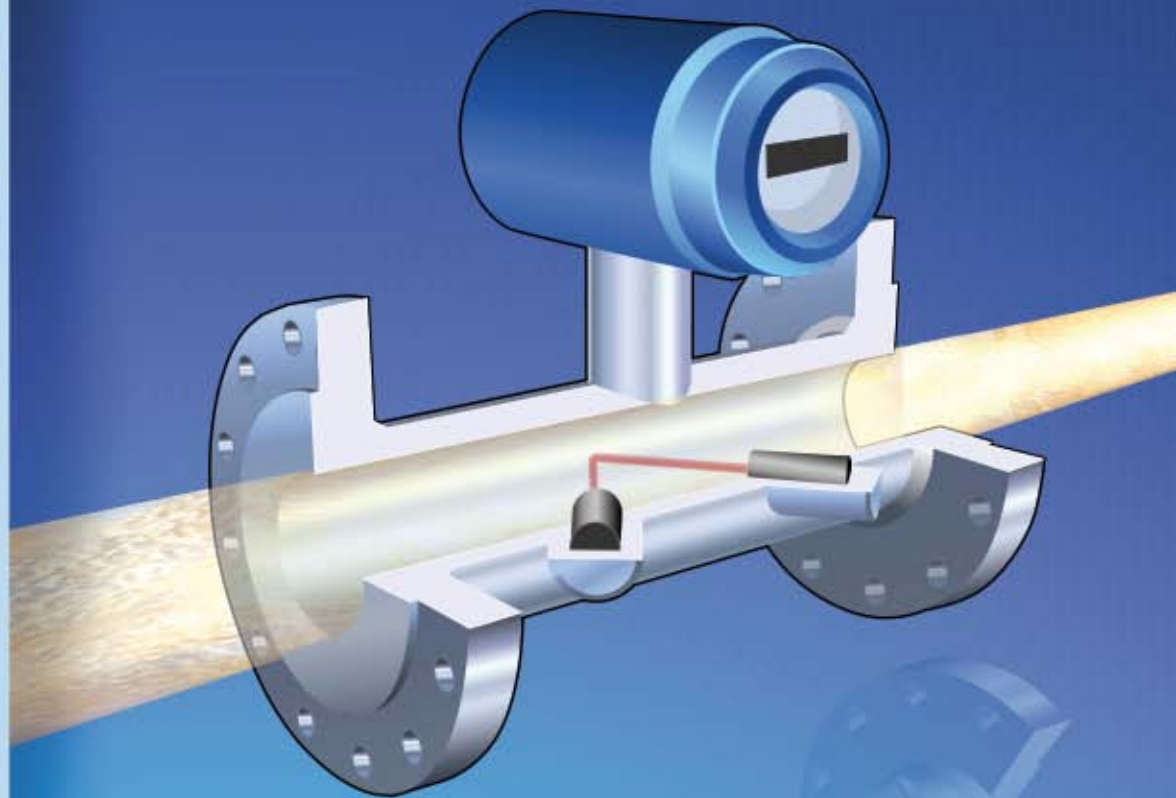


Avances Tecnológicos en Medición Ultrasonónica de Gas para Operar a Bajas Presiones

Erik S. Tapias Chávez (etapias@cdtdegas.com)

César Almeida (calmeida@cdtdegas.com)

Corporación Centro de Desarrollo Tecnológico del Gas



El acceso libre a la autopista de la Internet, ha permitido que países en vías de desarrollo como Colombia, puedan conocer el “norte” de la ciencia y la tecnología en temas relacionados con la aplicación de la metrología para beneficio de la sociedad.

En el CDT de GAS seguimos atentos a los movimientos internacionales, mediante la vigilancia tecnológica y la inteligencia competitiva; continuamos en esta sección compartiendo dicha información para que los lectores conozcan hacia donde se dirige la investigación, y como valor agregado en cada entrega, haremos un análisis particular del porqué y para qué estos esfuerzos están siendo realizados.

