

# Técnica para calibración en terreno de flujómetros instalados en plantas de procesamiento de mineral

**Ville Laukkanen**

*Indmeas Oy, Finlandia*

**Bob Maron**

*CiDRA Minerals Processing, USA*

## RESUMEN

Gran parte del gasto de mantención de una planta se realiza tratando de obtener una medición exacta del flujo que ofrezca una precisión satisfactoria y estabilidad a largo plazo, particularmente cuando no existe un lugar en la planta donde se cumplan las condiciones "ideales". El uso de una calibración de flujómetro en terreno al combinarse con la tecnología adecuada de flujómetro puede entregar esta tan deseada calidad de medición a un costo total reducido.

La calidad de la medición está determinada por la calidad de la cadena completa de medición. Un medidor de flujo puede calibrarse en condiciones ideales de laboratorio, pero los efectos de su posición en la instalación en terreno y el procesamiento de la señal afectan el valor final que se informa a la sala de control. 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 permitiendo remediar los componentes del error donde se originan. 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. Este método ha sido totalmente probado en más de 10.000 calibraciones validadas por Indmeas de Finlandia, con una incertidumbre certificada de sólo 0,5%. Se entregan ejemplos.

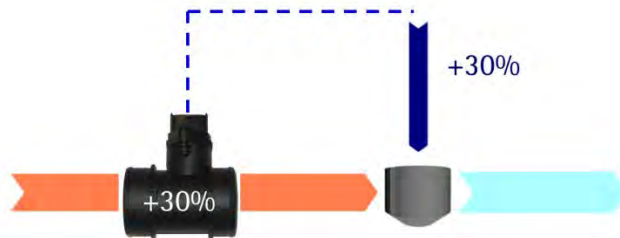
Mantener una lectura de flujo precisa por períodos prolongados también requiere de un flujómetro estable y confiable. El medidor de flujo de arreglo sonar no invasivo está bien constituido para enfrentar los desafíos de estas aplicaciones en el procesamiento de minerales, y resuelve los problemas de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

## INTRODUCCIÓN

### La necesidad de una medición de calidad

A continuación la Figura 1 expone un ejemplo típico demostrando los gastos causados por un error de medición en un flujo crítico:

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 se encuentran 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 las especificaciones del medidor.

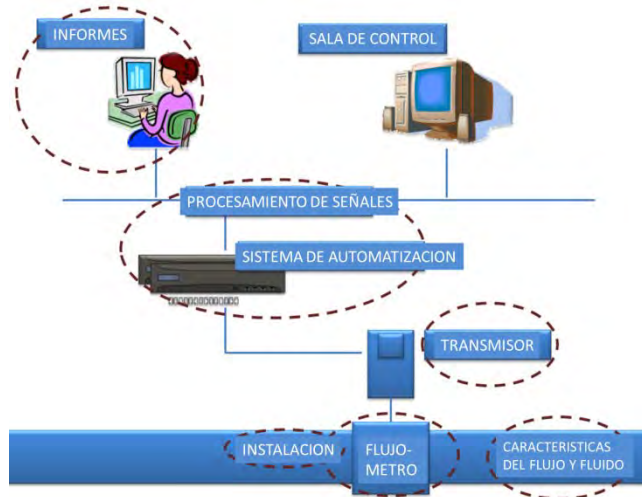


Figure 3 Las principales fuentes de errores de medición surgen de la cadena de medición, con frecuencia no del flujómetro.

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).

