

Estudio Sobre la Trazabilidad Metrológica en la VERIFICACIÓN IN SITU de Elementos Secundarios Asociados a Sistemas de Medición de Gas Natural

Erik S. Tapias Chávez, CDT de GAS (etapias@cdtdegas.com)
 Juan M. Ortiz Afanador, TGI S.A. E.S.P. (juanmanuel.ortiz@tgi.com.co)
 John F. Velosa Chacón, TGI S.A. ESP (john.velosa@tgi.com.co)

Resumen

El presente artículo comparte las lecciones aprendidas después de llevar a cabo un proyecto de carácter tecnológico e innovador entre la Transportadora de Gas Internacional (TGI) y la Corporación Centro de Desarrollo Tecnológico del Gas (CDT de GAS). El estudio planteado en el proyecto dio inicio considerando que para obtener mediciones confiables en Sistemas de Medición, es necesario (pero no suficiente) asegurar cada una de sus partes constitutivas, siendo el aseguramiento de la trazabilidad en los elementos secundarios uno de los aspectos que mayor atención requiere por causa del desempeño propio de este tipo de elementos. Lo anterior llevó a la búsqueda de alternativas que permitiera garantizar la trazabilidad metrológica de los elementos mediante dos aspectos complementarios: el primero de ellos consistió en validar el nivel de incertidumbre asociado a los procesos de calibración/verificación que llevan a cabo los instrumentistas de TGI sobre la infraestructura metrológica instalada, y el segundo tuvo que ver con la implementación de una estrategia de Confirmación Metrológica basada en el modelo del estándar internacional ISO 10012 aplicable a las magnitudes presión, temperatura y variable eléctrica a nivel de instrumentación. Como resultado de este proceso se desarrolló un prototipo de patrón de referencia (MVR) como herramienta para la implementación del estándar ISO 10012, el cual fue empleado durante las pruebas piloto para evaluar la potencial influencia de diferentes factores en el nivel de incertidumbre asociado a los procesos de calibración/verificación. Los resultados y conclusiones de este proceso se presentan en la parte final del documento.



1. INTRODUCCIÓN

Los procesos de medición se realizan día a día en cualquier proceso industrializado y son parte esencial del control operativo de cualquier empresa. Específicamente en la industria del petróleo y el gas lograr realizar mediciones confiables permite disminuir la probabilidad de tomar decisiones erróneas, reducir pérdidas económicas, contar con una mayor transparencia en los procesos de transferencia, optimizar los procesos, mejorar el control de los balances, entre otros muchos aspectos que se traducen en una mejor percepción de la empresa, así como en su posicionamiento a la luz de las denominadas prácticas de “Clase Mundial”.

En materia metrológica uno de los retos más grandes de las empresas del sector del petróleo y el gas consiste en garantizar un aseguramiento efectivo de la trazabilidad metrológica en sus instalaciones. Conocedora de esta problemática, TGI decidió asumir el reto de desarrollar -en Colombia-un proyecto de carácter tecnológico e innovador, enmarcado dentro del Convenio firmado con el CDT de GAS. El proyecto en mención tenía dos aspectos esenciales. El primero de ellos consistía en validar la estimación de incertidumbre asociada a las calibraciones que desarrollaban sus instrumentistas sobre la infraestructura metrológica instalada; por otra parte, el segundo aspecto tenía que ver con la implementación de una estrategia de Confirmación Metrológica basada en el modelo de la Norma Internacional ISO 10012[1] para atender las magnitudes presión, temperatura y variable eléctrica a nivel de instrumentación.

Para dar solución a la problemática y responder una serie de interrogantes relacionados con la trazabilidad metrológica, la incertidumbre en las mediciones, el control de los errores y la gestión del recurso humano se desarrolló un prototipo de Patrón de Medida de Referencia (MVR Calibrator). A continuación se presenta con mayores detalles el proyecto ejecutado.

2. PLANTEAMIENTO DE LA PROBLEMÁTICA

TGI es una empresa cuya misión se centra en el transporte de hidrocarburos y muy particularmente en el de gas natural al interior de Colombia. La cuantificación del gas recibido a los productores y entregado a los remitentes se realiza a través de un conjunto de aproximadamente 250 sistemas de medición (SM) distribuidos sobre la red nacional de gasoductos. De acuerdo con API MPMS 21.1 [2], los SM se encuentran constituidos básicamente por un elemento primario, correspondiente al medidor, los elementos secundarios, conformados por los sistemas de medición de presión, temperatura y -en algunos casos- analizadores de gas en línea, y por último el elemento terciario, constituido por el computador de flujo.

Para obtener mediciones confiables del SM, es necesario (pero no suficiente) asegurar cada una de sus partes constitutivas. En el caso específico del aseguramiento metrológico de los elementos secundarios, TGI cuenta con personal (Técnicos Instrumentistas) e Infraestructura (Patrones de Trabajo) con los cuales disemina la trazabilidad y ejecuta un control de errores asociado a las magnitudes presión, temperatura y variable eléctrica, tanto en sistemas de transferencia de custodia (centros de producción de gas natural y estaciones de entrega de gas a clientes) como en instalaciones de carácter operativo que disponen de instrumentos para medir las magnitudes anteriormente enunciadas.