ABSTRACT

La Ciencia y la tecnología siguen mejorando el desempeño y la versatilidad de los medidores ultrasónicos -USM, especialmente en el campo de la medición de gas, a bajas presiones (incluso a presiones atmosféricas), aspecto que con los primeros USM desarrollados (medidores de primera generación) no era posible realizar, porque estos requieren de una presión de operación mínima para su adecuado funcionamiento. El CDT de GAS aprovechando la experiencia acumulada, desea compartir a través de este documento, un análisis de algunas de las más importantes mejoras implementadas en los USM de “nueva generación”¹, así como el panorama actual sobre las facilidades tecnológicas disponibles en América para el aseguramiento metrológico de dichos medidores ultrasónicos y algunos de los resultados obtenidos entre medidores de semejantes características, cuando son calibrados a alta y baja presión, de manera que los resultados y conclusiones sean aprovechadas por nuestra industria nacional para la optimización de sus procesos.

¹Se hará referencia en este documento a los USM con capacidad de medición de gas a bajas presiones como medidores de “nueva generación”.

INTRODUCCIÓN

Los medidores ultrasónicos también conocidos como USM por sus siglas en inglés (Ultrasonic Meter) han generado un gran impacto en el sector del gas natural, específicamente en aplicaciones de transferencia de custodia, en donde han adquirido una gran importancia gracias a su desempeño metrológico, a la relación máximo/mínimo (turndown) y a su capacidad de auto-diagnóstico [1][2][3]. Sin embargo, uno de los inconvenientes de la primera generación de medidores fue la necesidad de ser sometidos a una presión mínima de línea (>6,89 Bar / (>100 psi) para lograr su adecuado funcionamiento, lo que restringió su campo de acción, limitó su utilización industrial y fijó un panorama muy alto –en materia de inversión– para el acondicionamiento de laboratorios de calibración que facilitarían su obligatorio aseguramiento metrológico [4]. Gracias al avance de la ciencia y la tecnología, la nueva generación de medidores ultrasónicos toma importancia en el mercado, en razón a su capacidad de medir gases (gas natural, aire, nitrógeno, entre otros) a condiciones de baja presión, realizar correcciones en el cálculo del caudal al detectar asimetrías en el perfil de velocidad y la posibilidad de ser calibrados en bancos de calibración que operan a presión atmosférica, entre otras, ampliando de esta forma su campo de acción y brindando al sector industrial, una nueva alternativa para dar solución a sus problemas de medición. [1][2][4]

Para sensibilizar a los lectores que se interesan por este tema tan apasionante, es preciso presentar de una manera global, el principio de operación y en general los componentes que los conforman. Las ondas acústicas se propagan con una velocidad específica a través de un medio. Si una onda acústica se origina en un medio en movimiento, su velocidad de propagación es el vector suma de la velocidad de la onda original y la velocidad promedio del medio. Este efecto se usa para medir la velocidad del fluido en un medidor ultrasónico. Su principio de medición se basa en calcular la velocidad del fluido, a partir del tiempo que demora un pulso acústico en viajar desde el transductor A hasta el transductor B, con respecto al tiempo que demora en viajar desde el transductor B hasta el transductor A. En la Figura 1 se muestra la ubicación de los transductores-receptores posicionados diametralmente opuestos sobre una trayectoria que posee un ángulo ϕ con respecto al eje de la tubería, separados por una distancia L [1][2].

Cuando el flujo a través del medidor es cero, el tiempo de tránsito de la onda desde A hasta B (t_{AB}) es igual al tiempo de tránsito desde B hasta A (t_{BA}). Ahora bien, asumiendo que el fluido se desplaza de izquierda a derecha con una velocidad V_m , el tiempo de tránsito del pulso acústico desde A hasta B disminuirá, mientras que de B hasta A aumentará; en otras palabras, la velocidad del pulso desde A hasta B, es mayor debido a que se acelera por viajar en el mismo sentido del flujo, en tanto que la velocidad del pulso desde B hasta A es menor debido a que sufre una desaceleración por