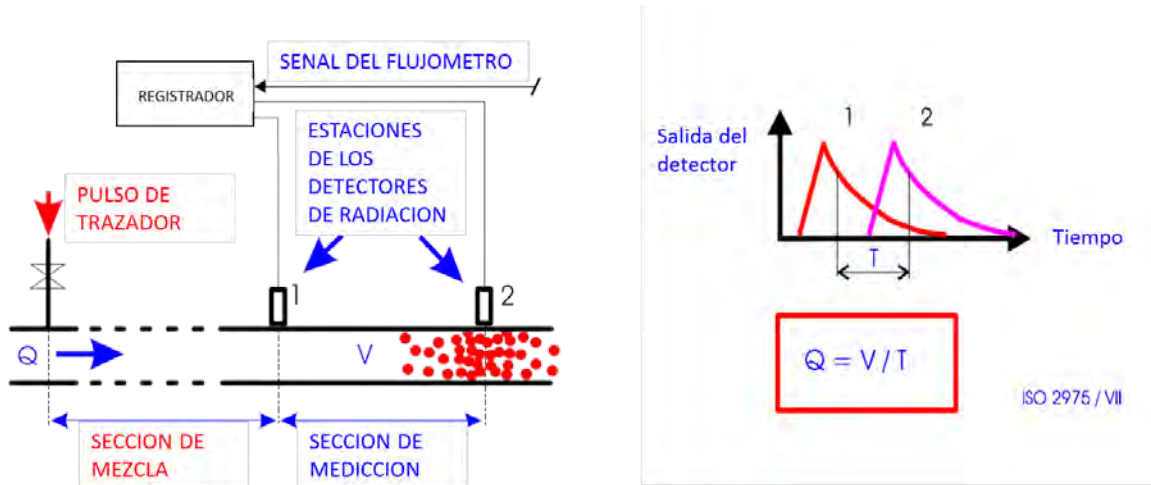
Una comparación con respecto del nivel de estanque o el pesaje de líquidos utilizando un camión cuba y una romana es un método comúnmente utilizado para verificar la medición del flujo. Esto, sin embargo, siempre es difícil y a menudo imposible de disponer, particularmente cuando se trata de flujos mayores.

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 otro método que usa trazador – 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:



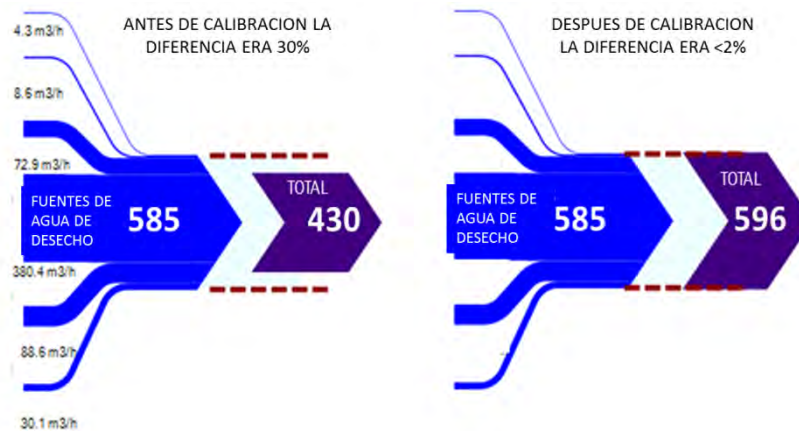


Figura 6 Balance de agua antes y después de la calibración del medidor total.

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.

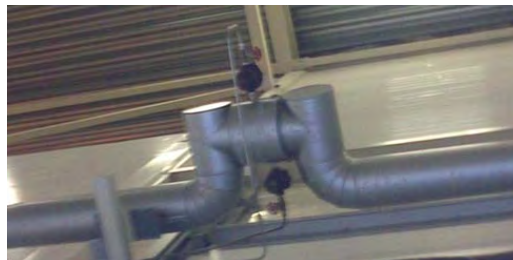


Figura 7 Ejemplo de una instalación mal hecha.

### 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.

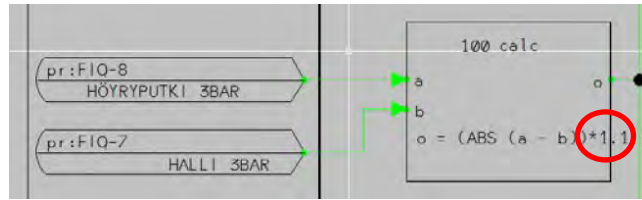


Figura 8 Un antiguo factor de corrección (1,1) fue dejado por error en el bloque de cálculo del sistema de automatización.

### 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 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 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 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 y -1,5% con +/-5,5% incertidumbre a mayor velocidad. 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.

