



■ Ingeniería

Mediciones no invasivas de caudales líquidos en las agroindustrias de Tucumán

Alejandro De Los Ríos*, Walter E. Kacharoski*, Enrique Feijoo**, Marcos A. Golato***, M. Valeria Bravo ** y Dora Paz****

*Tec. Qco., **Ing. Ind., ***Ing. Mec., ****Dra. Ing. Qco., Sección Ingeniería y Proyectos Agroindustriales, EEAOC.
mediciones@eeaoc.org.ar,



■ Introducción

Las agroindustrias de la región, principalmente la azucarera y citrícola, deben ajustar sus procesos para lograr condiciones óptimas de operación, tanto en la transformación de las materias primas como en el manejo de sus efluentes.

Por ello, es necesario contemplar los beneficios económicos de un uso eficiente de los fluidos y su protección de la contaminación, adoptando medidas para afrontar

los problemas relacionados con el uso y la escasez del agua y también procurando el empleo de nuevas tecnologías de tratamiento. El aprovechamiento de los líquidos en los procesos industriales no solo preserva la vida, sino también mejora la competitividad industrial. En este contexto, las mediciones de los flujos de procesos en fábrica para su regulación, optimización y los estudios del uso racional del agua resultan indispensables (Fiesp/Ciesp, 2010; Fiesp, 2009).

En algunos casos, algunas

fábricas carecen de instrumentos de medición, lo que dificulta las tareas de regulación y ajuste de las variables características de trabajo de los equipos involucrados. El Laboratorio de Ensayos y Mediciones Industriales (LEMI) de la Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres (EEAOC) brinda apoyo técnico a estas agroindustrias, para lograr optimizar sus procesos por medio de mediciones directas no invasivas de los flujos líquidos de las corrientes involucradas en ellos.

Por otro lado, las mediciones de caudales permiten fijar parámetros normales de operación y evaluar posibles mejoras con el objeto de aumentar la eficiencia de los procesos productivos, especialmente los vinculados con la generación de vapor y energía eléctrica, el consumo de combustibles de origen no renovable y el aprovechamiento y consumo racional del agua en las plantas industriales (Ingaramo *et al.*, 2004; Chávez Rodríguez *et al.*, 2013).

La medición de caudal constituye uno de los parámetros más importantes de las variables de un proceso industrial, ya que es imprescindible para realizar el balance de materia, controlar la calidad y regularla, y también cuantificar la emisión de contaminantes.

El LEMI cuenta con una gran variedad de instrumentos y equipos portátiles modernos para la evaluación de diversas variables operativas de proceso. Actualmente, dispone de tres caudalímetros ultrasónicos de última generación para flujos líquidos, del tipo “clamp-on” (no invasivos), marca Flexim, modelos Flexus F601 (Figura 1).

El objetivo del presente artículo es dar a conocer las características técnicas de los instrumentos, las aplicaciones y los métodos empleados en el LEMI para las mediciones de caudales de las corrientes características de los procesos agroindustriales de la región.



Figura 1. Caudalímetro ultrasónico portátil no invasivo, con convertidor de medición o unidad indicadora/registradora de flujos.

■ Principio de funcionamiento de los caudalímetros ultrasónicos

Los caudalímetros ultrasónicos utilizan ondas de sonido (ondas de presión) que generan ondas mecánicas y estas se transmiten en el medio debido a la compresibilidad del fluido del proceso. Cuando la viscosidad del fluido es extremadamente alta, se amortigua el movimiento de las ondas mecánicas y, por lo tanto, la propagación de las ondas sonoras. Es por esto que la medición del flujo por ultrasonido se encuentra limitada por la viscosidad de un fluido (Hofmann, 2000).

Por lo general, estos límites están muy por encima de los valores que se encuentran normalmente en la práctica y son importantes solamente en un número muy reducido de casos. Por otro lado, un elevado contenido de gases en el fluido de proceso causa una mayor compresibilidad del producto y provoca la disminución de la velocidad del sonido en el medio. Ambos efectos pueden causar errores en la medición.

