

Verificación de la precisión de los flujómetros instalados en las plantas de procesamiento de minerales

Bob Maron, Christian O'Keefe, Alex van der Spek

CiDRA Minerals Processing Inc., USA,

Philip Stacy

Alden Research Laboratory, USA

RESUMEN

Un problema común y a la vez fuente de mucha confusión en las plantas de procesamiento de minerales se refiere a cómo determinar si los flujómetros que están físicamente instalados están operando adecuadamente. Esta es una tarea ambiciosa dada la dificultad asociada a la posibilidad de pasar una cantidad controlada de fluido a través del medidor y la incapacidad de sacar el medidor para realizar las pruebas. Diversas técnicas existen para verificar la operación del flujómetro – tanto el sistema completo como sus subsistemas - pero todas ellas carecen de una verdadera calibración de laboratorio. Sin embargo, cuando se realizan en forma cuidadosa, estas técnicas pueden proporcionar al usuario un nivel de confianza satisfactorio.

Este documento primeramente revisa los puntos esenciales de una calibración real de laboratorio de los flujómetros y las incertidumbres de medición asociadas que proporcionan un entendimiento fundamental de los principios básicos de calibración como base para usar y comprender las técnicas posteriores ejecutadas en planta. Luego se revisan las diversas técnicas aplicadas en planta y se presentan ejemplos.

A continuación se presenta la verificación realizada en pruebas de estanque que proporcionan al usuario la mayor seguridad y garantía y la menor incertidumbre con respecto de la precisión del flujómetro. Se presentan los pasos básicos de la prueba y se examinan diversas incertidumbres y cantidades para una prueba típica. Aun cuando es la más útil, esta prueba es a menudo la más difícil de implementar, por lo tanto, se presentan otras técnicas.

Para los flujómetros instalados en aplicaciones de circuito cerrado de molienda en plantas de beneficio, una de las técnicas disponibles implica comparar el flujo a través de la batería de ciclones con el rendimiento teórico de los ciclones utilizando la presión de entrada del ciclón y los datos de funcionamiento del fabricante. Además, el funcionamiento del medidor puede determinarse al mirar las correlaciones entre la tasa de flujo y otros parámetros, como es el caso de los amperes o la potencia de la bomba.

Finalmente, se presentan las técnicas para verificar el funcionamiento de los subsistemas del flujómetro que incluyen las pruebas eléctricas realizadas por los flujómetros mismos, así como también pruebas realizadas con instrumentos dedicados. Se discuten sus ventajas y limitaciones.

INTRODUCCIÓN

Determinar si los flujómetros instalados están proporcionando lecturas precisas es uno de los desafíos más importantes y comunes en las plantas de procesamiento de minerales. Esto resulta particularmente complejo dada la dificultad de proporcionar una "señal de referencia" conocida, que significa pasar una cantidad prevista de fluido a través del medidor. Un medidor típico tiene una precisión calibrada de +/-1% lo que significa que un procedimiento de calibración requiere un flujo de referencia con una incertidumbre de tres a 10 veces menor, es decir, 0,3% a 0,1%. En terreno esto resulta extremadamente difícil. El desafío entonces se transforma en elegir un procedimiento que sea práctico, ejecutarlo con cuidado, y evaluar las incertidumbres asociadas para poder entregar un nivel de confianza sobre la precisión del flujómetro. Esto conducirá a obtener una mayor confiabilidad del instrumento, mayor disponibilidad y menores costos generales de mantención.

El aseguramiento de la incertidumbre de medición en la instalación del usuario final consiste en dos partes básicas: La calibración del medidor en condiciones ideales de laboratorio y la reproducción en terreno de las condiciones de medición del laboratorio. Las diferencias inevitables pueden ser estimadas utilizando datos teóricos y experimentales, pero generalmente son ignorados. Los errores típicos de medición encontrados en más de 1.000 pruebas de verificación en campo realizadas por una empresa muy experimentada utilizando el método de trazado nuclear en tuberías de agua muestran que la precisión medida en terreno es generalmente más de diez veces peor que las especificadas por el fabricante del flujómetro. Esto sugiere que probablemente el medidor sea el componente de mayor precisión en la cadena de medición y los errores más importantes provengan de otras fuentes.

