

COMPARACIÓN DE PROCEDIMIENTOS VIABLES PARA LA VERIFICACIÓN PERIÓDICA DE MEDIDORES RESIDENCIALES DE GAS NATURAL EN COLOMBIA

Germán José Covelli^{1*}, Oscar Yazit Salah García²,
Carlos Eduardo García Sánchez²

¹Gases de Occidente S.A. ESP., Cali, Colombia.

²Corporación Centro de Desarrollo Tecnológico del Gas, Piedecuesta, Colombia.

*Correos de contacto: germanjc@gdo.com.co
osalah@cddtdegas.com cgarcia@cddtdegas.com

Resumen: En las transacciones comerciales, es necesario tener mediciones confiables. La prestación de servicios públicos no es una excepción; por esto, en la regulación colombiana se establece el requisito de verificar periódicamente el desempeño de los medidores residenciales de gas natural [1]. En el presente trabajo, se comparan cinco posibles procedimientos de verificación. La comparación se realiza considerando calidad metrológica, duración de la verificación, costos de los equipos, riesgos de seguridad industrial y riesgos ambientales. Se concluye que un procedimiento *in situ* con un patrón MEMS automatizado resulta el más indicado para la verificación de medidores residenciales.

Palabras claves: verificación, medidores de gas, características metrológicas, regulación.

Abstract: In commercial transactions, it is necessary to have reliable measurements. The provision of public services is not an exception; for this reason, the Colombian regulation establishes the requirement to periodically verify the performance of residential natural gas meters. In the present work, five possible verification procedures are compared. The comparison is made considering metrological quality, duration of verification, equipment costs, industrial safety risks and environmental risks. It is concluded that an *in situ* procedure with a MEMS standard and automation is the most indicated for the verification of residential meters.

Keywords: verification, gas meters, metrologic characteristics, regulation.

1. INTRODUCCIÓN

Con el propósito de mantener la transparencia en la facturación de los consumos de gas natural a nivel residencial, la Comisión de Regulación de Energía y Gas de Colombia (CREG) ha reglamentado que las empresas distribuidoras o comercializadoras de gas natural deben suministrar medidores con la exactitud

adecuada (descrita por el cumplimiento de unos errores máximos permisibles mostrados en la Tabla 1), y una vez en servicio, dicha exactitud deberá ser verificada periódicamente acorde con los intervalos que especifique el fabricante [1-3]. Para tal propósito, la regulación expedida por la CREG establece que las calibraciones las harán las empresas comercializadoras en sus laboratorios, o en laboratorios de terceros, “debidamente certificados por el Organismo Nacional de Acreditación de Colombia (ONAC)” [sic] [1].

Tasa de flujo	Verificación inicial	En servicio
	Medidores tipo diafragma	
$Q_{\min} \leq Q \leq 0,1 * Q_{\max}$	$\pm 3\%$	+6%, -3%
$0,1 Q_{\max} \leq Q \leq Q_{\max}$	$\pm 1,5\%$	$\pm 3\%$

Tabla 1. Errores máximos permisibles (EMP) para medidores de gas residenciales en Colombia [1].

Para la evaluación de la exactitud, idealmente la incertidumbre expandida del porcentaje de error debe ser inferior a la tercera parte del EMP correspondiente al medidor que se desea evaluar [4, 5].

En años anteriores, varias entidades relacionadas con el gas natural han realizado inversiones para implementar laboratorios de calibración, con infraestructura metrológica compuesta por bancos de calibración con patrones de tecnologías como campana gasométrica, boquillas sónicas y cámaras húmedas, dotados con instrumentación complementaria de alta exactitud en las magnitudes presión y temperatura, y recintos con condiciones ambientales controladas. Adicionalmente, los laboratorios han implementado sistemas de gestión alineados con la norma ISO/IEC 17025:2017; con esas condiciones, los laboratorios logran garantizar niveles de incertidumbre que satisfacen holgadamente los requisitos para verificaciones iniciales, y por ende los de las verificaciones en servicio. Todo esto con el propósito de cumplir de manera estricta con los requisitos CREG anteriormente mencionados.

Sin embargo, la estrategia de calibración en laboratorio para medidores en servicio no ha sido totalmente efectiva, porque no ha logrado brindar un nivel de cobertura suficiente. Esto es debido a que las actividades de verificación en laboratorio requieren de una exigente logística asociada con la desconexión, reconexión y transporte del medidor hacia el

laboratorio; a la necesidad de instalar un medidor provisional para llevar el registro de volumen mientras dura dicho proceso; a la insatisfacción y desconfianza que se generan en el usuario al estar desprovisto del medidor de su propiedad; y finalmente por todos los costos incurridos y los riesgos asociados al proceso.