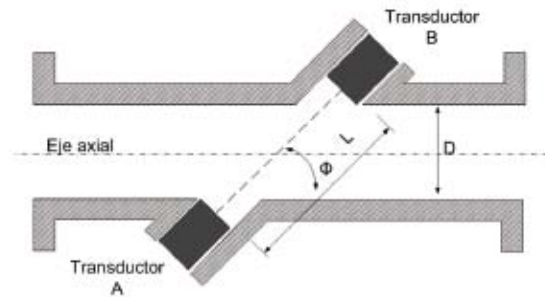


Figura 1. Principio de operación de un medidor ultrasónico tipo tiempo de tránsito (Fuente: Los autores)

efecto de ir en sentido contrario al movimiento del fluido. El caudal a través del medidor se calcula a partir de:

$$Q = A \cdot V_m = \left[\frac{\pi \cdot D^2}{4} \right] \cdot \left[\left(\frac{L}{2 \cos \phi} \right) \cdot \left(\frac{1}{t_{AB}} - \frac{1}{t_{BA}} \right) \right]$$

En los medidores de multi-trayectorias, la velocidad del fluido se mide en diversos planos y se obtiene un promedio. Con respecto a los componentes de un USM del tipo tiempo de tránsito (los mayormente utilizados para gas natural) se destacan tres partes principales:

El cuerpo, es decir la parte estructural del medidor fabricado de un material compatible con el fluido a cuantificar, provisto por lo menos con una toma para la medición de la presión estática y puertos para la instalación de los transductores y la electrónica asociada. Se caracteriza por conservar a lo largo del medidor, una circularidad tal que, se garantice que un valor de diámetro interno medido no varíe más de 0,5% del diámetro interno promedio en la sección medida (requisito establecido por el Reporte AGA 9 2007 [5]).

Los transductores son el corazón de los medidores ultrasónicos y su propósito es convertir las señales eléctricas en señales acústicas y viceversa. Están compuestos principalmente por conectores eléctricos, carcasa y elemento piezoeléctrico. Los pulsos se producen cuando el elemento piezoeléctrico es excitado a partir de una señal de voltaje variable en el tiempo, generando la emisión de un pulso acústico bien definido. De igual forma, el piezoeléctrico proporciona una señal de voltaje variable cuando las ondas acústicas ejercen presión sobre su superficie.

La Unidad de Procesamiento de Señal o SPU (Signal Processing Unit), es considerada como el cerebro del medidor, en ella se encuentra alojada toda la electrónica encargada del control de los transductores almacenamiento de datos, procesamiento de señales, algoritmos de cálculo, programas de autoevaluación y diagnóstico, puertos de comunicación, alimentación eléctrica, programas de comunicación y en fin, todo lo concerniente al control, comunicación y proceso de medición. De igual manera, en su interior se encuentran almacenados en memorias no volátiles los parámetros de configuración, contadores de volumen, huellas del medidor, alarmas y factores de corrección, entre otros.

1. AVANCES EN LA TECNOLOGÍA DE MEDIDORES ULTRASÓNICOS DE GASES TIEMPO DE TRÁNSITO

Problemas reportados por los usuarios y muy especialmente los avances basados en la ciencia y la tecnología, se han constituido en el principal motor del mejoramiento de esta tecnología. Una visión rápida de las limitantes detectadas en la primera generación se muestra a continuación:

1.1 LIMITANTES DE LA PRIMERA GENERACIÓN DE USM

- **Trasmisión de la energía acústica:** Uno de los problemas de esta tecnología radica en la dificultad de transmitir energía acústica en el gas, debido a la notable diferencia de impedancia acústica entre la materia sólida (transductor) y el medio de trasmisión (gas). Este factor ocasiona que de la cantidad de energía acústica potencial que podría emitir el transductor, sólo una pequeña porción sea transmitida a través del medio gaseoso [3]. Esta diferencia de impedancia decrece al incrementar la presión del gas (debido al aumento en su densidad) y como consecuencia una mayor cantidad de energía acústica es transmitida [3]. Lo anterior permite deducir, que la medición a presión atmosférica corresponde al peor escenario y por ello en sus inicios, la medición ultrasónica de gases, se realizaba solo a alta presión.
- **Ruido ultrasónico:** El ruido al interior de la tubería, generado por: válvulas reguladoras de presión, accesorios (ej. termopozos) e incluso el mismo flujo, puede interferir e imposibilitar la detección de pulsos siempre y cuando: **a.** la frecuencia del ruido coincida con la frecuencia de los pulsos generados y **b.** la amplitud del ruido sea considerable con respecto a la amplitud de la señal. Debido a que generalmente, las frecuencias de los ruidos típicos en sistemas de medición no superan los 100 kHz [6], generalmente los transductores de los USM se hacen operar a frecuencias nominales entre los 100 y 300kHz, con el fin de aumentar la resistencia de la señal al ruido. Es prudente advertir que la atenuación en los gases aumenta conforme la frecuencia aumenta, por lo que se debe seleccionar una frecuencia de operación adecuada dentro del intervalo de 100 a 300kHz, es decir, la frecuencia de operación seleccionada debe disminuir la influencia del ruido y además, de forma paralela, garantizar que la atenuación que sufre la señal en el medio de transmisión no sea crítica. Este aspecto constituye un problema, principalmente cuando los medidores cuantifican gas natural a presión atmosférica, o en caso de medición de CO₂, H₂S o Cl₂ [1].
- **Aplicación limitada:** La primera generación de medidores ultrasónicos se caracterizó principalmente por requerir una presión mínima de operación (>6,89 Bar / >100 psi) para su óptimo funcionamiento. Este requisito limitó su campo de

aplicación teniendo en cuenta que en la mayoría de casos, la presión de línea es inferior a la exigida, por ejemplo en la red de distribución de gas natural, o en aplicaciones comerciales para la alimentación de gas combustible en hornos y calderas, en las cuales no es posible utilizar esta tecnología.

- **Altos costos de calibración:** Igualmente el aseguramiento metrológico de estos medidores, se encuentra inclusive hoy limitado, considerando que para su calibración se requiere contar con bancos de calibración que operen a media o alta presión, sin importar el medio de calibración. Estudios realizados [7] concluyeron que se puede encontrar una diferencia de aproximadamente 0,5% en el desempeño metrológico del medidor cuando opera a 400 y 1000 psia y por lo tanto, lo recomendable, para esta tecnología de primera generación, es realizar calibraciones a presiones cercanas a las de operación. Para el caso de diferentes gases (Gas Natural Vs. Nitrógeno) operando a las mismas condiciones, se identificó que las diferencias no eran mayores a 0,2% y que por lo tanto un banco de calibración con aire, a alta presión, es completamente factible, teniendo especial cuidado con la estabilidad en las condiciones de operación.
- **Limitados laboratorios de calibración:** En particular se resalta que la disponibilidad de laboratorios acondicionados en América son insuficientes y que no existen facilidades en cada uno de los países donde estos medidores son acondicionados. Más adelante, en la tabla 1 se aprecian algunas de las facilidades existentes en América, sus alcances e incertidumbres asociadas, lo cual demuestra que la carencia de facilidades para la calibración de medidores de alto caudal a condiciones cercanas a las de operación, dificulta seriamente la implementación de programas de aseguramiento metrológico colocando en duda la calidad de las mediciones a través del tiempo, sumado a los altos costos asociados (costos de calibración, de transporte, aranceles, etc.) durante los procesos de calibración.

Con la finalidad de dar solución a estos y otras limitantes no mencionadas en este documento, se desarrollaron trabajos encaminados a mejorar la adecuación de la medición a presión atmosférica. A continuación se presentan y analizan dichas mejoras.

1.2 LA INNOVACIÓN PRESENTE AL LOGRAR MEJORAS EN LA MEDICIÓN ULTRASÓNICA DE GASES

Con el paso del tiempo los limitantes de la medición ultrasónica de gases se han ido superando gracias a avances planteados en la eficiencia de transmisión de las ondas acústicas, algoritmos de cálculo más complejos, configuración de múltiples trayectorias, mayor capacidad y velocidad en el procesamiento de datos entre otros. La mayoría de estos avances tienen en

común la estrecha relación que guardan con la relación Señal/Ruido (SNR), siendo este parámetro el que permite determinar si el nivel de ruido en un sistema, se encuentra dentro del umbral permitido para el adecuado funcionamiento del medidor; en otras palabras, indica la calidad de la señal. Cuando los valores de SNR están por debajo del límite permitido, quiere decir que el nivel de ruido es muy alto y la onda acústica generada por los transductores es distorsionada, generando problemas en la medición.