La incertidumbre de medición asociada a la cadena total de medición en terreno tiene muchos componentes que generalmente se combinan utilizando una técnica RMS (valor cuadrático medio). Los componentes de incertidumbre son: incertidumbre de calibración del medidor (precisión especificada), tolerancias mecánicas y eléctricas, propiedades del fluido, perfil no ideal del flujo, estabilidad del medidor, acoplamiento del fluido al sensor, transmisión de señal a la sala de control, tolerancias del sistema de adquisición de datos, etc.

Los procedimientos de campo presentados en este documento tienen un amplio rango de dificultades de implementación e incertidumbres asociadas. El método de prueba de estanque generalmente produce la menor incertidumbre, pero a menudo no es una opción porque no se dispone de un estanque adecuado. La medición de tasa de flujo de alimentación al ciclón presenta otras opciones. La técnica de tiempo de tránsito utilizando un trazador radioactivo es una opción que en ocasiones se utiliza donde no se puede aplicar otra técnica. Aunque es ampliamente utilizada en Europa, en Sudamérica se utiliza muy poco en aplicaciones mineras, probablemente porque requiere personal calificado y el manejo de material radioactivo.

El personal de instrumentación generalmente está familiarizado con las estadísticas básicas asociadas a las medias y desviaciones estándares de los datos de prueba, pero pocos tienen conocimiento de la determinación de los niveles e intervalos de confianza asociados. La determinación y uso de los niveles de confianza se ha hecho históricamente utilizando la metodología estadística tradicional. Recientemente, los estándares, laboratorios y la industria se están desplazando hacia el uso de la técnica de Simulación Montecarlo (MCS) que requiere menos conocimientos estadísticos para implementarse y elimina algunas de las simplificaciones matemáticas de los métodos estadísticos tradicionales. Se presenta un ejemplo de su implementación.

METODOLOGÍA

Calibración real de flujómetros en laboratorio

Para poder apreciar la complejidad de verificar el funcionamiento de un flujómetro instalado en un proceso minero industrial, es útil comprender el proceso estándar de calibración de laboratorio con agua bajo condiciones controladas y la incertidumbre asociada en ese proceso. Sólo entonces se puede

comprender el nivel agregado de dificultad e incertidumbre asociados a un intento de validar el funcionamiento de un flujómetro una vez que es instalado en un circuito de proceso.

La calibración determina el funcionamiento de un medidor comparado con un estándar aceptado, lo que generalmente se conoce como mediciones primarias (peso, tiempo, temperatura) trazables con respecto de los estándares de referencia acordados internacionalmente, por ejemplo, en los laboratorios nacionales.

Un centro de calibración real de flujómetro debe contar con personal altamente capacitado que cumpla con los estrictos procedimientos utilizando instrumentos que hayan recibido mantención estricta y con trazabilidad con respecto de los estándares de referencia nacionales. CiDRA realiza la calibración de los flujómetros de referencia en el laboratorio Alden Laboratories, que es el mayor proveedor de calibraciones de medidores de flujo de agua para el Instituto Nacional de Estándares y Tecnología (NIST) en Estados Unidos, con más de 150 años de experiencia.

Alden utiliza el procedimiento de análisis gravimétrico con una incertidumbre de medición mejor que 0,1%. Incluye mediciones primarias como peso, tiempo y temperatura que pueden ser medidas con baja incertidumbre utilizando instrumentos probados con trazabilidad con respecto de los estándares nacionales de referencia. Utilizando este método, la razón peso/tiempo entrega la tasa de flujo de masa y luego la razón de flujo de masa/densidad de fluido produce la tasa de flujo volumétrico, que es el resultado final deseado.