La calibración de esta instrumentación es realizada in situ, en ocasiones a la intemperie (bajo la influencia de radiación solar directa, corrientes de aire, entre otras), empleando patrones de trabajo que se movilizan constantemente entre las diferentes estaciones. A pesar de que la tradición o la práctica común en la industria del petróleo y el gas, consiste en enviar los patrones de trabajo a calibración una vez cada año, TGI tiene una visión crítica de esta costumbre arraigada en la cultura metrológica industrial. Desde un punto de vista objetivo, está claro que esta práctica no proporciona una garantía suficiente o confiable acerca de la conservación del desempeño de los patrones, en especial si se analizan aspectos como la severidad y el tipo de uso a que se ven sometidos, aspectos que junto con la calidad de los equipos y la definición de las tolerancias de control metrológico pueden incidir significativamente sobre su aptitud para el uso.

De acuerdo con lo anterior, es posible que se presenten escenarios en los que el patrón no cumple con la tolerancia de desempeño en un plazo inferior a un año (contado a partir de la fecha de la última calibración). No obstante, también es posible que los factores asociados al modelo converjan de manera tal que un año después el patrón todavía conserva sus propiedades metrológicas de forma que el equipo puede continuar siendo apto para el uso.

Está claro que implementar un esquema de gestión de las mediciones basado en ISO 10012 contribuirá a la solución del problema planteado. Sin embargo, no todo se circunscribe a la confirmación metrológica de los patrones de trabajo. Un aspecto clave, que estuvo latente por resolver desde el inicio de las operaciones de TGI (en 2007), esperando por una solución inteligente al problema, tenía que ver con la estimación de la incertidumbre asociada a los procesos de calibración y verificación de elementos secundarios que se llevan a cabo en campo.

Generalmente las decisiones de ajuste de instrumentos se basan únicamente en el error de medición y las tolerancias admisibles, sin tener en



Figura 1. Proceso de Confirmación Metroológica

cuenta la incertidumbre particular del proceso de calibración (no genérica), pasando por alto aspectos tan críticos como los procedimientos y el personal, así como otros factores que por la dificultad de su determinación cuantitativa terminan estimándose con base en la “experiencia”, en la información del fabricante bajo las “idealizadas” condiciones de laboratorio u obviándose por parte de las áreas de Mantenimiento y Operación.

En conclusión, a la luz de lo anteriormente expuesto, al inicio del proyecto existían diferentes limitantes que impedían tomar las medidas correctivas necesarias, en las que se destacan:

- Desconocimiento del comportamiento metroológico de los patrones de trabajo entre períodos sucesivos de verificaciones metroológicas, las cuales se realizaban una sola vez al año o cuando existían “dudas” acerca del desempeño de un equipo en particular.
- Ausencia de patrones de medida de referencia para realizar verificaciones intermedias a los patrones de trabajo empleados en la diseminación de trazabilidad a las mediciones en campo.
- Establecimiento de límites de control a las mediciones con base en valores obtenidos a partir de la mejor información disponible y aplicando factores de seguridad, debido al desconocimiento cuantitativo y particular de la influencia de los diversos factores que pueden incidir en el resultado de las mediciones in situ (P. Ej. procedimiento, condiciones ambientales, destreza del personal, estabilidad, entre otros).

3. SOLUCIÓN PROPUESTA

Para dar solución a la problemática planteada, se consolidó un equipo interdisciplinario entre TGI y

¹ Se aclara que en este documento se tratan las magnitudes de influencia de una manera consistente con la GUM [3], la cual difiere de la tercera edición del VIM [4]. Esto en razón a que dicha definición comprende no solo las magnitudes que afectan al sistema de medida, sino que también incluye aquellas que afectan a las magnitudes realmente medidas. La GUM tampoco limita este concepto a mediciones directas.

el CDT de GAS, conjugándose las fortalezas propias de TGI como empresa transportadora de gas natural, con el conocimiento científico y la experiencia en desarrollos tecnológicos aplicables a la metrología de fluidos por parte del CDT de GAS.

El problema se abordó desde dos frentes con objetivos diferentes pero complementarios bajo la óptica del planteamiento del problema:

- **Desarrollo Tecnológico:** Se asocia con el desarrollo de los medios o infraestructura requerida para determinar la validez (trazabilidad e incertidumbre) de los resultados obtenidos por los instrumentistas in situ mediante el uso de los patrones de trabajo asignados.
- **Generación de Conocimiento:** Se enfoca en la identificación, conocimiento, caracterización, mitigación y control de magnitudes de influencia¹ relevantes durante los procesos de calibración in situ.

3.1 Desarrollo tecnológico

La primera parte del proyecto se enfocó en el desarrollo de una herramienta proyectada a la medida y con un propósito dual en relación con los dos objetivos citados anteriormente, es decir que se requería el desarrollo de un equipo patrón de referencia que brindara un soporte de alto nivel al control metroológico de los patrones de trabajo usados en campo por los técnicos instrumentistas y