- Mejoras en los transductores:** Los transductores de la primera generación de medidores se caracterizaban por tener una capa de acople fabricada de resinas epoxi, recubiertas de una delgada lámina de metal para su protección, lo que reducía la eficiencia de conversión de energía eléctrica a energía acústica, limitando la amplitud de la señal de salida y la sensibilidad de recepción [3]. A diferencia, la “nueva generación” utiliza nuevos transductores fabricados de metal que no poseen capas de acople. En su lugar, el acople de impedancia se realiza con un diseño especial de transformadores acústicos de metal [3], incrementando la amplitud de resonancia, lo que permite mejorar la eficiencia de conversión de energía eléctrica a acústica, proporcionando un ancho de banda suficiente para la emisión de pulsos cortos con una gran amplitud y obteniendo un sellado hermético en materiales como el titanio, acero inoxidable o Hastelloy. En la Figura 2 se muestra un esquema de ambos transductores. Por otra parte un aspecto que mejoró con el nuevo diseño de los transductores fue el direccionando de las ondas de sonido [3], aspecto que se puede apreciar en la Figura 3, en donde se compara el patrón de radiación de sonido de los 2 tipos de transductores; es importante observar que ahora la radiación de sonido está más enfocada, permitiendo que una mayor cantidad de energía llegue al objetivo (transductor receptor).

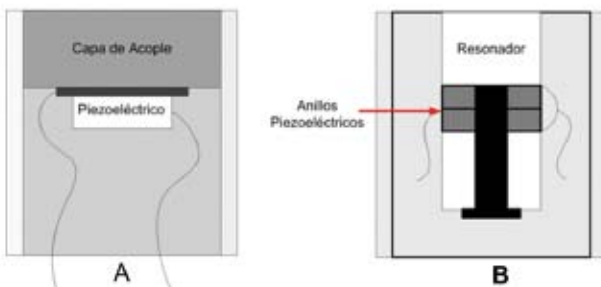


Figura 2. Diagrama esquemático de un transductor: a) Primeros transductores b) Transductores mejorados[2]. (Fuente: (3))

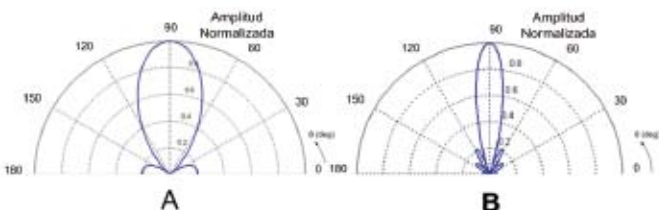


Figura 3. Comparación de la amplitud de la radiación de sonido a) Primeros transductores b) Transductores mejorados. (Fuente: Los autores)

- Mejoras en la electrónica:** Una de las mejoras implementadas en la SPU fue lograr disminuir las exigencias en la calidad de la señal recibida, disminuyendo el mínimo SNR requerido, es decir, es posible extraer de la señal recibida, la señal emitida por el transductor a pesar de los altos niveles de ruido [3]. Esto se logró gracias al aumento en la capacidad de procesamiento, que permitió el uso paralelo de métodos basados en la correlación de señales, detección de cruces por ceros, comparación de la señal recibida con modelos preestablecidos y extracción de la señal envolvente; en estos métodos la señal es evaluada respecto a: posición en una ventana de tiempo, amplitud, SNR y grado de congruencia con la señal modelada [3]. Otro de los avances obtenidos en la nueva generación de medidores fue lograr implementar modelos matemáticos que permiten minimizar los errores en el cálculo del caudal, generados por las asimetrías del perfil de velocidad [2].