Metodología para la calibración de flujómetros en laboratorio

El procedimiento incluye primeramente establecer una tasa de flujo constante desde una bomba o un depósito de gran volumen de carga constante a un estanque sumidero de retorno. Luego, en el momento cero, se actúa una válvula de desviación que dirige el flujo a un estanque. Cuando el estanque está casi lleno, la válvula de desviación es nuevamente puesta en acción para dirigir el flujo de regreso al estanque sumidero de retorno y se registra el tiempo de término. La tasa real de flujo se calcula a partir de la siguiente relación:

$$flujo\ real = \frac{flujo\ masa}{densidad\ fluido} = \frac{\left(\frac{peso^*}{tiempo}\right)}{densidad\ fluido} = \frac{W}{T \rho_w \beta_c}$$

*corregida para flotabilidad y gravedad local

Análisis de incertidumbre de calibración de flujómetros en laboratorio

La incertidumbre de la medición es un tema en general bastante mal entendido, pero un conocimiento básico como el descrito (Bell, 1999) y demostrado (Richmond, 2000) es esencial para interpretar adecuadamente los resultados de calibración y verificación de los instrumentos como los flujómetros. La incertidumbre es la duda que existe con respecto de una medición. Se necesitan dos números para cuantificarla: Uno es el ancho de un intervalo de medición y el otro es el nivel de confianza indicando cuán seguros estamos de que el "valor real" esté dentro de ese intervalo. Por ejemplo: Tasa de flujo de 1000 m³/h +/- 10 m³/h con un nivel de confianza de 95%.

El análisis de incertidumbre para una calibración gravimétrica es muy complicado y está fuera del alcance de este informe. En general involucra la incertidumbre asociada a las mediciones de peso, tiempo, temperatura y su trazabilidad. Los pasos generales utilizando la metodología estadística incluyen: decidir qué datos y cálculos se necesitan para producir el resultado final; obtener los datos por medio de mediciones; estimar la incertidumbre estándar para cada dato; calcular los resultados; encontrar la incertidumbre combinada estándar; expresar la incertidumbre en términos de factor de cobertura entregando un intervalo y nivel de confianza.

Las incertidumbres pueden ser de dos tipos: Tipo A, obtenidas a partir de las estadísticas de mediciones repetidas; y Tipo B, obtenidas a partir de otra información tal como la experiencia, información publicada, y el sentido común. Todas las incertidumbres consideradas deben ser expresadas al mismo nivel de confianza convirtiéndolas en incertidumbre estándar, lo que puede entenderse como +/- una desviación estándar (68%). La incertidumbre estándar puede entonces ser escalada a otro nivel de confianza multiplicando por un factor de cobertura 'k'. Por ejemplo, un valor 'k' de 1 entrega un nivel de confianza

de 68%, y un valor 'k' de 2 proporciona un nivel de confianza de 95% que es el más comúnmente utilizado. Esta metodología estadística ha sido estandarizada (Organización Internacional de Metrología Legal, 2008/2010) y se usa tradicionalmente tanto en trabajos de laboratorio como en terreno. Recientemente, los laboratorios de estándar nacional han estado realizando una transición hacia un mayor uso de la técnica MCS (Organización Internacional de Metrología Legal, 2008) dados los beneficios de la simplicidad de su implementación y la eliminación de algunas aproximaciones matemáticas y presunciones que la metodología tradicional requiere. En este informe se usará la metodología MCS para estimar la incertidumbre en una evaluación por medio de prueba de estanque.