Los equipos de última generación para la medición de caudales de manera no invasiva emplean una moderna tecnología denominada “hybrid trek”, que realiza una combinación de dos principios

de medición de caudales por ultrasonido: diferencia del tiempo de tránsito (“transit time”) y efecto Doppler. Este último utiliza la presencia de burbujas de gas y partículas sólidas en el medio para calcular la velocidad de aquellas.

En la medición por tiempo de tránsito, la señal que viaja en sentido de la corriente del fluido (aguas abajo) tendrá un tiempo de tránsito menor que la señal que viaja en contra de la corriente (aguas arriba). La diferencia del tiempo de tránsito Δt permite determinar caudal volumétrico Q por medio de la Ecuación 1 (Flexim, 2008).

$$Q = \frac{k_{Re} \cdot A \cdot k_a \cdot \Delta t}{2 \cdot t_{fi}}$$

Donde:

Q = caudal volumétrico de la corriente en m^3/h o litros/min;

k_{Re} = factor de calibración fluidodinámica;

A = sección transversal de la cañería;

k_a = factor de calibración acústica;

Δt = diferencia de tiempo de tránsito;

t_{fi} = tiempo de tránsito en el medio.

El caudal volumétrico Q se determina directamente con el instrumento, previa parametrización del equipo con las características del fluido (agua, jugo de caña, jugo de limón, melado, vinaza, etc.) y de la cañería (diámetro, perímetro, material, etc.).

En la Figura 2 se pueden observar las trayectorias de las señales en sentido del flujo y en contra de este. Es fácil observar la diferencia de tiempo que existe entre ambas señales desde su emisión y hasta su recepción.

Normalmente las mediciones se realizan en modo “transit time”, por tener una mejor exactitud, pero cuando no es posible utilizar solamente este principio, ya que el fluido de la corriente puede contener niveles elevados de gases o sólidos, el convertidor de medición

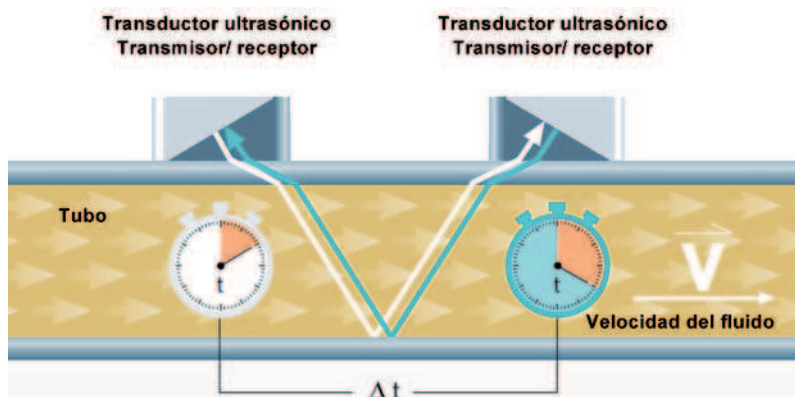


Figura 2. Trayectoria de la señal de ultrasonido por diferencia de tiempo de tránsito, Δt (Flexim, 2008).

conmutará automáticamente entre los modos “transit time” y “noise trek” para obtener un resultado de medición válido.

Este último modo (“noise trek”) realiza una conmutación similar a la anterior, pero entre los efectos Doppler y “transit time”. Periódicamente, el convertidor de

medición prueba el modo “transit time”, aunque existan valores de medición válidos en el modo “noise trek”, para comprobar si una medición en el modo “transit time” es de nuevo posible (Flexim, 2008).

Proceso de medición

El proceso de medición se realiza con una elección correcta de los puntos a medir, teniendo en cuenta el material de la cañería (permeabilidad acústica) y el perfil de flujo. Estos puntos estarán alejados suficientemente de las fuentes de perturbación (codos, curvas, válvulas, etc.), ya que podrían generar errores en la medición.