2. ANÁLISIS DE LAS VENTAJAS OPERATIVAS PRESENTES EN LA NUEVA GENERACIÓN DE USM

Aunque se ha resaltado como la ventaja más significativa de esta nueva generación de medidores ultrasónicos, la capacidad de medir gas a condiciones de baja presión, incluso, a presión atmosférica, existen otras bondades de carácter operativo y metrológico que es importante describir:

- Condiciones de instalación menos exigente:** La calibración de un medidor en laboratorio se realiza bajo condiciones óptimas de instalación y limpieza, sin embargo, las condiciones de instalación y operación pueden ser muy diferentes. La pregunta surge entonces, ¿Qué pasa con la exactitud del medidor cuando es instalado en campo? Estudios realizados por E-ON Ruhrgas y CEESI [9][10] de acuerdo con los lineamientos dados por la ISO 17089 y OIML R-137, para un modelo en particular de USM de última tecnología, demostraron que el medidor tiene la capacidad de realizar mediciones confiables (dentro de una incertidumbre de $\pm 0,2\%$) con solo 5 diámetros de tubería recta aguas arriba del medidor. Esto fue posible gracias a un diseño innovador que combina la ubicación de 12 trayectorias (10 de ellas en planos paralelos) con sus respectivos factores de “ponderación” y algoritmos de cálculo, de tal forma, que se optimiza la capacidad de detectar una gran variedad de posibles distorsiones del perfil de velocidad permitiendo obtener bajas incertidumbres en la medición. En otras palabras, los avances de este modelo de medidor ultrasónico, permiten tener configuraciones de instalación más cortas sin sacrificar significativamente la incertidumbre en la medición, permitiendo ubicar el medidor en lugares con menor espacio disponible, disminuyendo costos de adecuación de instalación. Es importante recalcar que si se busca la menor incertidumbre en la medición, lo mejor es realizar la calibración del patín de medición, es decir, el conjunto de tubos de medición, medidor, acondicionadores de flujo y termopozo.

- **Herramienta de diagnóstico superior:** La optimización de la tecnología de medición incluyó el mejoramiento de las herramientas de diagnóstico, correcciones en el cálculo de volumen debido a asimetrías en el perfil de velocidad y en algunos casos, detección de contaminación por acumulación o flujo líquidos en el fondo del medidor [4]. Esto permite al operador estar continuamente informado sobre el desempeño del medidor y tener mayor confiabilidad en sus mediciones, y por ende, en su facturación.
- **Calibración en laboratorios que operan con aire a presión atmosférica:** La capacidad de operación de los medidores a baja presión, permite de igual forma que estos puedan ser calibrados en laboratorios con aire a presión atmosférica. Pruebas realizadas en diferentes laboratorios han demostrado inicialmente que la incertidumbre adicional entre calibraciones, a alta presión y presión atmosférica, está alrededor del 0,35% como se muestra en la Figura 5. Esto es una gran ventaja si se considera la disponibilidad de las facilidades para la calibración de medidores a baja presión, permitiendo obtener un mayor número de laboratorios de calibración (ver figura 6). Adicionalmente, los costos asociados a calibraciones a presión atmosférica, son menores comparados contra los de calibraciones a alta presión. Sin embargo, es importante aclarar que estos estudios fueron realizados en medidores de 100 mm ($\approx 4''$) de una marca en particular y que por lo tanto, no corresponden a una regla absoluta para todas las marcas, tamaños y modelos. Se necesitan más pruebas, comparaciones, experimentos y evaluaciones que permitan establecer un criterio más general y con un mayor nivel de confianza.

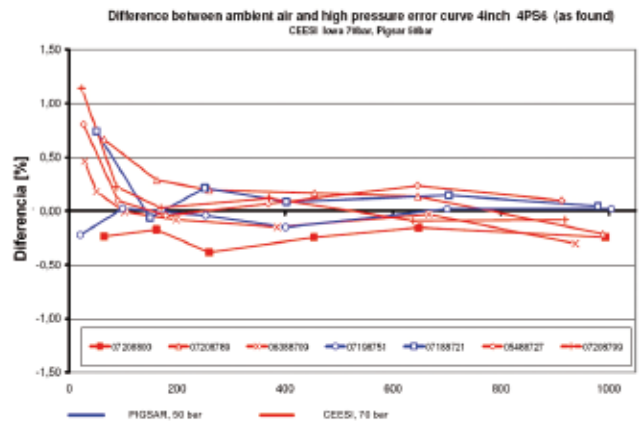


Figura 5. Diferencia entre las curvas de error a presión atmosférica y alta presión de medidores de 4 pulgadas 4PS6 (as found)[2]{Fuente: (3)}