Verificación de flujómetros instalados por medio de prueba de estanque

Una prueba de estanque realizada con cuidado minucioso es una muy buena manera de verificar el funcionamiento del sistema completo de medición de flujo porque implica el paso de una cantidad medida de fluido a través del medidor, lo que simula una calibración en laboratorio, aunque con una incertidumbre mucho mayor. Se debe tener extremo cuidado y usarse los procedimientos adecuados pues las incertidumbres introducidas son significativamente mayores que una calibración de laboratorio y, de hecho, pueden fácilmente ser de tal magnitud como para invalidar los resultados de la prueba. El estanque debe ser lo suficientemente grande como para proporcionar una tasa de flujo relativamente constante, idealmente para varios grupos de decenas de minutos. El procedimiento implica establecer una condición de flujo constante y luego tomar las medidas de altura de estanque a intervalos de tiempo de manera de poder generar aproximadamente diez lecturas de altura versus tiempo. El volumen del flujo que pasa durante cada intervalo y la tasa de flujo promedio en el estanque durante el intervalo pueden entonces calcularse. Las lecturas totales de flujo tomadas del flujómetro durante los mismos intervalos se usan para obtener el promedio de flujo o la tasa de flujo en cada intervalo.

Análisis de incertidumbre en la verificación de la prueba de estanque de los flujómetros instalados

Las incertidumbres asociadas a las lecturas del flujómetro y el estanque deben ser entonces determinadas e ingresadas al análisis de datos y luego evaluadas utilizando la metodología estadística computacional tradicional o por muestreo aleatorio repetido utilizando la técnica de simulación MCS. Existen dos fuentes importantes de incertidumbre en las lecturas de flujo del estanque: El diámetro interno del estanque y la medición de nivel del estanque. El diámetro real de los estanques de gran tamaño conforme a obra ("as-built") construidos en terreno puede ser considerablemente diferente de la especificación del fabricante. Además, en los estanques de pulpa puede existir una capa gruesa de residuos en la pared interior que varía en espesor dependiendo de la altura del estanque, lo que agrega aún mayor incertidumbre a la medición del diámetro interior. La medición del nivel de estanque puede hacerse con un indicador electrónico de nivel o utilizando el método de flotación manual. La precisión del indicador de nivel conforme a su condición de instalación generalmente es del orden del 0,5%. La precisión del método de flotación puede ser fácilmente del 1% o mayor, dada la incertidumbre asociada al movimiento dinámico del flotador y la medición manual simultánea que se realiza con una cinta. Al tomar aproximadamente diez o más mediciones mientras el estanque se vacía o se llena, las estadísticas media y de desviación estándar pueden ser calculadas para poder tener una impresión de la calidad de la prueba. El nivel de incertidumbre de 95% para la tasa de flujo (que representa dos desviaciones estándar) como se calcula a partir de las mediciones de estanque, generalmente es de 1% a 2% en la tasa media de flujo. Esto es generalmente diez veces mayor que la incertidumbre similar para la tasa de flujo obtenida del medidor. Esto demuestra la alta incertidumbre asociada a las mediciones del diámetro y nivel en terreno.

Con mucha frecuencia se ejecutan las pruebas de estanque y se hacen importantes conclusiones poniendo poca atención a la incertidumbre. A continuación se entrega un ejemplo de una prueba donde no se evalúan las incertidumbres asociadas a las mediciones del estanque y el diámetro interno (DI), lo que condujo a conclusiones con poca validez estadística. El estanque tenía un tamaño suficiente entregando aproximadamente un flujo de 30 minutos, el que fue dividido en diez intervalos. Las mediciones de nivel en cada intervalo se realizaron utilizando un método de flotación manual. Las tasa de flujo promedio del estanque y los flujos del medidor fueron calculados como se muestra en la Figura 2, mostrando una diferencia de ~2%. No se asoció incertidumbre alguna a la medición del flujo del estanque y, dado que la precisión del flujómetro era +/-1%, se asumió que el flujómetro estaba descalibrado.

