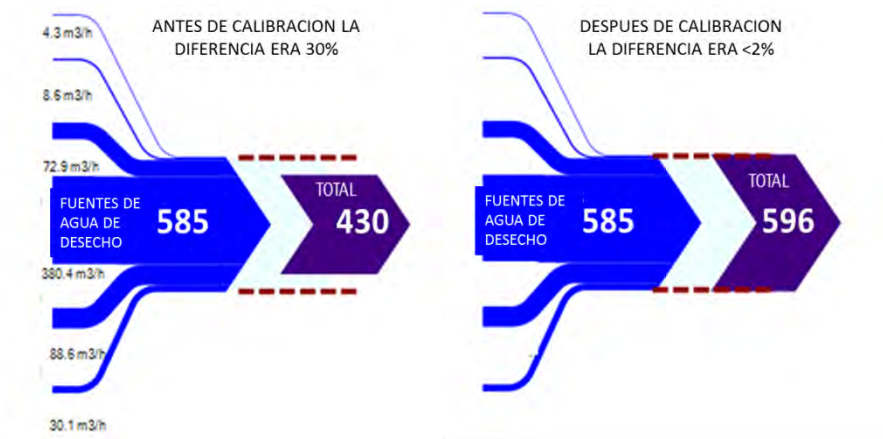


Figura 6 Balance de agua antes y después de la calibración del medidor total.

Cuando el error de ajuste y la falla fueron corregidos, la diferencia del balance se redujo a menos del 2%.

Ejemplo de calibración no. 2: Instalación de medición en flujo de vapor

Se calibró un sistema de medición de flujo de una tubería de vapor en una industria papelera con un trazador gaseoso nuclear. Se detectó un error muy grande y la razón era obvia (ver Figura 7). La instalación de la placa de orificios fue muy mal hecha. Dado que las tuberías de impulsión que se necesitan para medir la diferencia de presión no pudo ajustarse entre la pared y la tubería de vapor, el departamento de mantención soldó muy someramente cuatro ángulos de 90 grados exactamente antes y después de la placa de orificio de calibración. Esto eliminó toda posibilidad de que el medidor pudiera funcionar adecuadamente.

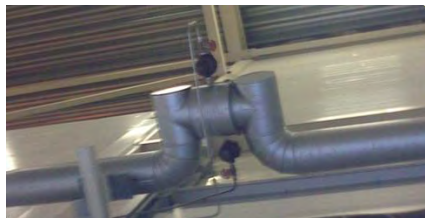


Figura 7 Ejemplo de una instalación mal hecha.

Ejemplo de calibración no. 3: Problema en el bloque para cálculo de señal de automatización

De los miles de calibraciones realizadas durante los últimos 10 años ha surgido una estadística muy interesante. Una de cada cinco mediciones tenía un error de más del 2% en la cadena de procesamiento de señal. Eso significa un error en la transformación A/D, escalamiento o compensación de densidad. Estos errores casi siempre se deben a falla humana. A continuación, en la Figura 8, se muestra un ejemplo de este tipo donde un antiguo coeficiente de corrección de 1,1 de origen desconocido ha sido dejado por error en el bloque de cálculo de señal en el sistema de automatización. Esto causó automáticamente un error de +10% en la cadena de medición.

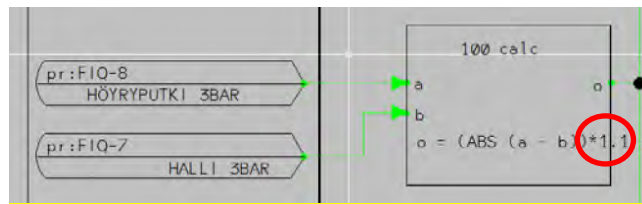


Figura 8 Un antiguo factor de corrección (1,1) fue dejado por error en el bloque de cálculo del sistema de automatización.