De igual forma es importante recalcar que para la adecuada selección del laboratorio de calibración, además de los costos asociados, se debe considerar la incertidumbre del proceso (la requerida) y compararla contra la incertidumbre ofrecida por los laboratorios disponibles. En concreto, la selección del laboratorio adecuado es un proceso mucho más profundo y complejo que implica el análisis de un mayor número de variables que pueden modificar la decisión, de acuerdo con las necesidades particulares de cada sistema de medición.

3. CONCLUSIONES

La nueva generación de medidores posee ventajas tecnológicas que comienzan a ser importantes para la industria en general, sin embargo será necesario garantizar un costo racional para el mercado.

En general, la nueva generación de medidores ultrasónicos presenta una serie de ventajas y beneficios

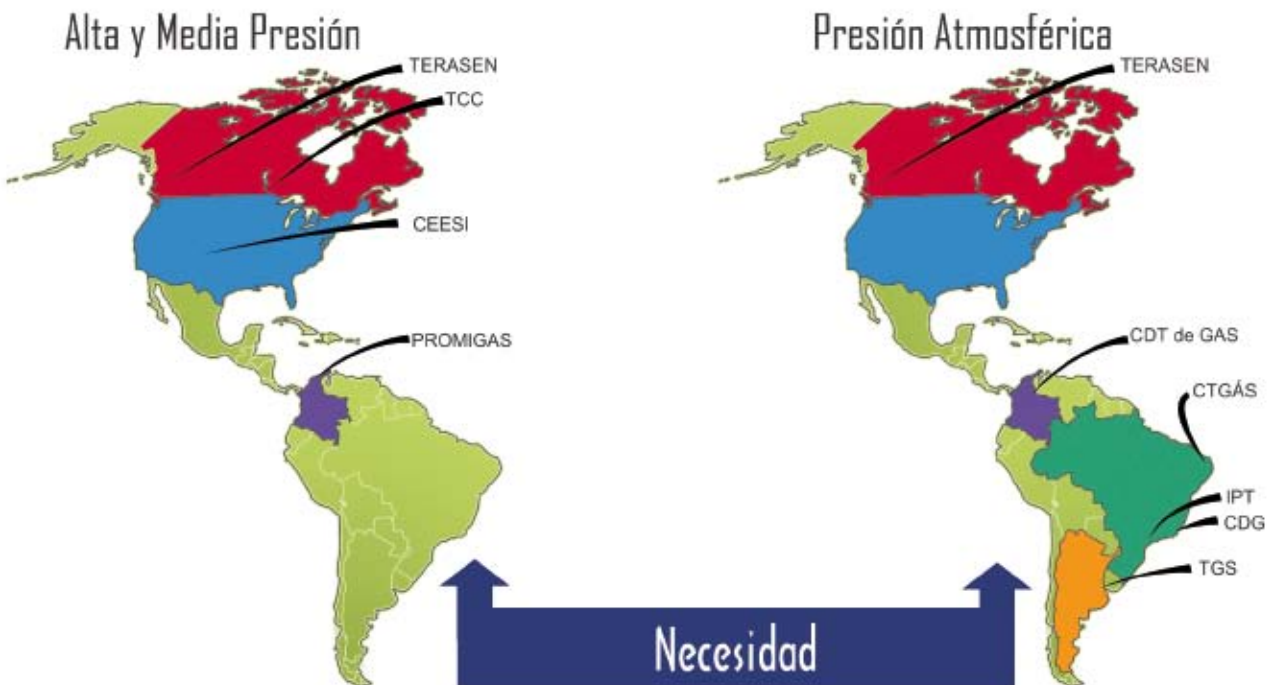


Figura 6. Panorama de laboratorios de flujo de fluidos en América. (Fuente: Los autores)