Figura 2. Cadena de trazabilidad

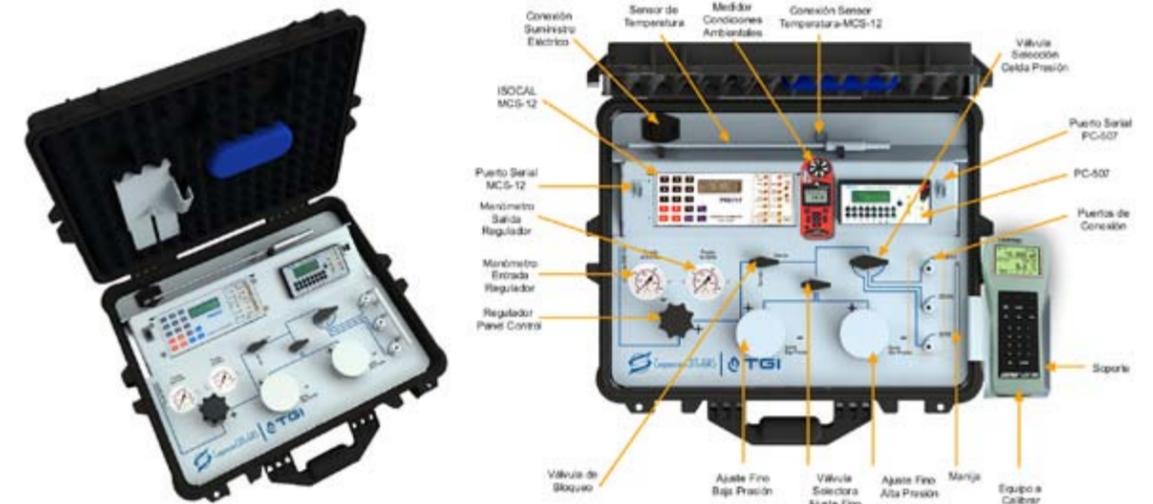


Figura 3. a) MVR Calibrator b) Partes constitutivas del MVR Calibrator

que a su vez permitiera realizar una evaluación de las magnitudes de influencia relevantes durante los procesos de calibración in situ.

Para establecer la estrategia de control metroológico se siguieron los lineamientos citados en ISO 10012, referencia en la cual establece que: “un proceso de confirmación metroológica tiene dos entradas: los Requisitos Metroológicos del Cliente (RMC) y las Características Metroológicas del Equipo de Medición (CMEM), y un solo resultado: el estado de confirmación del equipo de medición”.

Esta estrategia busca asegurar que los equipos y procesos de medición sean adecuados para su uso previsto, de manera que sea posible cumplir con los objetivos de calidad estipulados. En términos prácticos, la implementación de una estrategia de confirmación metroológica representa la inclusión de un nuevo eslabón en la cadena de trazabilidad de TGI (Ver Figura 2), cuyo objetivo específico corresponde a la capacidad de realizar un seguimiento y control más estricto al desempeño metroológico de los patrones de trabajo usados para las variables de presión, temperatura y magnitudes eléctricas a nivel de instrumentación. Esta estrategia hace posible que la toma de decisiones en materia de envío a calibración de los patrones de trabajo se base en su condición, es decir que se realice en el mo-

mento justo en que se identifique una desviación que supere los límites permisibles y no con base a una frecuencia preestablecida de calibraciones que puede ser fija (P. Ej. anual) o variable (P. Ej. métodos tiempo calendario).

El nuevo eslabón en la cadena, correspondiente al desarrollo alcanzado, constituye una herramienta tecnológica, diseñada y construida bajo especificaciones con el enfoque de modalidad AiO (All-in-One), el cual integra sobre una plataforma robusta patrones de referencia para las magnitudes presión, temperatura y variables eléctricas a nivel de instrumentación.

El desarrollo alcanzado, denominado MVR Calibrator (Multi-Variable Reference Calibrator) es un producto tecnológico integrado multipropósito, de fácil uso, gran robustez y bajo peso debido a su fabricación en polipropileno estructural de ultra-alta resistencia, desarrollado principalmente para ser empleado como un mecanismo para el control metroológico de los instrumentos empleados para las calibraciones In Situ en las magnitudes de presión, temperatura, voltaje, corriente, frecuencia y resistencia.

El MVR Calibrator está compuesto por un patrón de presión dotado de tres transductores con alcan-

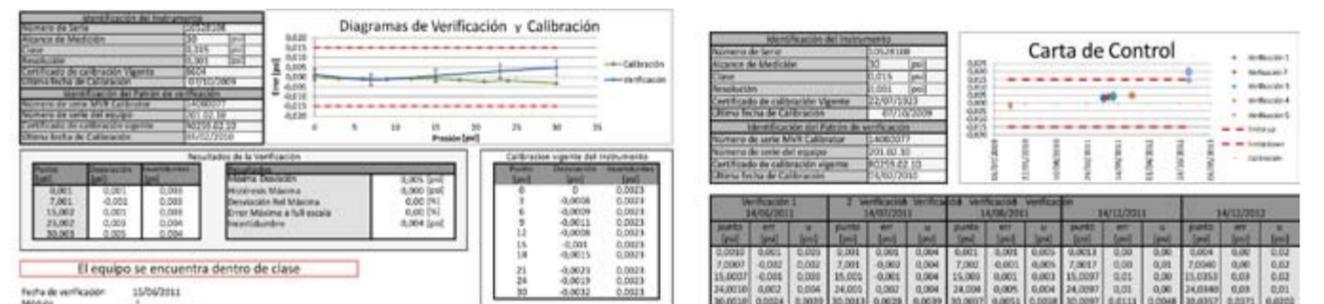


Figura 4. Herramienta de Cálculo programada en MS-Excel

Resolución	Exactitud	Especificaciones
0,007 mbar	±0,025%FS	Presión manométrica o diferencial. Fluidos (líquidos o gases)
0,7 mbar	±0,025%FS	
0,7 mbar	±0,025%FS	

Tabla 1. Especificaciones del calibrador de Presión del MVR Calibrator

ces de 2, 35 y 200 bar (30, 500 y 3000 psi), un calibrador de procesos con capacidad para generar valores de referencia y servir de indicador para las magnitudes voltaje, corriente eléctrica (continua), resistencia eléctrica y frecuencia, adicionalmente el MVR Calibrator incorpora un sensor de temperatura tipo RTD Pt-100 de 4 hilos, la cual usa el calibrador de procesos como indicador para las mediciones de temperatura.