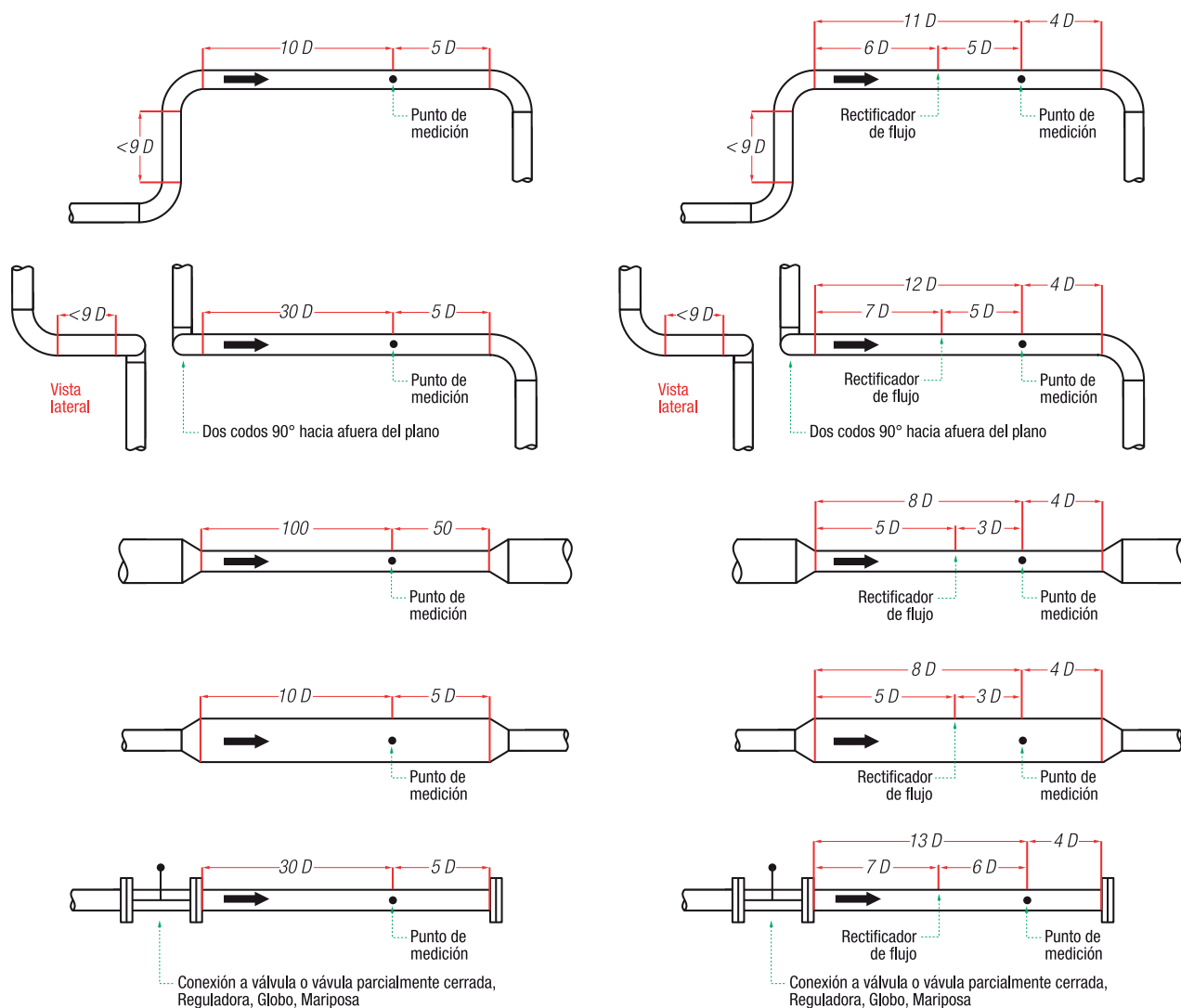


Figura 3. Ubicación del punto de medición según el diámetro de la cañería (elaboración propia).