En este informe, se combinaron los datos de la prueba original con algunas presunciones de incertidumbre y se aplicó la técnica de simulación MCS para evaluar la validez estadística de la conclusión anterior según la cual el flujómetro estaba descalibrado. Se determinaron incertidumbres para el diámetro interno (DI) de la cañería utilizando las tolerancias estándar y el diámetro interno del estanque de acuerdo con las presunciones de la tolerancia de fábrica y acumulación de residuos. Se asumió una incertidumbre de +/- 1 seg. en 180 seg. para la medición manual de tiempo y +/-20mm para la medición del nivel del estanque. Las funciones de densidad de probabilidad (PSD) del estanque y las tasas de flujo del medidor que se muestran en la Figura 2 entregan una perspectiva valiosa para comprender esta prueba. La amplitud de las funciones de densidad de probabilidad PSD de la tasa de flujo del estanque indica que tiene una incertidumbre mucho mayor que la tasa de flujo del medidor. La distribución plana de la parte superior en ambas funciones PSD se debe principalmente a la presunción de que las distribuciones de incertidumbre, tanto para el estanque como para el diámetro interno de la cañería, son más bien rectangulares en lugar de Gaussianas o normales, como se esperaría en un proceso natural.

statistic	tank	flowmeter	comment	Monte Carlo Simulation inputs						
average flowrate, best (l/s)	790	814		MCS input equation = $\pi^2 \cdot d^4 \cdot X^2 \cdot 2 \cdot 1000 / \pi^4 \cdot X^3 \cdot 2 \cdot X^4 \cdot 1000$						
std dev, best (%)	15.7	1.83	0 measurement intervals	MCS input quantities						
average flowrate, MCS (l/s)	795	817	MCS includes	quantity	unit	PDF	mean	stdev	min	max
std dev, MCS (%)	16.4	1.5	Added Uncertainties:	X1, meter velocity	m/s	Gaussian	3.177	0.007		
				X2, Pipe ID	in	Rectangular			0.570	0.575
				X3, Tank ID	in	Rectangular			13.950	14.150
				X4, Tank height	in	Rectangular			0.920	0.960
				X5, time	s	Rectangular			179.000	181.000
Added Uncertainties:										
pipe ID, per standard tolerances		0.571 in, -0.3%, +0.7%	per pipe spec:							
tank ID plus scale	14 in, -25mm, +75mm		4 in nominal, +/-25mm wall tolerance, 0-50mm scale							

Figura 1 Estadísticas generales y entradas MCS

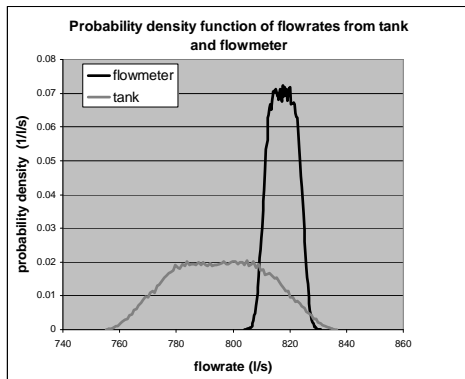


Figura 2 Función de densidad de probabilidad de tasa de flujo desde estanque y flujómetro

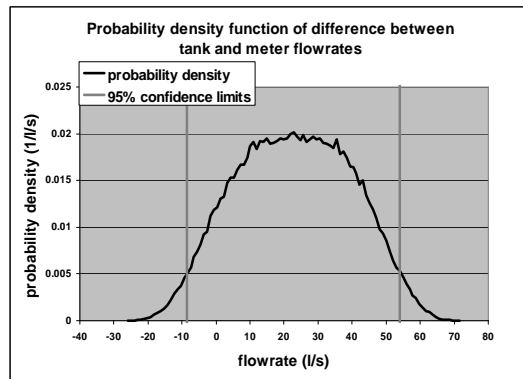


Figura 3 Función de densidad de probabilidad diferencia entre estanque y medidor

La Figura 3 muestra en forma gráfica la función de densidad de probabilidad de la diferencia entre las tasas de flujo a partir del estanque y el flujómetro. Aunque la tasa de flujo del estanque se asumió como una medida más absoluta pues se basa en un volumen de estanque medible, el análisis con técnica MCS muestra que su obviamente mayor incertidumbre con respecto de la incertidumbre del flujómetro significa que tiene una validez estadística baja como un "estándar de referencia". El intervalo de confianza de 95% en la diferencia es de -9 a +54 l/s, y la diferencia media medida de +15 l/s está dentro de este rango. Por lo tanto, aceptamos la hipótesis de que las medias son las mismas, en consecuencia no sería estadísticamente correcto decir que el medidor está "descalibrado".