En cuanto a los medios para generación y ajuste de presión de prueba, el MVR Calibrator dispone de un sistema neumático, provisto de válvulas de seguridad para protección contra sobrecargas de presión y pistones de ajuste fino para obtener con facilidad presiones estables hasta 138 bar (2000 psi). Adicionalmente, el MVR Calibrator tiene incorporado un dispositivo registrador de condiciones ambientales con capacidad de realizar mediciones continuas de presión atmosférica, temperatura ambiente, velocidad del viento, humedad relativa, entre otras.

Para la implementación de la estrategia de control metrológico, para el MVR Calibrator se desarrolló una herramienta computacional programada en

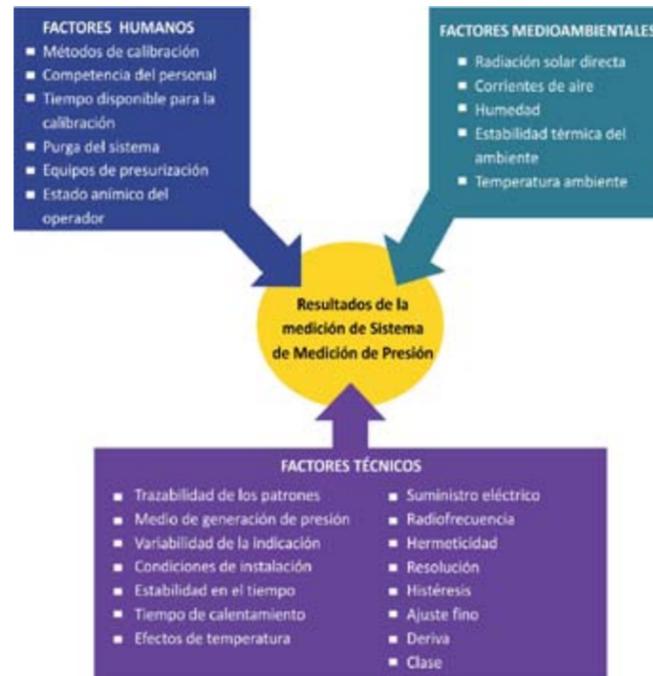


Figura 5. Fuentes de incertidumbre en la calibración de un sistema de medición de presión

MS-EXCEL. Cuenta con una interfaz de fácil manipulación para el usuario y al final del proceso estima automáticamente la incertidumbre asociada al proceso de calibración/verificación del patrón de trabajo o instrumento, tomando como base las características técnicas de dichos equipos de me-

		Intervalo de Indicación	Resolución	Exactitud	Especificaciones
MODO GENERACIÓN (OUT)	Volt	-0,5 a 12V	0,0001V	±0,02% FS	R out<0.3Ω
	mA	0 a 24mA	0,0001mA	±0,02% FS	R máx.=700
	Frecuencia	0 a 100Hz 0 a 10kHz	0,001Hz 1 Hz	±0,02Hz ±2Hz	Valor pico -1 a 11V
	Resistencia Ω	0 a 400Ω 400 a 2500Ω	0,01Ω 0,1 Ω	±0,02%FS ±0,03%FS	Excitación externa 1,0 mA
	Pt-100	-200 a 850 °C / -328 a 1562 °F	0,01°C / 0,01°F	±0,2°C / ±0,4°F	IEC-751
MODO INDICACIÓN (IN)	Volt	-10 a 11 V 11 a 45 V	0,0001V 0,0001V	±0,02% FS ±0,02% FS	Rin>1MΩ
	mA	-5 a 24,5mA	0,0001mA	±0,02% FS	Rin<160Ω
	Frecuencia	0 a 600 Hz 600 a 1300Hz 1,3 a 10kHz	0,01Hz 0,1Hz 1Hz	±0,02Hz ±0,2Hz ±2Hz	R in>50kΩ V max= 30V AC 0,3 a 30V
	Resistencia Ω	0 a 400Ω 400 a 2500Ω	0,01Ω 0,01Ω	±0,01%FS ±0,03%FS	Corriente excitación 0,85 mA
		Pt-100	-200 a 850 °C / -328 a 1562 °F	0,01°C / 0,01°F	±0,1°C / ±0,2°F

Tabla 2. Especificaciones del calibrador de procesos del MVR Calibrator

Magnitud	Tiempo de Respuesta	Intervalo de medición	Resolución	Exactitud
Velocidad del Viento	1 segundo	0,4 a 60 m/s	0,1	Mayor de 3% de la lectura o menor que el dígito significativo
Temperatura	1 segundo	-45 a 125 °C	0,1 °C	1,0 °C
Humedad Relativa	60 segundos	0 a 100% HR	0,1% HR	3,0% HR
Presión Atmosférica	1 segundo	300 a 11100 mbar	0,1 mbar	1,5 mbar

Tabla 3. Especificaciones del registrador de condiciones ambientales del MVR Calibrator

didada, la repetibilidad de las mediciones y las características técnicas y metrológicas de los patrones. Complementariamente, la herramienta dispone de cartas de control estadístico (una para cada instrumento verificado) las cuales permiten al usuario visualizar la evolución del comportamiento metrológico del instrumento a través del tiempo, así como recibir una alerta cuando éste requiere ser enviado a calibración, en armonía con los requisitos metrológicos del cliente (RMC).

Aunque el MVR Calibrator está proyectado para ser usado de manera estacionaria en cada uno de los principales distritos operativos de TGI, el equipo desarrollado fue puesto a prueba durante el estudio que se describirá en el próximo numeral, el cual se enfocó en la evaluación de la influencia de los diferentes factores que afectan las calibraciones in situ, donde fue sometido a traslados continuos, extensas jornadas de trabajo, condiciones ambientales extremas, entre otras condiciones operativas bajo las cuales demostró su funcionalidad y estabilidad en el desempeño metrológico. Algunas de las características técnicas más importantes de los patrones de referencia incluidos en el MVR Calibrator, se presentan en la tabla 1, tabla 2 y tabla 3.