Al igual que en los casos de mediciones de flujo con placa de orificio, toberas, turbinas o cualquier otro instrumento invasivo, los caudalímetros ultrasónicos requieren de una instalación básica que siga los lineamientos y recomendaciones para la instalación de los sensores primarios de medición (Daniel, 2007). Estas recomendaciones se proporcionan a través de una variedad de normas (API, AGA, ISO, ASME, DIN, etc.), normalmente brindadas por los fabricantes de equipos para asegurar un rendimiento preciso, dentro de algún grado de incertidumbre. Si no se cumple con esta normativa, la precisión del medidor puede verse afectada por distorsiones del perfil

del flujo, causadas por accesorios y la misma tubería aguas arriba de aquel.

Por lo tanto, se debe garantizar en la zona de medición un flujo estable (laminar) sin turbulencia en la corriente, ya que esta generaría posibles interferencias de ruido en la señal de medición. Es necesario además realizar la medición con la cañería completamente llena del fluido; de lo contrario, se generarán vacíos en el flujo donde la señal no se transmitirá correctamente.

En la Figura 3 puede observarse la ubicación de los puntos de medición en función del diámetro de la cañería, aconsejados en normas

internacionales (ISO 5167-1, ISO 4185, ISO 9368, ASME MFC-5M, etc.) y en manuales de fabricantes de equipos.

La Figura 4 muestra la ubicación correcta e incorrecta de los transductores en una línea de proceso, de manera de garantizar que se realice la medición con cañería llena de líquido.

El montaje del caudalímetro incluye la conexión y fijación de los transductores a la cañería en el punto de medición definido según las recomendaciones indicadas en las Figuras 3 y 4. Además, se debe verificar la temperatura ambiente y la temperatura de