Verificación de flujómetros instalados por comparación con el flujo de batería de ciclones

En los flujómetros instalados en las tuberías que alimentan baterías de hidrociclones, el flujo puede ser aproximado basándose en la información de ciclones entregada por el fabricante y en la presión de entrada de la batería de ciclones. El fabricante puede entregar gráficos de un diseño particular de ciclones y el tamaño que muestra la relación entre la cabeza (presión de entrada) y la tasa de flujo de un ciclón. Así, si se conoce la presión de la batería y el número de ciclones que están operando, entonces la tasa de flujo puede ser determinada a partir del gráfico. Basados en su experiencia, los fabricantes de ciclones consideran que este método tiene una incertidumbre de +/- 5%.

Este método se basa en el principio básico de que el ciclón representa un orificio a través del cual fluye un fluido incompresible. El flujómetro a ser verificado se instala en una de las entradas de fluido y en la salida se disponen dos flujos separados: Flujo sumergido y de rebalse. Dado que los dos flujos descargan a una presión de una atmósfera, la presión en el indicador de presión de entrada de la batería es, de hecho, la presión diferencial a través del ciclón. Esta presión diferencial se relaciona con la velocidad y densidad del fluido de acuerdo con la ya conocida relación:

$$\text{Caída de presión} = K \times \frac{1}{2} \times \text{densidad} \times \text{Velocidad}^2$$

Donde K es en algunas oportunidades llamado el menor coeficiente de pérdida y es experimentalmente determinado por el fabricante del ciclón para el tamaño particular del ciclón tanto para flujos de agua como para flujos de pulpa.

Verificación de flujómetros instalados por correlación con la potencia de la bomba

Esta técnica sirve para verificar un flujómetro instalado en la alimentación a una batería de hidrociclones. En el caso de las bombas centrífugas el consumo de potencia de la bomba se relaciona con la tasa de flujo. Incluso cuando la eficiencia de la bomba se desconoce, esta relación puede utilizarse para calcular la linealidad del flujómetro instalado. Desde luego se debe asumir que la eficiencia de la bomba es constante durante el intervalo de evaluación. Por lo tanto; un intervalo relativamente corto, de unos dos días, parecería apropiado.

Existen dos variaciones en esta técnica. La primera variación es usar datos históricos de la planta y examinar la correlación entre la potencia de bomba medida o los amperes de la bomba y la tasa de flujo. Se usan sólo datos obtenidos durante la operación normal y densidad de pulpa relativamente constante. Un coeficiente de correlación mayor que ~0,94 indica una buena linealidad.

La segunda variación utiliza comparación de datos históricos de la planta. Consiste en calcular un coeficiente de flujo basado en el flujo de la bomba y otro basado en la potencia eléctrica de la bomba. Estos se relacionan por una eficiencia desconocida y cuando se comparan gráficamente uno con otro, la linealidad de la bomba puede ser evaluada como se muestra en la Figura 4.