3.2 Generación de conocimiento

La segunda parte del proyecto consistió en realizar un estudio enfocado hacia la determinación cuantitativa de la influencia que ejercen diversos factores sobre los resultados de las calibraciones realizadas por TGI con sus procedimientos, personal y equipos patrones de trabajo. El estudio se centró en las magnitudes presión estática, temperatura y corriente continua (4 a 20 mA).

En términos generales, los factores o magnitudes de influencia pueden clasificarse en tres categorías:

Factores medio-ambientales: Influencia de corrientes de aire, humedad, radiación solar directa, entre otros.

Factores técnicos: Adicional a las características metrológicas de los patrones de trabajo y los procedimientos, los factores técnicos también involucran aquellos que pueden llegar a afectar el desempeño metrológico y/o funcional de los patrones durante su utilización, como por ejemplo el suministro de corriente eléctrica empleando plantas eléctricas, el uso de patrones con un bajo nivel de carga de las baterías y el empleo de patrones sin un precalentamiento adecuado.

Factores humanos: Corresponde al desempeño del personal a cargo de realizar las calibraciones como responsable del proceso de calibración y por lo tanto, de diseminar la trazabilidad en la medición. Para el desarrollo del estudio se diseñó un experimento estructurado bajo la metodología propuesta por Bicking [5] para la planeación de los programas de prueba, lo cual permitió la obtención de información de alta calidad a través de una secuencia completa de pasos, el análisis objetivo de la información y la consecución de deducciones válidas con respecto al problema establecido.

El experimento consistió en realizar una serie de pruebas durante el año 2010 en cinco de los distritos operativos de TGI, ubicados en Barrancabermeja (Santander), Cagua (Cundinamarca), Paipa (Boyacá), Gualanday (Tolima) y Villavicencio (Meta), incluyendo al CDT de GAS como laboratorio piloto. Los factores de influencia objeto de investigación dependieron de la magnitud de medición a evaluar, estos se resumen a continuación:

- **Presión:** Influencia de i) la incidencia solar directa, ii) las corrientes de aire y iii) sus interacciones.
- **Temperatura:** Influencia de i) la incidencia solar directa, ii) las corrientes de aire, iii) el uso de planta eléctrica, iv) el uso de aislante térmico en la parte del sensor expuesta a condiciones ambientales y v) sus interacciones.
- **Corriente Continua:** Influencia cuando el equipo trabaja tanto en modo generador, como en

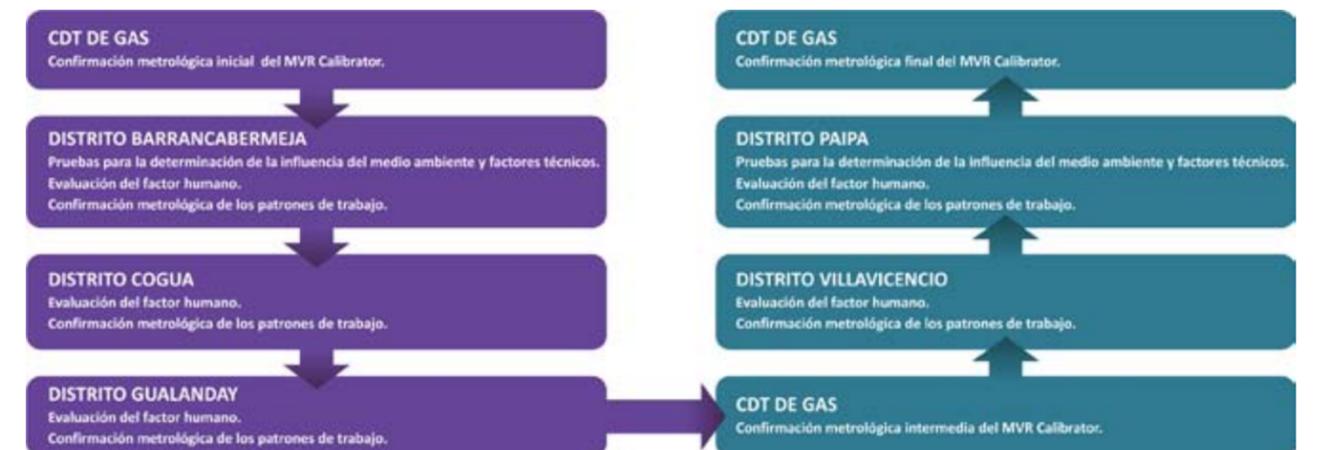


Figura 6. Recorrido realizado para la ejecución de las pruebas.

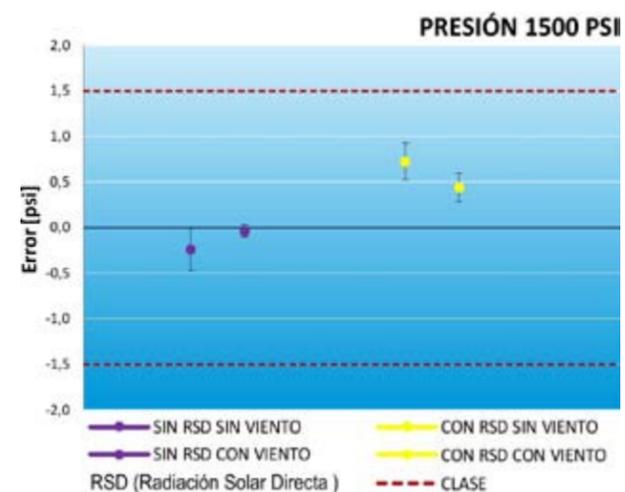
modo indicador de i) la incidencia solar directa, ii) el tiempo de calentamiento y iii) sus interacciones.