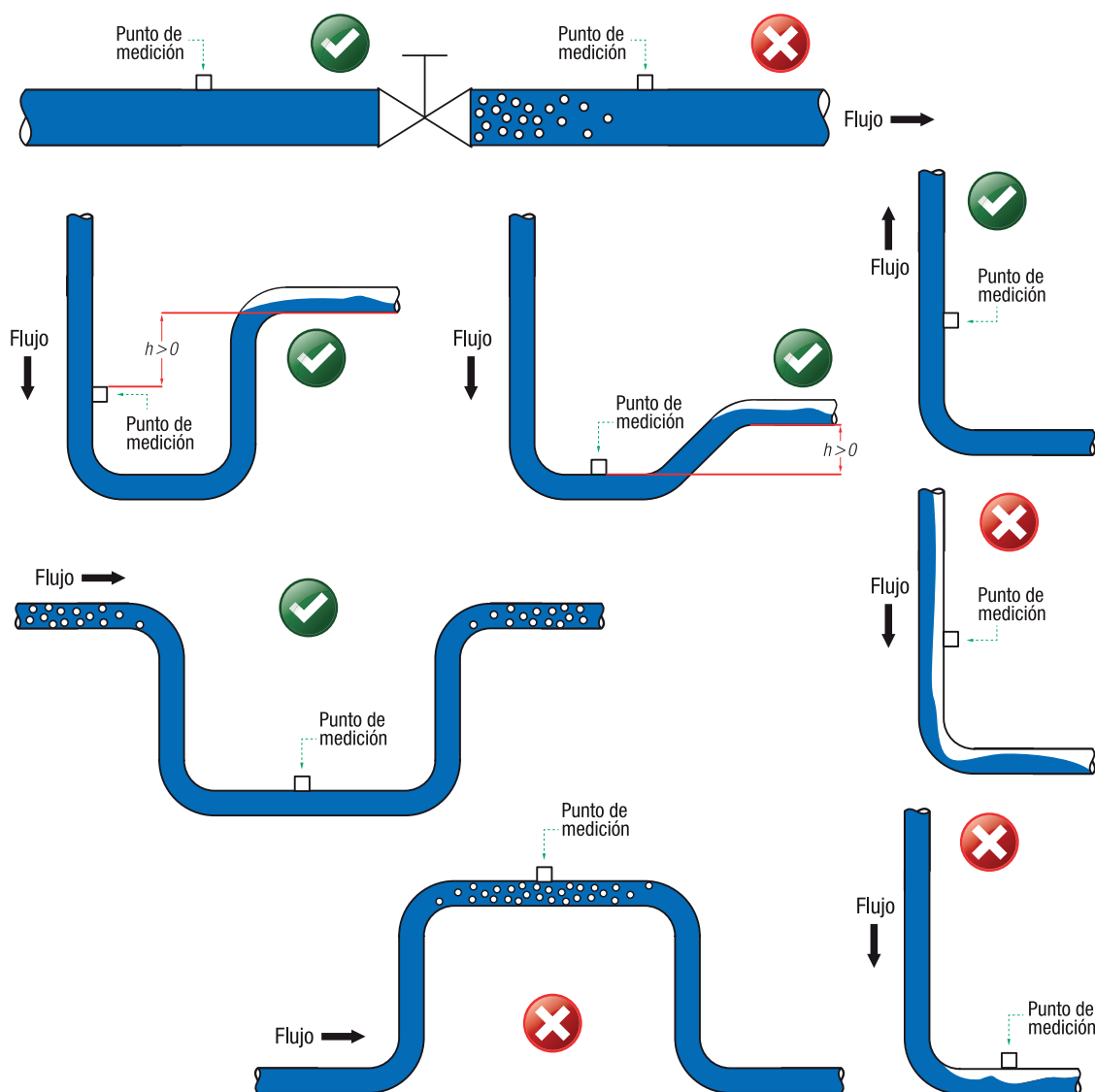


Figura 4. Ubicación correcta e incorrecta del punto de medición para garantizar cañería llena (adaptado de Emco, 2004).

la corriente del proceso. Estas deberán encontrarse en los rangos de temperaturas admisibles para el módulo convertidor de medición y los sensores transductores.

Actualmente el LEMI cuenta con cuatro pares de transductores, disponibles para diámetros de cañería de 6 mm a 2000 mm y para temperaturas del medio entre -40°C y 350°C.

Para lograr una correcta medición, se debe garantizar un buen acople entre los transductores y la cañería de la corriente a medir, lográndose de esta manera que las señales de emisión y recepción no se vean interrumpidas. Para ello, es necesario limpiar perfectamente la tubería, eliminando la pintura y los restos de óxidos que podría contener la superficie. Luego se debe aplicar pasta de acople en las zonas de contacto, entre los transductores y la cañería.

Los parámetros necesarios a tener en cuenta para una medición de caudal son los correspondientes a la cañería y al fluido del proceso.

Parámetros de cañería: tipo de material (define el factor K_a), diámetro, espesor y rugosidad absoluta.

Parámetros del fluido: temperatura del medio y tipo de líquido (define el factor K_{Re}).

Es importante indicar que si el material de la cañería no se encuentra en la lista de selección, se deberá elegir **otro material** y luego ingresar la velocidad de propagación del sonido de este (velocidad longitudinal o transversal). El espesor de la cañería puede ser medido por medio de un sensor especial que dispone el equipo como accesorio; también puede ser elegido en función de los datos comerciales de la cañería instalada. Con respecto a la rugosidad absoluta del material, el instrumento la adopta

directamente luego de ingresar el material de la cañería.

Cuando no se conocen las características del tipo de fluido líquido a medir (agua, leche, alcohol, jugo de caña, jugo de limón, etc.), se deberá determinar la densidad, viscosidad cinemática y velocidad del sonido a la temperatura en que aquel se encuentra. Estas determinaciones se realizan en el LEMI o con la ayuda de ábacos y manuales específicos.

Una vez parametrizado el instrumento, se procederá a seleccionar y activar los canales de medición. Se determina y/o adopta la cantidad de trayectorias del sonido en el flujo. La posición de los transductores sobre la cañería depende del número de trayectorias ultrasónicas a través del medio. En el caso de tener un número par de la trayectoria de la señal, el montaje de los sensores se realiza del mismo lado de la tubería. En el caso de tener un número impar de trayectorias, los transductores deben montarse en lados opuestos de la tubería. La Figura 5 muestra la disposición de los transductores en la cañería en función del número de trayectorias de la señal del sonido adoptada.

Una vez definido el número

de trayectorias de las señales ultrasónicas, el instrumento entrega el valor de A para que realice el montaje de los transductores en la cañería. Normalmente el valor de A debe ser ajustado a un valor entero.