Estas consideraciones llevan a la posibilidad de aplicar procedimientos de verificación de medidores *in situ*, los cuales pueden llegar a brindar ventajas como tiempos de ejecución de la verificación más cortos, menores costos asociados al proceso, mayor comodidad y confiabilidad para el usuario, entre otras. Sin embargo, también podrían presentarse desventajas asociadas principalmente con el requerimiento regulatorio del proceso y los aspectos metrológicos asociados con los equipos que tradicionalmente son utilizados para las verificaciones *in situ*.

El objetivo del presente trabajo es realizar un análisis comparativo de cuatro (4) procedimientos usados para la verificación posterior de medidores residenciales de gas natural, contemplados por la NTC 5730 [6]. El primero se basa en la instalación de un medidor testigo en serie que tenga características acordes al medidor que se está verificando; el segundo emplea una boquilla calibrada para verificar la cantidad de gas que fluye por unidad de tiempo contra la lectura del medidor objeto de verificación; el tercero radica en realizar un cálculo de forma teórica basado en la potencia de los gasodómicos conectados y el poder calorífico del gas contrastado contra el volumen registrado por el medidor; y el cuarto consiste en el uso de un banco de calibración en laboratorio, acorde con el procedimiento aceptado actualmente por la regulación colombiana. Adicionalmente, se presenta como propuesta un quinto procedimiento, que busca conservar las ventajas logísticas de los procedimientos *in situ* pero alcanzando la robustez metrológica del procedimiento en laboratorio, logrando así una mejor relación en el cumplimiento de los requerimientos del proceso.

Para el análisis, se tendrán en cuenta aspectos metrológicos, técnicos, económicos y prácticos. Es importante aclarar que los procedimientos 1, 2 y 3 han sido aplicados por las empresas distribuidoras de gas natural, inicialmente como parte de las revisiones periódicas quinquenales definidas por la CREG 067:1995 [1] pero que con la publicación de la CREG 059:2012 [2], que definió que las revisiones periódicas no incluyen la comprobación del equipo de medición, y la emisión de la CREG 127:2013[3], que estableció que la verificación debe hacerse en laboratorio, la aplicación de esos tres procedimientos *in situ* perdieron aplicación.

2. ESTRATEGIAS DE VERIFICACIÓN DE MEDIDORES DE GAS DE USO RESIDENCIAL

En esta sección, se describen los cinco procedimientos de verificación, que serán los objetos de comparación en el trabajo. Inicialmente se describen los requerimientos mínimos que deben satisfacer todos los procedimientos, y acto seguido se detallan los elementos y el proceso para cada uno de los cinco procedimientos.

2.1. Requerimientos de los procedimientos de verificación

El distribuidor o comercializador debe proporcionar equipos de medición que brinden registros precisos a los usuarios con la finalidad de que el volumen facturado concuerde con el volumen realmente consumido, es por ello que la CREG da la potestad a las compañías distribuidoras para verificar la exactitud de los equipos de medición a intervalos razonables. De igual manera, la CREG especifica que para los usuarios regulados los medidores deben cumplir con las normas técnicas colombianas - NTC. Es así, que la finalidad del proceso de verificación posterior de medidores residenciales es comprobar de forma periódica que los medidores cumplen con los Errores Máximos Permisibles - EMP referenciados en dichas NTC.

Es evidente que existen algunos requerimientos que deben ser cumplidos por el proceso de verificación, independientemente de si se ejecuta en laboratorio o *in situ*. Estos requerimientos incluyen aspectos operativos y metrológicos, los cuales son presentados a continuación.

2.1.1. Requerimientos operativos

Colombia es un país que tiene sus ciudades principales localizadas en diferentes alturas sobre el nivel del mar, lo cual implica una variedad de condiciones atmosféricas de presión y temperatura. Ahora bien, por el tipo de gasodómicos utilizados en los hogares, el parque de medidores instalados a nivel residencial corresponde en su gran mayoría a la designación OIML G1.6, el cual tiene un alcance de medición de 0,016 m³/h a 2,5 m³/h.

De esta manera, entre los requerimientos operativos que debe cumplir cualquier procedimiento orientado a la verificación de medidores residenciales, se deben contemplar los siguientes aspectos:

- El sistema de verificación debe tener la capacidad de comparar los volúmenes del patrón y del medidor bajo prueba en las mismas condiciones de presión y temperatura.
- El sistema de verificación debe operar adecuadamente en temperaturas entre 10 °C y 40

°C, y presiones atmosféricas desde 67 kPa hasta 106 kPa.

- El sistema de verificación debe tener la capacidad de generar flujos entre 0,016 m³/h hasta 2,5 m³/h, bajo todas las condiciones ambientales y cumpliendo con los caudales de prueba especificados en la NTC 2728.
- El sistema de verificación debe garantizar una conexión del medidor de forma rápida, segura y con el nivel de hermeticidad apropiado al proceso.
- El patrón usado en el sistema de verificación debe operar apropiadamente en el rango de flujos mencionado en el punto anterior.