- **Factor humano:** Influencia del desempeño del operador.

A continuación se presenta una breve descripción de las pruebas realizadas:

- a. **Pruebas para determinar la influencia de factores técnicos y medio ambientales:** Estas pruebas se llevaron a cabo en Barrancabermeja y Paipa por tratarse de dos sitios de condiciones ambientales extremas y opuestas, se seleccionaron los equipos con mejor desempeño metrológico de cada distrito en particular, para lo cual se realizó la confirmación metrológica de cada instrumento empleando el MVR Calibrator. Teniendo en cuenta que el objetivo de las pruebas era evaluar la influencia independiente y su interacción, cada prueba fue realizada bloqueando adecuadamente, el factor o los factores no deseados en el experimento. Por ejemplo, cuando se buscaba determinar la influencia de corrientes de aire en las mediciones, las pruebas se ejecutaban bajo condiciones de temperatura estable, sin la incidencia solar directa y con una corriente constante de aire. Todas las mediciones fueron ejecutadas por un solo metrólogo del CDT de GAS dotado de experiencia y destreza con la finalidad de bloquear la incidencia del factor humano. Los equipos patrón (MVR Calibrator), no fueron sometidos a ninguno de los factores de influencia bajo estudio, es decir, siempre se mantuvieron bajo condiciones de temperatura estable, bajo sombra, sin la influencia de corrientes de aire, con calentamiento previo especificado por el fabricante y conectados a una fuente de alimentación eléctrica regulada.

- b. **Pruebas para determinar la influencia del factor humano.** Estas pruebas se llevaron a cabo



con cada uno de los instrumentistas que laboran en los distritos operativos de TGI en 2010 (Barrancabermeja, Gualanday, Paipa, Villavicencio y Cagua). Las pruebas consistieron en registrar la realización de calibraciones de presión y temperatura por parte de los técnicos con la finalidad de evaluar su nivel de competencia, las prácticas metrológicas empleadas y el grado de asimilación de los procedimientos corporativos establecidos por TGI para tales labores.

Las pruebas de presión consistieron en realizar la calibración sin ajuste en secuencia ascendente-descendente-ascendente, en cinco puntos de la celda de 200 bar (3000 psi) ubicada en el MVR Calibrator, empleando como patrón, un calibrador de procesos asociado a la celda de 200 bar (3000) psi.

- c. **Confirmación metrológica de los patrones de trabajo.** El objetivo de estas pruebas fue evaluar el estado metrológico de los patrones empleados para la calibración de los sistemas de medición de presión, temperatura y magnitudes eléctricas (corriente, voltaje, frecuencia, tanto en modo indicador como en modo generador). Estas pruebas se desarrollaron en condiciones de temperatura estable, bajo sombra, sin la incidencia de corrientes de aire, con un adecuado tiempo de calentamiento de los equipos y con suministro eléctrico adecuado. Como equipo patrón se empleó el MVR Calibrator, el cual fue sometido a un total de tres verificaciones durante el tiempo que duraron las pruebas en los distritos: antes del inicio de las pruebas, en el intermedio de las pruebas y por último al finalizar el recorrido por todos los distritos (Ver Figura 6).

4. RESULTADOS

A continuación se presentan algunos de los resultados obtenidos, los cuales son un reflejo de las tendencias encontradas para la mayoría de las pruebas.

4.1 Resultados de Pruebas de Condiciones Ambientales

4.1.1 Resultados de Pruebas de Presión

Para el caso de las pruebas de presión con respecto a los factores medioambientales (incidencia de la radiación solar directa, el viento y su interacción), se observó que a pesar de que los errores en conjunto con su respectiva incertidumbre de medida se mantuvieron dentro de los límites establecidos por el fabricante, el error entre las pruebas realizadas bajo sombra y bajo condiciones de radiación solar directa, eran cada vez mayores en la medida en que se incrementaba la presión de prueba. Ver Figura 7



Figura 8. Recubrimiento de sensor que sobresale del bloque seco

4.1.2 Resultados de Pruebas de Temperatura

En el caso de las pruebas de temperatura, los resultados mostraron dos tendencias: una primera, en la que el elemento generador (bloque seco) no presentó desviaciones significativas, independientemente de las pruebas ejecutadas y la segunda, en la cual se apreció una clara influencia de las mediciones por efectos de la incidencia solar sobre el equipo y el efecto del uso del aislante térmico en el sensor que sobresale del bloque seco (Figura 8). Es importante aclarar que los patrones empleados correspondían a diferentes modelos de un mismo fabricante.

4.1.3 Resultados de Pruebas de Corriente Eléctrica

Las pruebas realizadas en magnitudes eléctricas se efectuaron únicamente para la magnitud de corriente, tanto para modo generador como indicador, teniendo en cuenta que cuando se realiza una calibración en lazo abierto, por lo general se trabaja con señales de 4-20 mA. Los resultados obtenidos muestran que los equipos bajo prueba se vieron más afectados cuando estos operaban en modo indicador, siendo el factor de mayor impacto, la incidencia solar directa y la falta de tiempo de calentamiento antes de su uso, hasta el punto incluso de obtener errores por fuera de los límites de exactitud del instrumento. Ver Figura 9.