Ejemplo de calibración no. 4: Pulpa con contenido de magnetita con flujómetro en ubicación no ideal

Se instaló un flujómetro basado en arreglo sonar en una línea de pulpa con contenido de magnetita en la única posición disponible, que era a corta distancia después de la bomba de descarga. Esta pulpa es muy difícil de medir con algunas tecnologías de flujómetro debido a sus fuertes características magnéticas que causan errores en los medidores de flujo electromagnéticos y por sus propiedades corrosivas, que pueden afectar los medidores que utilicen algún tipo de tecnología invasiva. Por lo tanto, se eligió un flujómetro no invasivo de arreglo sonar. En el año 2009, una calibración en terreno a baja velocidad de flujo (20% del flujo máximo) mostró un error de -21% con +/-6,0% de incertidumbre (95% de confianza) que se creía se debía a una condición de pulpa no homogénea. Una calibración a mayor velocidad (45% del flujo máximo) mostró un error aceptable de -1,5% con +/-2,8% de incertidumbre porque se creía que la pulpa era homogénea (ver Figura 9). Entonces se ingresaron las correcciones de la calibración al Sistema de Control Distribuido de la planta. Con estas nuevas correcciones se realizó una recalibración a baja velocidad (23% del flujo máximo) y entonces se encontró que el error era de +3,2% con una incertidumbre de +/-3,8%, lo que el cliente estimó como aceptable. Tres años más tarde, en 2012, se realizó otra calibración en terreno a dos velocidades de flujo levemente diferentes de las originales debido a las condiciones de planta existentes en ese momento. Los errores fueron de -0,8% con +/-2,5% de incertidumbre a baja velocidad (58% del flujo máximo) y -1,5% con +/-5,5% incertidumbre a mayor velocidad (75% del flujo máximo). Así, se demuestra que en ubicaciones no ideales con pulpas de difícil medición una medición precisa de flujo con confiabilidad de largo plazo puede obtenerse utilizando una tecnología de medición robusta y libre de inestabilidades, como es el caso del medidor de flujo basado en arreglo sonar combinado con una calibración en terreno.

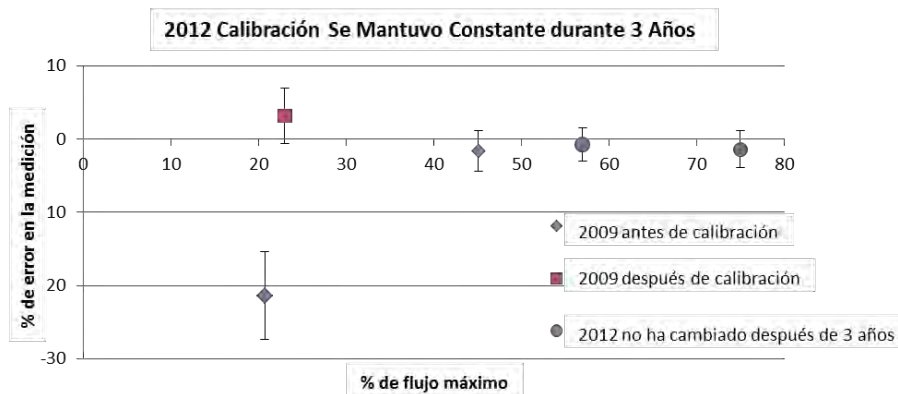


Figura 9 Calibración en terreno verifica la medición estable con medidor sonar durante 3 años.

Aseguramiento de calidad entre calibraciones

Las calibraciones en terreno solas no pueden garantizar la calidad de la medición. Ellas son parte fundamental del programa de aseguramiento de calidad, pero la estabilidad entre las calibraciones debe ser también seguida de otros elementos. Los sistemas modernos de automatización equipados con bases de datos históricos proporcionan una solución muy útil para estos efectos. Es posible construir un sistema de detección de medición con falla basándose en los balances de volumen y los controles de estabilidad que generan alarmas en caso de inconsistencias importantes. Esta combinación de detección de una medición con falla y las calibraciones en terreno permiten programar la mantención basándose en la condición de la instrumentación que, en sistemas que realizan cientos de mediciones, significan importantes ahorros y también una mejor calidad de medición.

Selección de una tecnología apropiada para medición de flujo en aplicaciones típicas en minería

Una clave para conseguir mediciones de flujo confiables al largo plazo es la selección de un medidor de flujo que posea la mejor tecnología disponible para la aplicación requerida. La automatización del proceso requiere mediciones que sean exactas, repetibles y estables. A menudo la exactitud es la que recibe la mayor atención en las especificaciones y decisiones de compra. La repetibilidad es también generalmente especificada pero se le da sólo una atención secundaria. Y en general ni siquiera se especifica la necesidad de estabilidad a largo plazo. Una de las razones para ello es la dificultad de replicar las condiciones del mundo real para lograr resultados de pruebas significativas y sus especificaciones. Exactitud y repetibilidad – como se establecen en pruebas de laboratorio de corto plazo - es de poco valor para el usuario si la estabilidad del flujómetro a largo plazo en su ambiente de trabajo real es deficiente. De hecho una investigación realizada recientemente en la industria reveló que el factor de preocupación principal al comprar un nuevo medidor de flujo era "una mejor estabilidad" (Hoske, 2012).