2.1.2. Requerimientos metroológicos

Para que la verificación arroje resultados confiables desde un punto de vista metroológico, hay requisitos orientados al cumplimiento de la confiabilidad metroológica, a la adecuación del sistema para el fin previsto, y para el aseguramiento de la calidad de las mediciones.

Los siguientes son los requisitos metroológicos que deben ser cumplidos por todos los procedimientos de verificación:

- Los resultados obtenidos con el sistema deben tener una cadena de trazabilidad al SI.
- El modelo matemático debe estar soportado en referencias confiables. El sistema de verificación debe estar desarrollado de manera que pueda alcanzar incertidumbres expandidas de hasta la tercera parte de los EMP establecidos para el proceso, en los rangos de caudal correspondientes.
- El patrón usado en el sistema de verificación debe ser metroológicamente apropiado para asegurar el cumplimiento de la incertidumbre objetivo presentada en el punto anterior.
- El sistema de verificación debe poder ser calibrado con la infraestructura metroológica disponible en los laboratorios a nivel nacional para la calibración de medidores de volumen o caudal de gas y con trazabilidad al Sistema Internacional.

2.1.3. Requerimientos propios del proceso

Adicionalmente, para que el proceso de verificación esté acorde con las necesidades de las compañías distribuidoras o comercializadoras, se deben tener en cuenta los siguientes aspectos:

- El procedimiento debe contemplar que el efecto del operario que ejecuta el procedimiento sobre la calidad de los resultados sea el menor posible.
- Su modelo matemático debe estar basado en una referencia normativa reconocida.

- El procedimiento debe ser de fácil aplicación y debe poder emitir un resultado de forma inmediata.
- Para efectos legales, los resultados emitidos deben poder ser guardados en físico o digital, además estos deben contener la información suficiente para demostrar trazabilidad a todos los registros y cálculos ejecutados.
- El sistema de verificación debe poder ser aplicado en cualquiera de las dos metodologías aceptadas: (a) muestreo según métodos estadísticos o (b) revisión uno a uno o método exhaustivo.
- El procedimiento debe asegurar el cumplimiento de todas las condiciones de seguridad y salud en el trabajo, tanto para el cliente como para el operario encargado de la verificación.

2.2 Descripción de los procedimientos usados en la verificación de medidores

2.2.1 Descripción del procedimiento de verificación *in situ* usando un medidor testigo

En este procedimiento se usa un montaje provisional que está compuesto por un medidor de gas de las mismas especificaciones técnicas que el medidor a verificar y un juego de dos válvulas, una para apertura y cierre, y otra para el ajuste de la tasa de flujo. En este caso no se requiere la desconexión total del medidor.

El procedimiento consiste en la instalación en serie del medidor que hace las veces de patrón a la salida del medidor a verificar. La verificación se hace por comparación directa entre la indicación de volumen del medidor del usuario y las indicaciones de volumen del patrón.

Las tasas de flujo a las cuales se realiza la prueba se ajustan manualmente haciendo uso de un cronómetro, las indicaciones de volumen del medidor patrón y modulando la válvula de regulación de flujo del montaje.

Se usa gas natural como fluido de calibración, el cual después de pasar por los dos medidores es emitido a la atmósfera.

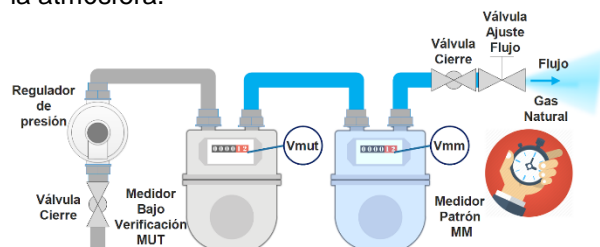


Fig. 1. Verificación usando un medidor testigo.

2.2.2 Descripción del procedimiento de verificación *in situ* usando una boquilla calibrada.

Este procedimiento es en gran parte similar al del medidor testigo. Se hace uso de un montaje provisional que tiene como elemento principal una boquilla que ha sido previamente calibrada en la magnitud de flujo volumétrico y para operar a unos valores de presión específicos. Los valores de presión a los que se calibra la boquilla deben ser similares a la presión de operación del gas que llega a las residencias. Se requiere una boquilla para cada valor de flujo que se requiera en la verificación.

La boquilla calibrada es el patrón de medida y la verificación se hace por comparación directa entre la indicación de volumen del medidor de la residencia y los valores de volumen inferidos a partir de la tasa de flujo de la boquilla y la medición de un intervalo de tiempo con un cronómetro manual.

En este caso el volumen del patrón se obtiene mediante el uso de la ecuación 1.

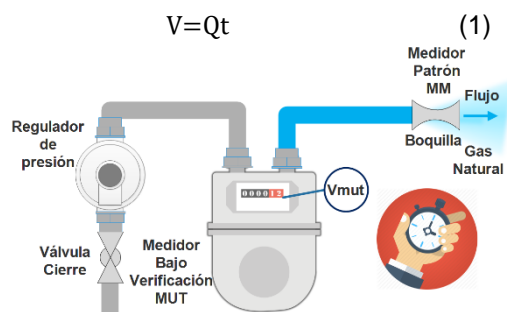


Fig. 2. Verificación usando una boquilla.