4.2 Resultados de Pruebas de Nivel de Carga de las Baterías

Teniendo en cuenta que en ocasiones se realizan calibraciones con instrumentos con bajos niveles de carga de las baterías, se llevó a cabo una prueba para determinar su influencia en los resultados de la calibración. No se encontró influencia alguna en los resultados de medición. Es importante advertir que los resultados obtenidos corresponden a una marca y modelo específico de patrones de trabajo.

4.3 Resultados de Evaluación del Recurso Humano

Uno de los factores más importantes en un pro-

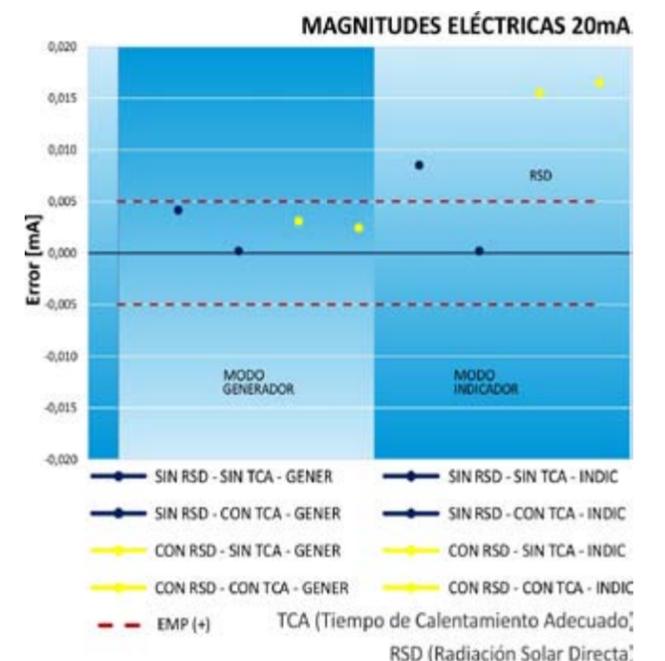
grama de aseguramiento metrológico corresponde al recurso humano responsable de desarrollar las labores de metrología industrial. Es claro que independientemente del grado de sofisticación tecnológica disponible (equipos patrones confiables, cartas de control estadístico, etc.), si no se cuenta con personal competente, las actividades de control no se desarrollarán de manera correcta y no se obtendrán resultados satisfactorios. La Figura 10 muestra el error de calibración de un mismo elemento para medición de presión, el cual fue obtenido por cada uno de los instrumentistas participantes en el proceso, doce en total, empleando el mismo procedimiento bajo condiciones ambientales estables.

La incertidumbre asociada al error obtenido por cada uno de los instrumentistas durante la calibración, considera únicamente la desviación estándar, con un factor de cobertura $k=2$ con lo cual se logra un nivel de confianza de aproximadamente el 95%.

En la Tabla 4 se presenta un resumen de los resultados obtenidos.

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES DEL ESTUDIO

Con respecto al primer objetivo planteado dentro del estudio de trazabilidad metrológica en la calibración/verificación in situ de elementos secundarios asociados a sistemas de medición de gas natural, se realizó una validación del nivel de incertidumbre asociado a los procesos mencionados, a partir de la determinación cuantitativa del