La estabilidad a largo plazo se ve afectada por factores internos del flujómetro como es el caso de su diseño fundamental y los mecanismos inestables inherentes asociados. La estabilidad también resulta afectada por factores externos al flujómetro como es el caso de la pérdida de la calidad funcional causada por fluidos y pulpas abrasivas y/o corrosivas e incrustación en las paredes internas de la tubería, todo lo que puede tener efectos sobre los medidores invasivos y algunos no invasivos. Comprender estos factores hace más fácil al usuario seleccionar la tecnología de medidor de flujo que proporcione la mejor estabilidad a largo plazo para una aplicación determinada.

El flujómetro no invasivo de arreglo sonar supera muchos de estos factores internos y externos que perjudican la estabilidad a largo plazo. Los mecanismos inherentes de inestabilidad han sido grandemente reducidos en el diseño básico debido al uso de técnicas de procesamiento de señal de dominio de frecuencia que eliminan la mayoría de esos mecanismos inestables debidos a pequeños cambios de amplitud en las señales análogas. Este diseño fue seleccionado dados los exigentes requerimientos de los clientes iniciales para aplicaciones en un pozo de petróleo y gas donde se requería una estabilidad de 10 años sin posibilidad de recalibración. El diseño no invasivo elimina totalmente las preocupaciones por problemas de abrasión y corrosión. Y su capacidad de trabajar aun con incrustaciones presentes en la pared interior de la tubería, que es causa de falla para otros medidores, reduce el mecanismo de inestabilidad principalmente al resultante de los cambios de diámetro interno de la tubería provocados por acumulación de incrustación, que generalmente es un factor conocido y cuantificable que puede ser compensado.

La excelente estabilidad a largo plazo del flujómetro sonar en las aplicaciones mineras queda evidenciada por la sólida y rápida aceptación de esta tecnología como el estándar comprobado en tuberías de pulpa de gran longitud en el mundo entero. Al contar con múltiples medidores en la misma tubería, los operadores pueden evaluar con facilidad la estabilidad a largo plazo tanto en días como incluso en años, lo que es muy importante para la detección de fugas críticas. En una planta concentradora con sólo un medidor en una tubería, una evaluación de juicio preciso de la estabilidad en un horizonte de meses y años es casi imposible.

Un ejemplo de esta excelente estabilidad a largo plazo es la instalación de cuatro medidores sonares realizada en 2010 en un concentrado de 100 km. de longitud que transporta concentrado de cobre. La información de dos de los medidores ubicados a más de 20 km. de distancia entre sí se comparó durante un período de 24 horas con muestreo a intervalos de 10 segundos (Figura 10). Los datos obtenidos en Marzo 2011 muestran que los medidores estuvieron a +/-2% entre sus lecturas un 96,8% del tiempo. Los datos recogidos en Abril 2012 – 13 meses más tarde – muestran que los mismos medidores están a +/-2% entre sus lecturas un 97,8% del tiempo, lo que es estadísticamente un cambio insignificante. La razón para usar un histograma y establecer la cantidad de tiempo que los medidores están dentro de un porcentaje estimado de diferencia es que las variaciones transitorias del flujo de la tubería crean realmente flujos diferentes en distintos puntos dentro de la tubería que están separados por decenas de kilómetros.