■ Mediciones de caudales en procesos

La aplicación de la tecnología de medición de caudales por ultrasonido en la industria de proceso es variada y representa algunas ventajas frente a los medidores de flujos tradicionales, tales como la estabilidad y confiabilidad a largo plazo; además, no presenta obstrucciones de línea ni caídas de presión y no posee partes móviles, por lo que se requiere un mantenimiento mínimo. Además, la medición se puede realizar de manera bi-direccional con transductores extraíbles.

Por otro lado, el grado de precisión que se alcanza con estos instrumentos se encuentra alrededor del 0,5% para calibraciones realizadas en bancos de prueba, alcanzando errores del 1% al 5% en condiciones de fábrica.

Algunas de las principales mediciones en la agroindustria local realizadas por técnicos del LEMI son:

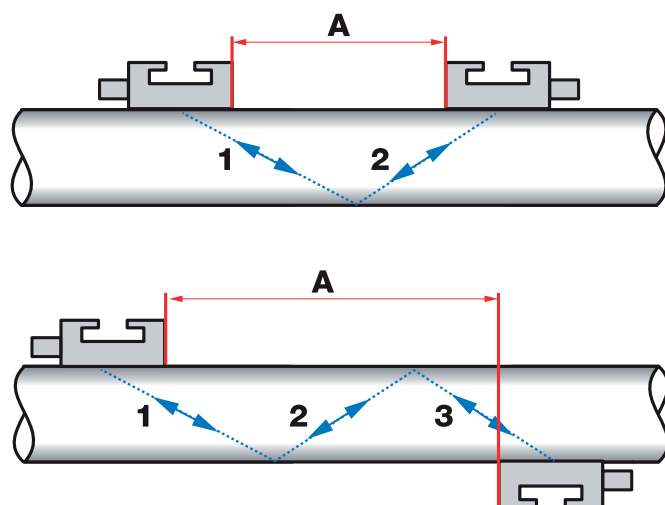


Figura 5. Número de trayectorias de la señal del sonido y disposición de los transductores en la cañería (Flexim, 2008).

- Influentes y efluentes de aguas industriales para proceso.
- Redes de agua potable, optimización de consumos generales de agua y control de las pérdidas.
- Capacidad de bombas hidráulicas (trazado de curvas características).
- Medición de fluidos de procesos (jugos de caña de azúcar, jugo de limón, aceites, alcohol, soluciones salinas, vinaza, combustibles líquidos en general, etc.).
- Consumo de agua en destilerías y plantas deshidratadoras.

- Verificación de caudalímetros en línea, monitoreo de válvulas de regulación, calibración de tanques, etc.

Ensayo de una planta de agua para dilución de mosto

Se contrastó un caudalímetro electromagnético marca Siemens, modelo MAGFLO, instalado en la línea de agua para dilución de mosto en un ingenio azucarero de Tucumán.

El procedimiento consistió en instalar el instrumento de la EEAOC en la misma cañería donde se encuentra instalado el caudalímetro de

fábrica. En la Figura 6 se observa el esquema de instalación.

Una vez instalado el equipo de medición de la EEAOC, se realizaron lecturas de valores instantáneos de ambos caudalímetros. En la Tabla 1 se pueden observar los registros de los caudales contrastados.

Se determinó por cálculo el error porcentual a partir de los promedios, obteniendo un 5% de error absoluto entre el caudalímetro contrastado y el del LEMI-EEAOC.