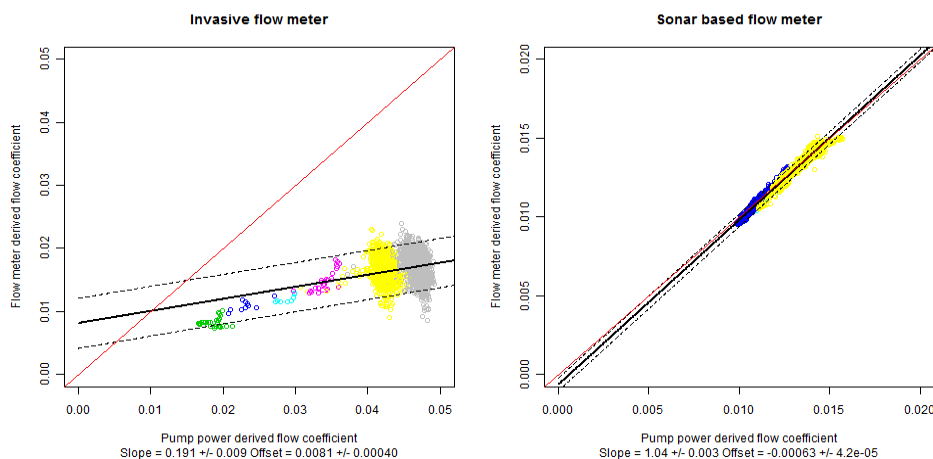


Figura 4 Relación entre coeficientes de flujos derivados de flujo y de potencia de bomba

En una representación gráfica del coeficiente derivado del flujo versus el coeficiente de flujo derivado de la potencia, esperaríamos ver una línea recta pasando a través del origen con una caída que es representativa de la eficiencia de bomba si se supiera que el flujómetro es preciso.

En forma ideal todos los puntos de datos coinciden con una línea con una declinación de 1 que pasa a través del origen. La línea negra es la línea de regresión lineal a través de los puntos de datos. Las líneas punteadas muestran el intervalo de predicción de 95% (amplio) basado en la varianza de los datos. En la Figura 4 el medidor más lineal aparece en forma evidente.

Verificación de flujómetros instalados usando trazadores radioactivos

Aunque el método de prueba de estanque es ampliamente utilizado en la industria minera en Sudamérica, en Europa el método de tiempo de tránsito utilizando trazadores radioactivos es al que se recurre con mayor frecuencia y el que se encuentra más estandarizado (Organización Internacional de Estandarización, 1977). Una empresa en Finlandia (Oy IndMeas AB) ha realizado más de 10.000 calibraciones en terreno con este método. En este método, una cantidad de trazadores con un período muy corto de vida media se inyecta con rapidez dentro de la tubería de proceso, generalmente antes de una bomba u otra fuente de mezcla para asegurarse de que el trazador quede bien mezclado a través del perfil de flujo. Después de una cierta distancia, lo suficiente como para asegurar que el trazador haya quedado bien mezclado en el flujo, se instalan detectores de radiación alrededor de la sección cruzada en al menos dos puntos diferentes en la cañería para detectar el radiotrazador cuando pase. Entonces puede calcularse el flujo multiplicando la velocidad promedio del flujo por el volumen de tubería entre los detectores. Esta prueba se repite con varias tasas de flujo para reducir los potenciales errores en la medición, incluyendo errores en la detección de pulso, fluctuaciones aleatorias en la tasa de flujo, irregularidades en la cañería que resultan en diámetros de cañería poco precisos, etc. La precisión de este método de calibración es generalmente estimada en 1%.

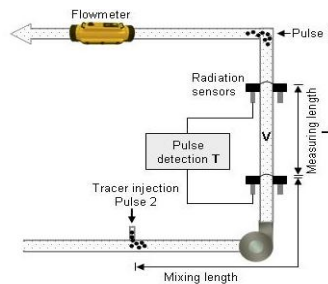


Figura 5 Verificación de flujómetro, método de tiempo de tránsito utilizando trazadores radioactivos

Verificación de flujómetros instalados por medio de pruebas de subsistemas

La mayoría de los fabricantes de flujómetros proporcionan un medio para probar diversos subsistemas o componentes de sus medidores utilizando instrumentos de prueba especiales o estándares, y/o programas de diagnóstico interno. Es importante comprender que ya no hay fluido pasando a través del medidor, estas pruebas sólo evalúan la funcionalidad del subsistema y no deberían ser considerados como una "calibración" del sistema completo. Por ejemplo, algunos fabricantes de flujómetros electromagnéticos suministran instrumentos de prueba especiales que pueden conectarse al flujómetro para evaluar los subsistemas electrónicos y el estado de los electrodos y pueden entregar un informe impreso. El flujómetro SONARtrac cuenta con un programa de diagnóstico interno que realiza pruebas a los subsistemas electrónicos y al estado del sensor y dispone de una salida electrónica a través de un puerto USB. Ambas técnicas son, en términos generales, equivalentes.