Se usa el gas natural como fluido de calibración, el cual es emitido a la atmósfera.

2.2.3 Descripción del procedimiento de verificación *in situ* realizando cálculos teóricos.

Este procedimiento calcula en forma teórica el volumen de gas consumido en un intervalo de tiempo definido a partir de la potencia de los artefactos a gas conectados en la instalación y el poder calorífico del gas utilizado.

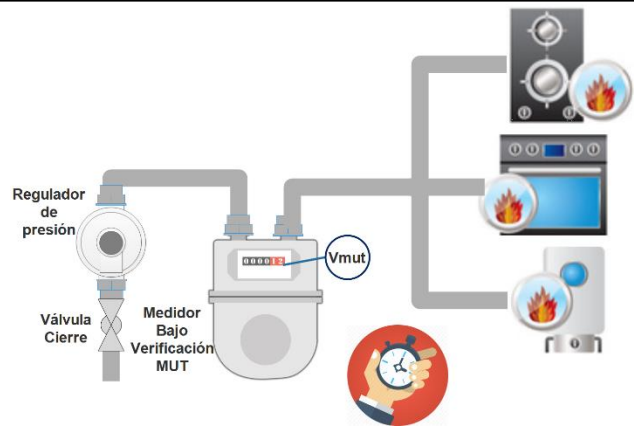


Fig. 3. Verificación con base en las especificaciones técnicas de artefactos a gas.

En este caso, el método de verificación es la comparación directa entre el volumen calculado a partir de los valores teóricos y el volumen registrado por el medidor bajo verificación en un intervalo de tiempo definido.

La ventaja de este procedimiento es que no requiere realizar ninguna desconexión. Adicionalmente, el gas es quemado generando así un menor impacto ambiental respecto a los procedimientos anteriormente descritos.

2.2.4 Descripción del procedimiento de verificación en laboratorio.

En este procedimiento, que corresponde al actualmente contemplado en la regulación colombiana, se utiliza un banco de calibración de medidores tipo diafragma, que se encuentra instalado en un laboratorio. En la mayoría de los laboratorios en Colombia los procedimientos y los bancos de calibración están alineados a los "Reglamentos de Prueba de PTB" (instituto nacional de metrología de Alemania) [7,8], aplicables a calibraciones de medidores de gas. Las condiciones ambientales del laboratorio se encuentran controladas, y los bancos de calibración habitualmente permiten la verificación de 5 o 10 medidores tipo diafragma de manera simultánea.

El banco posee varios instrumentos de medición de presión y temperatura, que permiten la conversión de los volúmenes en unas mismas condiciones termodinámicas para su comparación y posterior reporte del error de medición. Tanto los patrones como los instrumentos de presión y temperatura pueden ser desmontados, para ser calibrados ya sea en el mismo laboratorio o externamente.

Para poder realizar la verificación de los medidores, se requiere desmontar cada medidor de la instalación residencial de los usuarios, transportarlo hasta la

ubicación del laboratorio, efectuar la prueba (considerando también los periodos muertos de almacenamiento del medidor), retornarlo a la ubicación del usuario (en caso de que el resultado de la verificación haya sido satisfactorio) y reinstalarlo.

De esta manera, se aprecia que el procedimiento incurre en tiempos considerables para su ejecución, resultando como cuellos de botella del proceso las etapas de transporte del medidor ida y vuelta entre la instalación del medidor y el laboratorio, y los tiempos de almacenamiento antes y después de la prueba en el laboratorio.

2.2.5 Descripción del procedimiento de verificación *in situ* propuesto

El procedimiento de verificación *in situ* propuesto utiliza como patrón del sistema un medidor de flujo tipo micro electromecánico (MEMS) que fue adecuado con sistema electrónico para ser convertido en un medidor volumétrico de alta resolución.

El método consiste en la comparación directa entre volumen registrado por el patrón y el volumen registrado por el medidor bajo verificación.

El medidor es totalmente desinstalado del punto de medición y se conecta al dispositivo de verificación, en ese mismo sitio. El dispositivo posee un sistema de generación de flujo con ventilador que le permite usar aire como fluido de calibración. Posee un sistema electrónico de control y adquisición de datos, instrumentos de medición de presión y temperatura, y un módulo de comunicación Bluetooth® que le permiten brindar las siguientes funcionalidades:

- Realizar conversión del volumen medido por el patrón a condiciones termodinámicas del medidor bajo verificación en tiempo real.
- Ejecutar el procedimiento de verificación de manera automática
- Ajustar cada una de las tasas flujo de verificación de forma automática mediante control PID.
- A través de comunicación Bluetooth® y por medio de una aplicación móvil, provee al usuario la posibilidad de configurar, supervisar el proceso de verificación y emitir un reporte de resultados.