En la Figura 7 se puede observar un gráfico de la tendencia de los valores medidos en ambos instrumentos

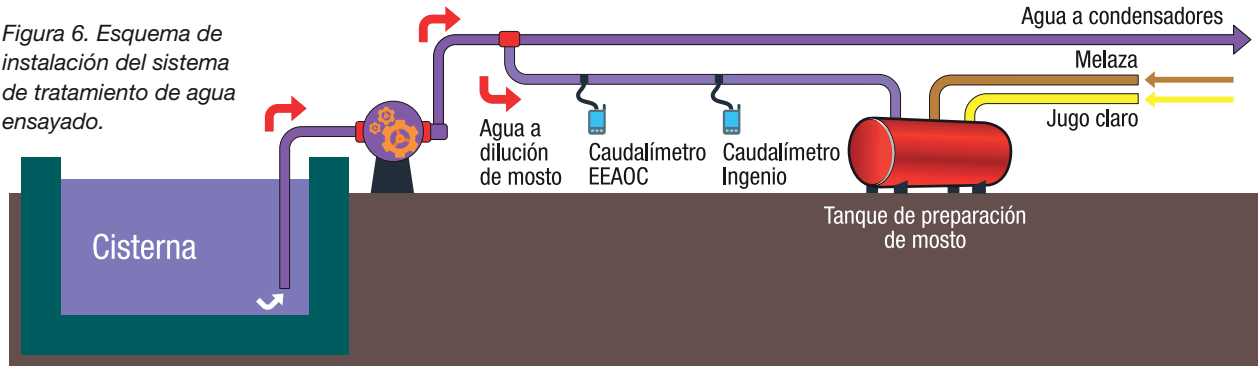


Tabla 1. Valores registrados en los caudalímetros de la EEAOC vs. los del ingenio considerado en la experiencia.

Medición	Hora	Caudalímetro EEAOC [m³/h]	Caudalímetro ingenio [m³/h]	Medición	Hora	Caudalímetro EEAOC [m³/h]	Caudalímetro ingenio [m³/h]
1	15:55:31	135,3	128,5	21	16:00:31	135,4	128,5
2	15:55:46	135,4	128,0	22	16:00:46	134,5	129,2
3	15:56:01	135,3	127,9	23	16:01:01	135,2	128,6
4	15:56:16	134,9	127,3	24	16:01:16	135,4	128,2
5	15:56:31	135,2	128,3	25	16:01:31	134,5	127,9
6	15:56:46	134,8	127,9	26	16:01:46	134,9	128,1
7	15:57:01	134,7	128,5	27	16:02:01	135,0	127,7
8	15:57:16	135,2	128,4	28	16:02:16	135,1	128,2
9	15:57:31	134,5	128,8	29	16:02:31	135,6	128,0
10	15:57:46	135,0	129,0	30	16:02:46	135,2	128,4
11	15:58:01	134,7	128,5	31	16:03:01	135,3	127,7
12	15:58:16	135,1	128,4	32	16:03:16	135,1	128,0
13	15:58:31	135,2	128,6	33	16:03:31	135,2	128,4
14	15:58:46	134,8	128,4	34	16:03:46	135,0	128,0
15	15:59:01	135,4	128,2	35	16:04:01	135,5	127,8
16	15:59:16	134,9	128,6	36	16:04:16	135,1	128,2
17	15:59:31	134,4	128,3	37	16:04:31	135,2	127,9
18	15:59:46	135,2	128,2	38	16:04:46	135,4	128,1
19	16:00:01	135,5	128,9	39	16:05:01	135,2	128,3
20	16:00:16	135,7	127,9	40	16:05:16	135,2	128,2

Agua a dilución de melaza

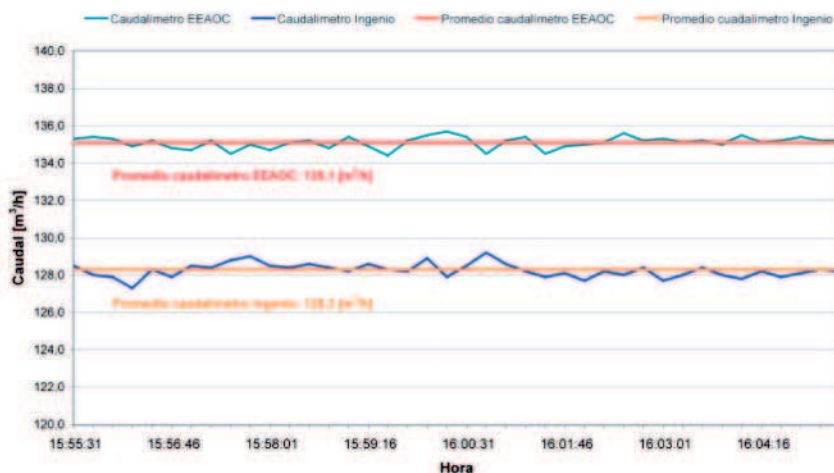


Figura 7. Comparación de las tendencias de los valores de flujos medidos por los caudalímetros considerados en esta experiencia.

y los correspondientes valores promedio.