CONCLUSIONES

La incertidumbre asociada con las verificaciones en terreno de los flujómetros instalados es a menudo pasada por alto o mal interpretada, conllevando a falsas conclusiones sobre su funcionamiento. Esta incertidumbre puede ser cuantificada por medio de metodología estadística y/o Simulación de Montecarlo

MCS proporcionando así un intervalo de confianza asociado a un nivel de confianza que permiten tomar mejores decisiones. Se ha mostrado que la adecuada calibración de los flujómetros con una precisión declarada de $\sim\pm 1\%$ requiere un procedimiento gravimétrico realizado por un laboratorio experimentado que asegure que la incertidumbre del flujo de referencia es de cinco a diez veces menor que la precisión declarada del medidor que está siendo sometido a prueba. Se mostró en una prueba de estanque que las incertidumbres realistas en las verificaciones en terreno pueden resultar en que el flujo de referencia tenga una incertidumbre mucho mayor que la precisión declarada del flujómetro. Así, a menudo es imposible concluir que un flujómetro esté “descalibrado” a menos que sus valores sean muy diferentes del flujo de referencia de la prueba de estanque. Existen otros métodos de verificación disponibles como es el caso del método de trazado nuclear que es ampliamente utilizado en Europa; sin embargo se requiere de personal especializado y el uso de material nuclear, lo que involucra algunos temas de seguridad. Otros métodos, como la correlación con la potencia de la bomba y la comparación con las curvas de funcionamiento de los hidrociclones, se pueden implementar con mayor facilidad y pueden entregar un nivel razonable de confianza dependiendo de los requerimientos de aplicación. Aun si no se usa ninguno de estos procedimientos, se pueden obtener algunas garantías de funcionamiento utilizando capacidades externas o integradas en los flujómetros para evaluar sus subsistemas en forma independiente del flujo de fluido. Para mayor seguridad se recomienda una combinación de los indicados anteriormente. Cuando se siguen estas recomendaciones, los costos de mantención pueden ser reducidos y se puede aumentar la disponibilidad y confiabilidad de los flujómetros eliminando pruebas innecesarias o que llevan a conclusiones que no son estadísticamente válidas.

NOMENCLATURA

W = masa de agua

T = tiempo de llenado

ρ_w = densidad del agua

$$\beta_c = \text{corrección de flotabilidad} = 1 - \frac{\rho_{\text{aire}}}{\rho_{\text{agua}}}$$

REFERENCIAS

- Bell, S. (1999) ‘Measurement Good Practice Guide No. 11 (Issue 2), A Beginner’s Guide to Uncertainty of Measurement’, Laboratorio Nacional de Física, Reino Unido
- International Organization of Legal Metrology (2008/2010) *Evaluation of measurement data - Guide to the expression of uncertainty in measurement*, OIML G 1-100 Edn 2008 E, París, Francia.
- Organización Internacional de Metrología Legal (2008) *Evaluation of measurement data – Supplement 1 to the “Guide to the expression of uncertainty in measurement” – Propagation of distributions using a Monte Carlo method*, OIML G 1-101 Edn 2008 E, París, Francia
- Organización Internacional para la Estandarización (1977) *Medición de flujo de agua en conductos cerrados – Métodos por trazador – Parte VII: Método de tiempo de tránsito utilizando trazadores radioactivos*, ISO 2975/VII-1977 (E), Organización Internacional para la Estandarización, Ginebra, Suiza
- Richmond, M. Ejemplos de cálculos de incertidumbres; última modificación del 11 de Noviembre 2000, vista el 05 de Julio, 2011, en <http://spiff.rit.edu/classes/phys377/uncert.html>
- Oy IndMeas AB, Mediciones precisas de flujo por calibración en terreno, vista el 28 de Junio, 2011,