Laboratorio	Presión	Ubicación	Alcance máximo m ³ /h	U
TrasnCanada Calibration (TCC)	Canadá	Alta	55000	0,35%
Terasen	Canadá	Media y Baja	6500	0,27%
Cessi	USA	Alta	44000	0,23%
Promigas	Colombia	Media	4250	0,29%
Centro de Desarrollo Tecnológico del Gas(CDT de GAS)	Colombia	Atmosférica	4800	0,16%
Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT)	Brasil	Atmosférica	3200	0,17%
Centro de Tecnologias do Gás e Energías Renovaveis(CTGÁS)	Brasil	Atmosférica	4000	0,31%
Companhia Distribuidora de Gás (CDG)	Brasil	Atmosférica	2500	0,60%
Transportadora de Gas del Sur (TGS)	Argentina	Atmosférica	6500	0,28%

Tabla 1. Laboratorios de calibración de medidores de flujo de gas en América[11][12][13]. (Fuente: Los autores)

con respecto a sus antecesores, en la que se destacan:

- La capacidad de medir gas a condiciones de baja presión e incluso a presión atmosférica, lo que amplía su campo de acción.
- Mejoradas herramientas de auto diagnóstico que permiten detectar incluso, el paso de trazas de líquido a través del medidor.
- Corrección del volumen cuantificado por efecto de asimetrías en el perfil de velocidades por efectos de singularidades aguas arriba del medidor.
- Implementación de configuraciones de instalación con menor exigencia de tubería recta aguas arriba del medidor sin que implique altas incertidumbres en la medición por efectos de condiciones de instalación.
- Capacidad de ser calibrados en laboratorios que operan a presión atmosférica, por lo tanto igual confiabilidad a menor costo.

Finalmente, se conoce incipientemente que la tecnología ultrasónica será utilizada en el mediano plazo para medir directamente la energía contenida en el gas, en lugar del volumen. A medida en que sucedan los avances, MET & FLU los editará para sus lectores en futuras entregas.

4. REFERENCIAS

- [1] V. Herrmann, A. Ehrlich, T. Dietz, "Multipath Ultrasonic Gas flow meter –How can desing improvements reduce total measure uncertanties", 22th International North Sea Flow Measurement Workshop, 2004.
- [2] P. Lunde, K. Froyso, M. Vestheim, "GERG Project on Ultrasonic Gas Flow Meters, Phase II", 2000.
- [3] V. Herrmann, T. Dietz, "Low Pressure Gas Measurement Using Ultrasonic Technology", SICK MAIHAK.
- [4] J]Drenthen Jan, Kurth Martin, Klooster Jeroen, Vermeulen Marcel, "Reducing Installation Effects on Ultrasonic Flow Meter", 27th North Sea Flow Measurement Conference, 2009.
- [5] AGA Report No. 9, Abril 2007. "Measurement of Natural Gas by Multipath Ultrasonic Meters".
- [6] K Warner, K Zanker, " NOISE REDUCTION IN ULTRASONIC GAS FLOW MEASUREMENT", 1999.
- [7] Freund William, Zanker Klaus, Goodson Dale, Hall James, Jamieson Andrew, "Operation of Ultrasonic Flow Meters at Conditions Different Than Their Calibration", Noth Sea Flow Measurement Workshop 22th – 25th October 2002.
- [8] James W. Bowen, "Multipath Ultrasonic Meters for Natural Gas Custody Transfer", Pipeline & Gas Journal, April 2010 Vol. 237 No. 4.
- [9] Drenthen Jan, Kurth Martin, Vermeulen Marcel, "Verification of Ultrasonic Gas of Meter", Ceesi, June 2009.
- [10] Drenthen Jan, Kurth Martin, Vermeulen Marcel, "A Novel Desing of 12-Chord Ultrasonic Gas Flow Meter", CSHM, April 2009.
- [11] www.onac.org.co
- [12] www.inmetro.gov.br
- [13] www.inti.gov.bar