El sistema planteado puede calibrarse como un todo, utilizando para tal fin, por ejemplo, los bancos de calibración instalados en los laboratorios de las empresas distribuidoras de gas.

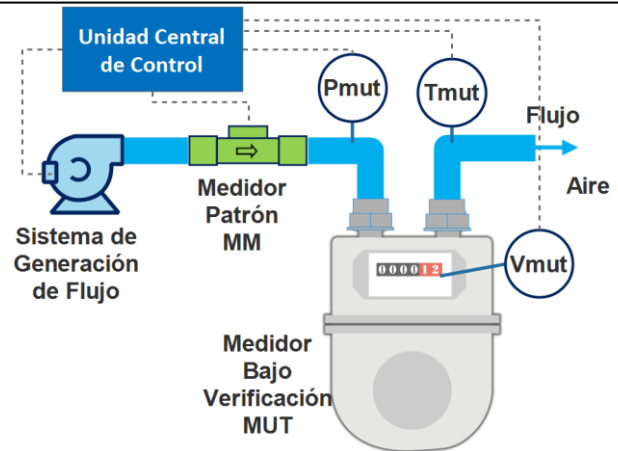


Fig. 4. Verificación *in situ* haciendo uso de un medidor MEMS como patrón.

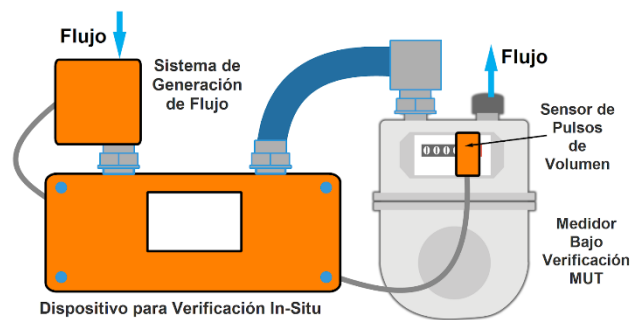


Fig. 5. Dispositivo propuesto para verificación *in situ*.

3. COMPARACIÓN DE LOS PROCEDIMIENTOS

Partiendo de la premisa que los cinco procedimientos de verificación deberían satisfacer los requisitos descritos en la sección 2.1., en la presente sección se realiza un análisis comparativo de otros aspectos, y en los que se presentan diferencias entre los 5 procedimientos de verificación.

A continuación, se desarrollan los diferentes aspectos seleccionados, evidenciando las ventajas y desventajas de los distintos procedimientos en cada una de las categorías de desempeño. Para comparar los procedimientos en igualdad de condiciones, se tomará como base de cálculo la verificación de 10 medidores de diafragma G1.6 en tres valores de caudal (Q_{min} , $0,2Q_{max}$ y Q_{max}), con tres repeticiones en cada uno.

3.1. Calidad metrológica del sistema de calibración

En el primer procedimiento, el equipo que se utiliza como patrón presenta características metrológicas similares al equipo que se está verificando (CMC entre 2% a 4%). Adicionalmente, se utilizan indicadores analógicos para determinar el resultado de la prueba, y la lectura de estos indicadores y del tiempo no es automática, sino que es realizada por un operador. De esta manera, no es posible garantizar

que la incertidumbre de la calibración sea la tercera parte de los límites de EMP establecidos.

En el segundo procedimiento, el patrón es una boquilla. Este instrumento mantiene una características metrológicas aceptables, pero dado que el flujo a través de la boquilla es función de la presión y la temperatura de estancamiento (que dependen de presión y temperatura a la entrada de la boquilla), y en el procedimiento estas dos variables no se controlan muy bien, el desempeño del proceso de calibración puede ser inferior al esperado (CMC entre 5% y 7%). Adicionalmente, las lecturas de tiempo e indicación del medidor bajo prueba son realizadas por un operador.

En el tercer procedimiento, ni siquiera se usa un equipo patrón propiamente dicho durante la verificación, sino que se utilizan datos promedio de consumo de combustible de electrodomésticos. Claramente, desde un punto de vista metrológico, es un procedimiento bastante inadecuado, en el cual la incertidumbre del resultado es extremadamente alta, para considerar las probables desviaciones de consumo de los diferentes equipos respecto de los valores promedio utilizados. Además, las lecturas del tiempo y de la indicación del medidor bajo prueba no son automáticas.

El cuarto procedimiento es el que posee las mejores características metrológicas. Como la calibración se realiza en laboratorio, se tiene el mejor control y la mejor estabilidad de las condiciones del proceso. Adicionalmente, los sistemas de calibración en laboratorio hoy en día cuentan con altos niveles de automatización. En la Tabla 2 se presenta un resumen de las capacidades de medición y calibración declaradas por los diferentes laboratorios colombianos acreditados por ONAC para calibración de volumen de gas en el intervalo de interés para medidores de diafragma G1.6. Esta información muestra la alta calidad metrológica del cuarto procedimiento.