Consideraciones finales

La nueva tecnología de medición de caudales por ultrasonido “hybrid trek” presenta una amplia ventaja para regular y ensayar procesos de manera rápida y confiable, ya que los equipos utilizados no poseen partes móviles y no son susceptibles a taponamientos, como lo son los medidores de sonda de presión diferencial. Además, por su principio de funcionamiento no son afectados por corrientes vagabundas, a diferencia de los medidores electromagnéticos. Por otro lado, se pueden usar en un amplio rango de diámetros (2” a 200”) y su precisión podría llegar hasta el 1,6% del rango del flujo medido con los caudalímetros del LEMI-EEAOC, lo cual los hace significativamente mejores que otros medidores.

Los resultados obtenidos del contraste del caudalímetro de fábrica (caudal promedio: 128,3 m³/h) frente al equipo perteneciente al LEMI-EEAOC (caudal promedio: 135,1 m³/h) mostraron que el equipo instalado en fábrica tenía un error absoluto del 5% con respecto al del equipo de la EEAOC. Este resultado indica un buen funcionamiento

del equipo de fábrica. La elección correcta del punto de medición y la ubicación de los transductores resultaron fundamentales para lograr resultados confiables.

Bibliografía citada

Chávez Rodríguez, M. F.; K. J.

Mosqueira Salazar; A. V. Ensinas y

S. A. Nebra. 2013. Water reuse and recycling according to stream qualities in sugar-ethanol plants. *Energy for Sustainable Development* 17 (5): 546-554.

Daniel, 2007. Fundamentals of ultrasonic flow meters. [En línea]. Disponible en <http://asgmt.com/wp-content/uploads/pdf-docs/2007/1/003.pdf> (consultado 9 agosto 2011). Daniel Measurement and Control, Inc., Houston, Texas, USA.

Emco, 2004. Sono-Trak Doppler. Ultrasonic flow meter. User Manual

Nº5707070-A, April 2004. [En línea]. Disponible en <http://gpmweb.net/pdf/emco/SonoTrak%20Doppler%20Manual%205707070A.pdf> (consultado 4 agosto 2014). EMCO Flow Systems, Longmont, Colorado, USA.

Federacion de Indústrias del Estado de São Paulo (Fiesp). 2009. Manual de conservação e reuso de água na agroindústria sucroenergética. Agencia Nacional de Águas, Federação das Indústrias do Estado de São Paulo, União da Indústria da Cana de Açúcar, Centro de Tecnologia Canaveira, São Paulo, Brasil.

Federacion e Centro das Indústrias do Estado de São Paulo (Fiesp/ Ciesp). 2010. Conservação e reuso de água para a indústria. Manual de orientações para o setor industrial. Agencia Nacional de Águas, Ministério do Meio Ambiente, São Paulo, Brasil.

Flexim, 2008. Ultrasonic flow meter for liquids UMF601V1-1EN. User Manual Fluxus F601. [En línea]. Disponible en <http://www.flexim.com/es/fluxus-f601> (consultado 25 marzo 2013). Flexim GmbH, Berlin, Germany.

Hofmann, F. 2000. Fundamentals of ultrasonic flow measurement for industrial applications. [En línea]. Disponible en http://www.investigacion.frc.utn.edu.ar/sensores/Caudal/HB_ULTRASONIC_e_144.pdf (consultado 4 julio 2013). KROHNE Messtechnik GmbH & Co. KG, Duisburg, Germany.

Ingaramo, A.; H. Heluane; M. Colombo; T. Argüello y M. Cesca. 2004. Uso eficiente del agua en ingenios azucareros. *Revista CET* 13 (25): 4-11.