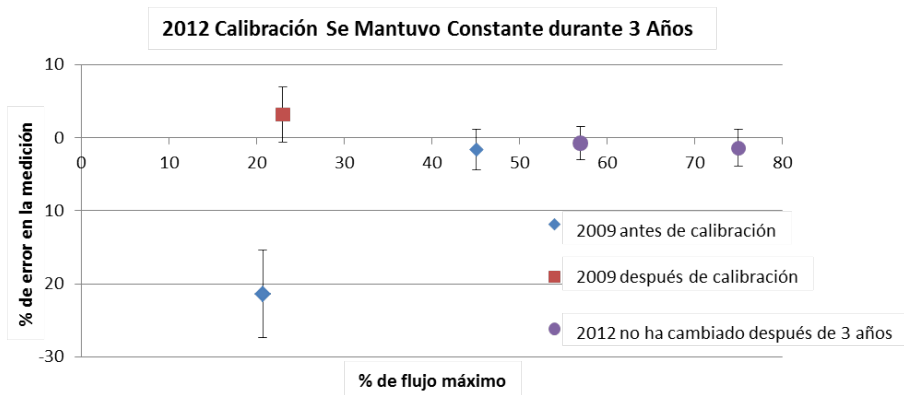


Figura 9 Calibración en terreno verifica la medición estable con medidor sonar durante 3 años.

## **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. Por ejemplo, en las zonas áridas de Sudamérica, la creciente escasez de agua ha aumentado también en forma sustancial la necesidad de mediciones exactas y confiables del agua en las operaciones mineras. Esta necesidad está siendo impulsada por las restricciones de uso de agua impuestas por el Gobierno y el deseo de las empresas mineras de operar de manera sostenible como un buen miembro de la comunidad. Así, las compañías mineras deben demostrar tanto a las comunidades como al Gobierno que están operando dentro de los límites de consumo acordados, que incluso pueden ser restringidos en el futuro.

La instalación de flujómetros en dichas tuberías de agua involucra muchos desafíos. Las tuberías críticas son muy caras de detener porque interrumpen la operación de la planta. La instalación de medidores invasivos en tuberías antiguas acarrea un riesgo de daño a la tubería que requerirá reparaciones de alto costo. Instalar un flujómetro electromagnético invasivo de gran tamaño y pesado es logísticamente complicado e implica riesgos de seguridad para el personal. Además, la acumulación de incrustaciones en la pared interior de la tubería, que es muy común en estas áreas, causa finalmente un deterioro en la medición resultando entonces en la necesidad de mantención tanto para los medidores electromagnéticos invasivos como para los medidores de ultrasonido con tecnología no invasiva.

El medidor no invasivo basado en arreglo sonar resuelve estos problemas. No requiere que la tubería sea intervenida, es liviano, se instala fácil y rápidamente, no es afectado por incrustaciones, funciona en tuberías de prácticamente cualquier material, tanto revestidas como sin revestimiento y no necesita mantención.

Una muestra de aplicación típica es la instalación de un medidor sonar de 30" realizada recientemente en una empresa de la gran minería en el norte de Argentina. La línea lleva 12 años alimentando agua fresca desde pozos profundos a la planta concentradora, y el Gobierno requirió la medición de flujo para regulación del consumo del agua. El flujómetro electromagnético existente presentaba fallas aleatorias en su lectura a causa de la falla del sello del electrodo que permitía filtraciones de agua en la electrónica. La detención de la línea para reparar o reemplazar el medidor requeriría también detener la planta concentradora con la consiguiente y costosa pérdida de producción. Aunque una reparación parcial del flujómetro electromagnético durante la detención



programada del concentrador lo puso nuevamente en operación, el cliente perdió confianza en el rendimiento de este medidor y decidió cambiarse a la tecnología sonar.

Otra aplicación típica es la instalación de dos medidores sonares de 48" realizada en una empresa de la gran minería en el norte de Chile. Las tuberías existentes transportaban agua recuperada desde el tranque de relaves a la planta concentradora. Una regulación del Gobierno y el control operacional de la mina solicitaron la medición de flujo correcta. No existían flujómetros en las tuberías. Sin embargo, se sabía que la descamación severa de los electrodos en los flujómetros de otras tuberías era un problema serio. También, los flujómetros electromagnéticos de gran tamaño para tuberías de 48" son difíciles de instalar debido a sus dimensiones y peso, además de su alto precio. Estos factores hicieron que la compañía seleccionara la tecnología sonar durante un rediseño para la expansión de la planta.

## 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 basada en arreglo sonar, produce mediciones de flujo y resultados de balance másico más exactos. Esta combinación permite un procedimiento de Aseguramiento de Calidad efectivo y eficiente que mejora la confiabilidad de la instrumentación de flujo, reduce el costo total de las actividades de mantención relacionadas, optimizando así la operación de la planta y disminuyendo los costos de operación.

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

- 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.