Laboratorio	Tecnología del medidor patrón	CMC ¹
A	Campana gasométrica	0,13%
	Cámara húmeda	0,28%
B	Toberas críticas	0,24%
C	Cámara húmeda	0,27%
D	Cámara húmeda	Entre 0,30% y 0,36%

E	Cámara húmeda	Entre 0,38% y 0,60%
F	Cámara húmeda	Entre 0,35% y 0,38%
G	Toberas críticas	0,25%
H	Toberas críticas	Entre 0,29% y 0,38%

Tabla 2. Panorama de las CMC de los laboratorios acreditados por ONAC para calibración de medidores de gas, en los alcances correspondientes a medidores tipo diafragma G1.6. Información tomada de la página de ONAC. ¹CMC en unidades de porcentaje del error del medidor bajo prueba. Los laboratorios para los que se indica un rango de valores, declaran diferentes CMC para distintos subintervalos dentro del alcance de interés.

En cuanto al quinto procedimiento, las pruebas preliminares han mostrado que se alcanzan incertidumbres inferiores a la tercera parte de los límites establecidos (CMC=0,6%), gracias a la mayor instrumentación incluida en el equipo, en comparación con los procedimientos *in situ* números 1 y 2, a la incorporación de automatización en el funcionamiento del sistema de verificación, y a las buenas características del equipo utilizado como patrón.

Teniendo en cuenta las anteriores consideraciones, se realiza la cualificación de las características metrológicas de los diferentes procedimientos, obteniéndose el resultado mostrado en la Tabla 3.

Procedimiento	Calidad metrológica del sistema
1 (Diafragma en serie)	Muy baja
2 (Boquilla)	Baja
3 (Cálculos teóricos)	Casi inexistente
4 (Laboratorio)	Muy alta
5 (MEMS)	Alta

Tabla 3. Comparación de los procedimientos, en el aspecto de calidad metrológica.

3.2. Tiempo de duración de la verificación

En cuanto al tiempo requerido, los procedimientos 1, 2 y 5 requieren de periodos de magnitud similar. En estos tres procedimientos se requiere una desconexión parcial o total del medidor bajo prueba (entre 1 y 10 minutos), un acople con el sistema de verificación en el mismo sitio (unos 10 minutos), la ejecución de la prueba (unos 35 minutos, asumiendo el uso de 3 repeticiones en cada uno de los caudales

0.1 Q_{max} , 0.2 Q_{max} y Q_{max}) y la reinstalación del medidor (entre 1 y 10 minutos). El procedimiento 3, por otra parte, es el más rápido, pues no se necesita desinstalar ni instalar nada para realizar las pruebas. Y el procedimiento 4 (en laboratorio) es el que requiere más tiempo, y con bastante diferencia. En este procedimiento, además de la desinstalación y reinstalación, se requiere trasladar el medidor bajo prueba hasta el laboratorio para realizar las pruebas y llevarlo de regreso, aparte de otras demoras logísticas (programación de calibraciones, instrumentos en espera, etc.) que muy probablemente se presentarán, lo que ocasiona que la ejecución del procedimiento tarde varios días.

De acuerdo con las anteriores consideraciones, se llega a la calificación cualitativa presentada en la Tabla 4.

Procedimiento	Rapidez de la verificación
1 (Diafragma en serie)	Media
2 (Boquilla)	Media
3 (Cálculos teóricos)	Alta
4 (Laboratorio)	Muy baja
5 (MEMS)	Media

Tabla 4. Comparación de la rapidez de ejecución de la verificación.

3.3. Costo del equipo requerido para aplicar el procedimiento

Los procedimientos 1 y 2 tienen un costo relativamente bajo, pues utilizan un patrón y algunos accesorios de tubería, pero no incluyen instrumentación adicional ni automatización. La diferencia de precios entre estos dos procedimientos radica en el costo del patrón, siendo mayor el costo de una tobera crítica (procedimiento 2) que el costo de un medidor tipo diafragma, considerando que se necesita un orificio para cada tasa de flujo que se requiera reproducir. Alrededor de 80 USD para el procedimiento 1 y 300 USD para el procedimiento 2).

En el procedimiento 3, no se utiliza ningún equipo físico para realizar la verificación, de modo que el costo del equipo es inexistente.

Los equipos de calibración en laboratorio son los más costosos entre las alternativas analizadas. Se construyen de manera que puedan calibrarse múltiples medidores, habitualmente 5 o 10, lo cual a

su vez implica una cantidad importante de instrumentación. El costo de un equipo de calibración de medidores de gas en laboratorio suele estar entre 80000 USD a 150000 USD. El valor exacto dependerá de las prestaciones del sistema y de la tecnología utilizada como patrón.