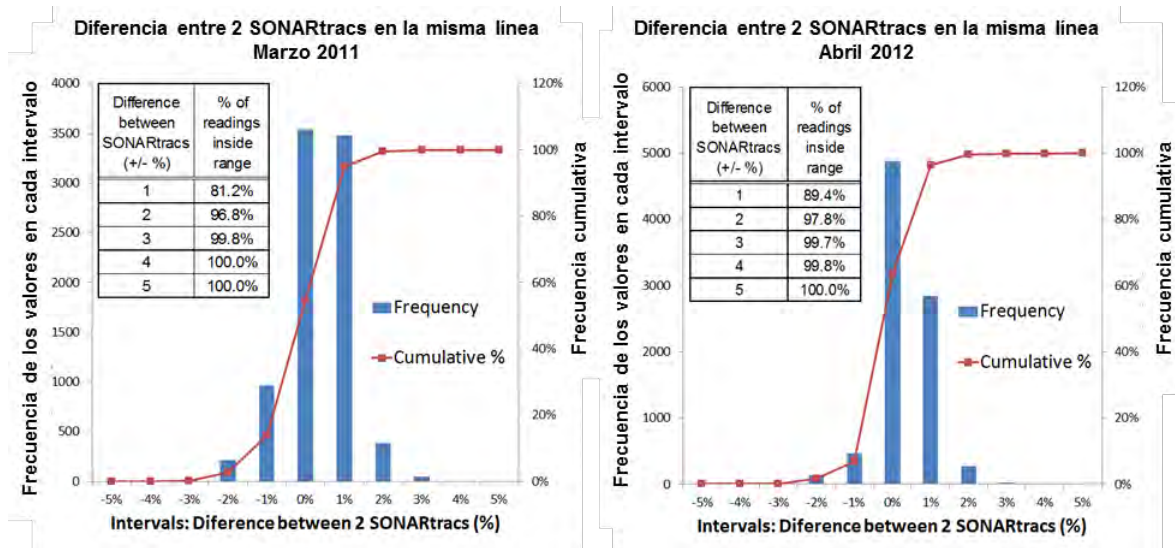


Figura 10 Comparación entre 2 medidores en la misma línea demuestra estabilidad al largo plazo.

CONCLUSIÓN

Ha sido demostrado que la calibración en terreno de los flujómetros ha sido desarrollada a un alto nivel comercial logrando calibraciones exactas en terreno con resultados trazables en un laboratorio de calibración. Esta herramienta, cuando se combina con un flujómetro robusto, inherentemente estable y de libre de mantención, como es el caso de la tecnología no invasiva basada en arreglo sonar, produce mediciones de flujo y resultados de balance másico más exactos con estabilidad excelente al largo plazo. Esta combinación permite mejor rendimiento de los sistemas de automatización en aplicaciones en procesamiento de minerales.

Los resultados obtenidos por las calibraciones realizadas en terreno utilizando el método de tiempo de tránsito de radiotrazador mostraron que, en promedio, la exactitud de las mediciones de flujos industriales está muy lejos de las especificaciones del flujómetro. Las incertidumbres están en el orden de diez veces las de las especificaciones del medidor. Los medidores por sí solos raramente fallan, pero las mediciones de flujo, incluso las realizadas por medidores de óptima calidad, resultan influenciadas por las condiciones que afectan las posiciones de la instalación así como también por los problemas en el procesamiento de la señal.

Un sistema de aseguramiento de calidad basado en las calibraciones de flujo realizadas en terreno ha demostrado ser un medio efectivo para mejorar la precisión de las mediciones de flujo en la industria de procesos. Basándose en la experiencia obtenida en más de 10.000 calibraciones en terreno, un objetivo de nivel realista para una precisión asegurada está entre 1-2% dependiendo de la aplicación. Esto generalmente cumple o excede los requerimientos de las autoridades competentes y/o el control operacional. Se demostró que al seleccionar la tecnología de flujómetro apropiada, como es el caso del medidor no invasivo basado en arreglo sonar, es una contribución importante para una medición confiable y exacta en ciertas aplicaciones.

REFERENCIAS

Hoske, M.T. (2012) 'Flowmeter trends, applications', *Control Engineering Magazine*, número de Julio 2012, pp. 14.

Organización Internacional de Estandarización (1977) *Measurement of water flow in closed conduits - Tracer methods - Part VII : Transit time method using radioactive tracers*. ISO 2975/VII:1977, Ginebra.

Kuoppamäki, R. (2003) 'Guidelines for efficient improvement of accuracy in oil and gas flow measurements', *21 Taller de Medición de Flujo del Mar del Norte*, Stavanger.

Kuoppamäki, R., Baoyu, Z., Lide, H. & Xiaona Z., (1996) 'A Quality System for Flow Measurements in Industry', *Procedimientos de la 8va Conferencia de Medición de Flujo*, Beijing, pp. 579-584.