El sistema del procedimiento 5 está basado en un equipo patrón electrónico de alta tecnología, y adicionalmente cuenta con instrumentación para medición de presión y temperatura, con toma de pulsos para el medidor bajo prueba y con una unidad de adquisición y envío de datos. Adicionalmente, hace parte del sistema de verificación un software que realiza los cálculos y la emisión de resultados de manera automática. Todo esto causa que el costo del sistema sea superior al de los procedimientos 1 y 2, alrededor de 3500 USD, pero en cualquier caso es muy inferior al costo de un sistema de calibración en laboratorio.

El resumen del análisis anterior se presenta en forma de indicadores cualitativos en la Tabla 5.

Procedimiento	Costo del sistema de verificación
1 (Diafragma en serie)	Muy bajo
2 (Boquilla)	Muy bajo
3 (Cálculos teóricos)	Nulo
4 (Laboratorio)	Muy alto
5 (MEMS)	Bajo

Tabla 5. Comparación relativa del costo de los sistemas de verificación.

3.4. Riesgos asociados con la aplicación de los procedimientos.

3.4.1. De seguridad industrial

Teniendo en cuenta que el gas natural es un combustible, su manejo puede generar riesgos de incendio o explosión. Entre los procedimientos descritos, el número 3 (cálculos teóricos) no provoca ningún riesgo adicional al normal de operación de la instalación residencial de gas. Los procedimientos 4 (laboratorio) y 5 (MEMS) requieren desinstalación y reinstalación del medidor, y este proceso implica un cierto incremento de los riesgos. Por otra parte para los procedimientos 1 (diafragma en serie) y 2 (boquilla) el riesgo es significativamente más alto, debido a la liberación del gas natural a la atmósfera al final de la línea de prueba.

De esta manera, el resumen del nivel de riesgo industrial adicional ocasionado por cada procedimiento es el siguiente:

Procedimiento	Incremento en el riesgo industrial
1 (Diafragma en serie)	Alto
2 (Boquilla)	Alto
3 (Cálculos teóricos)	Nulo
4 (Laboratorio)	Bajo
5 (MEMS)	Bajo

Tabla 6. Comparación de los procedimientos en el aspecto de seguridad industrial.

3.4.2. Sobre los equipos

En términos generales, el proceso de laboratorio impone riesgos de daño sobre los equipos bajo prueba, debidos al retiro, transporte, manipulación e instalación de los medidores. Con los procedimientos *in situ*, por otra parte, se producen riesgos principalmente sobre el sistema patrón, debido a que debe transportarse entre diferentes ubicaciones; en este caso, el riesgo sobre los medidores bajo prueba se limita al que se presenta en las fases de desinstalación y reinstalación del medidor. La siguiente tabla presenta la cualificación de estos riesgos:

Procedimiento	Riesgo sobre los equipos bajo prueba	Riesgo sobre los equipos patrones
1 (Diafragma en serie)	Bajo	Sí
2 (Boquilla)	Bajo	Sí
3 (Cálculos teóricos)	Nulo	Nulo
4 (Laboratorio)	Sí	Nulo
5 (MEMS)	Bajo	Sí

Tabla 7. Comparación de los procedimientos en el aspecto de riesgo sobre los equipos.

3.4.3. Ambientales

El impacto ambiental de los procedimientos depende principalmente de la liberación de gases de efecto invernadero totales durante el procedimiento de verificación. En los tres procedimientos con desmonte total del medidor (4 y 5), se libera una cantidad de gas

natural aproximadamente igual al volumen interno del medidor más el volumen acumulado en algunos tramos de tubería hacia dentro de la residencia (que es relativamente poco). El procedimiento 3 requiere de la quema de gas natural durante cierto periodo de tiempo, de modo que su ejecución produce cierta cantidad de gases de efecto invernadero adicionales a la operación normal de la instalación. En los procedimientos 1 y 2 la cantidad de gas liberado es significativa, y considerando que el metano tiene un potencial de calentamiento global de 25 veces el del dióxido de carbono y la gran cantidad de verificaciones que debería realizarse en una ciudad, estos son los peores procedimientos desde un punto de vista ambiental. En la siguiente tabla se resumen las anteriores consideraciones:

Procedimiento	Impacto ambiental
1 (Diafragma en serie)	Alto
2 (Boquilla)	Alto
3 (Cálculos teóricos)	Bajo
4 (Laboratorio)	Muy bajo
5 (MEMS)	Muy bajo

Tabla 8. Comparación del impacto ambiental de los procedimientos.

4. DISCUSIÓN

Para decidir respecto a la adecuación de diferentes posibles procedimientos de verificación de medidores residenciales, es necesario considerar los diferentes factores que fueron analizados en el presente trabajo, para los cinco procedimientos descritos.

En términos generales, el procedimiento de mayor sencillez de aplicación es el número 3, pero este procedimiento no cumple con las restricciones metrológicas mínimas para poder considerar que los resultados obtenidos son confiables, ni que estos resultados pueden servir para decidir respecto al cumplimiento de la regulación vigente.

El procedimiento 4 permite obtener los resultados más confiables de todos los procedimientos analizados. Sin embargo, la muy baja capacidad instalada en el país de este tipo de sistemas, respecto al parque de medidores que debe ser verificado, causa que sea inviable en este momento el cumplimiento de la regulación utilizando este procedimiento de verificación. El número de medidores residenciales instalados en Colombia, según datos de 2019, es de 9

761 755 medidores [9]. Los 8 laboratorios acreditados en el país cuentan con una capacidad conjunta para calibrar 73 medidores residenciales simultáneamente. Con 3 turnos de calibración diarios, esto representa una capacidad para calibrar diariamente 219 medidores, en laboratorios acreditados. De esta manera, calibrar el parque de medidores completo del país tomaría 44 574,22 días, es decir, 122,21 años.

Adicionalmente respecto al procedimiento 4, el costo de los sistemas es muy alto, y desde un punto de vista práctico, tanto para las empresas distribuidoras como para los usuarios resulta muy problemático el largo tiempo que requiere la verificación de los medidores desmontándolos, llevándolos a laboratorio y reinstalándolos posteriormente.

De esta manera, el alto número de medidores residenciales de gas natural en el país, y la necesidad de que las verificaciones tomen el menor tiempo posible, indican que la alternativa práctica más adecuada será un procedimiento de verificación *in situ*. Entre los procedimientos descritos, los procedimientos 1 y 2 presentan falencias significativas desde un punto de vista metrológico, resultan cuestionables por los impactos de tipo ambiental y de seguridad industrial que tienen. Es comprensible que en ciertos momentos y lugares se hayan utilizado estos procedimientos como una manera de buscar cumplir con la regulación del país, pero las desventajas que presentan impiden que cumplan cabalmente con su objetivo de determinar el cumplimiento o no, por parte de los medidores, de los límites de errores máximos permisibles. Por otra parte, el procedimiento 5 promete cumplir con los requisitos metrológicos establecidos, manteniendo las ventajas de facilidad de operación y de corto periodo de verificación que poseen los otros procedimientos *in situ* descritos, al tiempo que implica menores impactos ambientales y mayor seguridad a la hora de ejecutar verificaciones.

5. CONCLUSIONES

La manera que está actualmente aprobada en la regulación colombiana para realizar la verificación periódica de medidores residenciales de gas natural, teniendo en cuenta la capacidad instalada de los laboratorios y la cantidad de medidores en el país, hace que no sea posible cumplir con los periodos de verificación establecidos en la regulación. Además, genera grandes inconvenientes para los usuarios, y para las empresas distribuidoras de gas.

La mejor solución para realizar la verificación periódica de medidores residenciales será un procedimiento implementado *in situ*. Previamente han existido intentos de realizar esta verificación *in situ* utilizando procedimientos con equipos de bajo costo, pero no han permitido obtener resultados suficientemente confiables como para concluir adecuadamente respecto al cumplimiento de los límites de EMP por parte de los medidores, debido a su bajo nivel de control de las magnitudes de entrada e inadecuada definición del modelo de medición.

La existencia de nuevas tecnologías de medición de gas, junto a los desarrollos modernos en electrónica, hacen posible el desarrollo de nuevos patrones de medición automatizados y portátiles. Basándose en estas ideas, se propuso un nuevo sistema de verificación, descrito como el procedimiento 5 en el trabajo, que promete arrojar resultados con suficiente confiabilidad, pero con las ventajas que ofrece la realización *in situ* de la verificación. Por consiguiente, esto conduce a considerar la necesidad de generar cambios en las reglamentaciones, que permitan aprovechar los avances tecnológicos para dar soluciones más prácticas y adecuadas a problemas como el tratado en el presente trabajo: la verificación de medidores residenciales de gas natural.

REFERENCIAS

- [1] Comisión Nacional de Regulación de Energía y Gas, CREG. Resolución 127 de 2013.
- [2] Comisión Nacional de Regulación de Energía y Gas, CREG. Resolución 067 de 1995.
- [3] Comisión Nacional de Regulación de Energía y Gas, CREG. Resolución 059 de 2012.
- [4] Norma Técnica Colombiana NTC 2728 - "Medidores tipo diafragma". ICONTEC. 2005.
- [5] OIML, OIML R 137- 1 & 2- Gas Meters - Part 1: Metrological and technical requirements. 2012.
- [6] Norma Técnica Colombiana NTC 5730 - Revisión periódica de instalaciones para suministro de gas natural destinadas a usos residenciales y comerciales y sus correspondientes artefactos a gas". ICONTEC. 2009.
- [7] Reglamentos de Prueba del PTB Tomo 29. Dispositivos de medición de gas. Medidores de gas - Prueba de medidores de volumen de gas con aire a presión atmosférica. Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB). 2003.
- [8] Reglamentos de Prueba del PTB. Tomo 25, Medidores de Gas – Bancos de prueba con toberas críticas. Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB).1998.
- [9] Promigas. 2020. Informe del sector gas natural 2019.