Variable	Factor evaluado (ambiental, técnico o humano)	Pruebas realizadas	Resultado obtenido	Impacto	Conclusión/Recomendación
Presión	Influencia de la radiación solar en los procesos de calibración/verificación	Calibración de presión bajo la influencia única de radiación solar directa.	Desviación con tendencia positiva (máx. error FS: 0,07%). Clase del instrumento: 0,075%	Medio (errores dentro de clase)	Implementación de elementos que puedan evitar la radiación directa sobre los equipos (sombrias, polisombras, etc.)
		Calibración de presión bajo sombra.	Desviación con tendencia positiva (máx. error FS: 0,02%). Clase del instrumento: 0,075%		
	Influencia de las corrientes de aire presentes durante los procesos de calibración/verificación	Calibración de presión bajo la influencia de corrientes de aire (velocidad media:3 m/s)	Errores de medición muy bajos (máx. error: 0,02%) Clase del instrumento: 0,075%	Bajo (errores cercanos a cero)	No existe influencia apreciable por efecto de las corrientes de aire en los procesos de calibración/verificación en la variable de presión
		Calibración de presión sin influencia única de corrientes de aire (velocidad media:3 m/s)	Errores de medición muy bajos (máx. error: 0,01%) Clase del instrumento: 0,075%		
Influencia del factor humano en los procesos de calibración/verificación	Se realizó la calibración de un mismo elemento para medición de presión (12 instrumentistas de TGI). El proceso se desarrolló bajo condiciones ambientales estables y empleando el mismo procedimiento.	Máximo error FS: 0,03% Dispersión de los resultados: 0,02%	Medio (errores dentro de clase)	Es conveniente mantener un programa de formación continua del personal para asegurar el desarrollo adecuado en los procedimientos de calibración/verificación.	
Temperatura	Influencia de la radiación solar en los procesos de calibración/verificación	Calibración de temperatura bajo la influencia única de radiación solar directa SIN EMPLEAR aislante en el sensor expuesto.	Desviación con tendencia negativa (máx. error: -0,23°C). Exactitud del instrumento: ±0,4°C	Medio (errores dentro de la clase)	Considerando el impacto que puede generar la radiación solar sobre el equipo y en especial sobre el sensor de temperatura expuesto, se recomienda implementar en los procesos de calibración/verificación de temperatura 2 tipos de protección: uno enfocado a aislar térmicamente el sensor durante el proceso y otro en proteger de la radiación directa el equipo en general
		Calibración de temperatura bajo la influencia única de radiación solar directa EMPLEANDO aislante en el sensor expuesto.	Desviación con tendencia negativa (máx. error: -0,12°C). Exactitud del instrumento: ±0,4°C		
		Calibración de temperatura bajo sombra EMPLEANDO aislante en el sensor expuesto.	Errores de medición muy bajos (máx. error: 0,01°C) Exactitud del instrumento: ±0,4°C	Bajo (errores cercanos a cero)	
	Influencia de la fuente de suministro eléctrico empleada para el equipo generador de temperatura	Calibración de temperatura (condiciones ambientales estables) empleando energía regulada para alimentar el generador de temperatura.	Errores de medición muy bajos (máx. error: 0,01°C) Exactitud del instrumento: ±0,4°C	Bajo (errores cercanos a cero)	No existe influencia apreciable por efecto de la fuente de suministro eléctrico en los procesos de calibración/verificación
		Calibración de temperatura (condiciones amb. estables) empleando energía de planta eléctrica para alimentar el generador de temperatura.	Errores de medición muy bajos (máx. error: 0,01°C) Exactitud del instrumento: ±0,4°C		
	Variable Eléctrica (corriente)	Influencia de la radiación solar en los procesos de calibración/verificación	Calibración de variable eléctrica bajo la influencia única de radiación solar directa.	Errores de medición en el modo indicación superan el límite de clase del instrumento (máx. error: 0,0155 mA) Exactitud del instrum.: 0,005 mA	Alta (errores superan la clase del instrumento)
Calibración de variable eléctrica bajo sombra.			Errores de medición muy bajos (máx. error: 0,0002 mA) Exactitud del instrum.: 0,005 mA	Bajo (errores cercanos a cero)	
Influencia del tiempo de calentamiento de los equipos en los procesos de calibración/verificación		Calibración de variable eléctrica con tiempo de calentamiento INFERIOR A LA RECOMENDACIÓN del fabricante.	Errores de medición en el modo indicación superan el límite de clase del instrumento (máx. error: 0,0085 mA) Exactitud del instrum.: 0,005 mA	Alta (errores superan la clase del instrumento)	Siempre se deben seguir las recomendaciones del fabricante en relación al tiempo de calentamiento previo al uso del equipo
		Calibración de variable eléctrica con tiempo de calentamiento RECOMENDADO POR EL FABRICANTE.	Errores de medición muy bajos (máx. error: 0,0002 mA) Exactitud del instrum.: 0,005 mA	Bajo (errores cercanos a cero)	
Influencia del nivel de carga de las baterías en los procesos de calibración/verificación		Calibración de variable eléctrica con la carga completa de batería del equipo	Errores de medición muy bajos (máx. error: 0,0005 mA) Exactitud del instrum.: 0,005 mA	Bajo (errores muy bajos)	De acuerdo con los resultados, con un nivel de carga en las baterías a partir de aproximadamente el 20% no se presenta influencia alguna en los resultados de medición.
		Calibración de variable eléctrica con la carga del equipo entre 20 y 100 %	Errores de medición muy bajos (máx. error: 0,0005 mA) Exactitud del instrum.: 0,005 mA		

Tabla 4. Resumen de los resultados obtenidos.



Figura 10. Resultados de pruebas de recurso humano en calibraciones de presión a 1500 psi.

impacto que puede tener cada uno de los factores externos evaluados. Aparte de haber confirmado que el nivel de incertidumbre asociado a la calibración/verificación de elementos secundarios es el adecuado, de acuerdo con los límites de control establecidos corporativamente a partir de los requisitos legales para empresas de transporte de gas [8], los resultados de la validación también permitieron identificar e implementar mejoras sobre los procedimientos empleados en campo con el fin de atenuar el impacto de los factores, disminuir el nivel de incertidumbre y por consiguiente mantener bajo un mejor control metroológico cada uno de los procesos de calibración/verificación desarrollados in situ.

Aunque los resultados cuantitativos obtenidos para cada una de las pruebas corresponden al desempeño de una marca y referencia de equipo en particular, la tendencia evidenciada en el impacto de cada uno de los factores, así como las medidas de control implementadas para cada uno pueden hacerse extensivas a otras marcas y referencias de equipos.

Como parte del objetivo de implementar una estrategia de Confirmación Metroológica basada en el modelo del estándar internacional ISO 10012 [1] aplicable a las magnitudes presión, temperatura y variable eléctrica a nivel de instrumentación, se diseñó, construyó y validó un eslabón adicional en la cadena de trazabilidad empleada por TGI en sus procesos de calibración/verificación in situ. Dicho desarrollo corresponde al MVR Calibrator (Multi-Variable Reference Calibrator), el cual cuenta con el alcance, flexibilidad de operación y exactitud necesaria para fortalecer el programa de gestión metroológica de TGI.

El desarrollo del patrón de verificación, MVR Calibrator, no solo sirvió para implementar un eslabón más en la cadena de trazabilidad, sino que permitió el desarrollo y validación de las herramientas computacionales y procedimientos requeridos en la implementación de la confirmación metroológica a partir del estándar internacional ISO 10012 en la implementación.

Para finalizar se resalta el valor agregado asocia-

do al desarrollo tecnológico obtenido a partir de la suma de fortalezas existentes actualmente a nivel nacional. Más allá de la apropiación del conocimiento y la gestión del mismo, se aprecia que una solución proyectada para la implementación de la norma internacional ISO 10012 puede servir como herramienta de investigación, para la validación de métodos de calibración, la estimación de incertidumbre basada en datos reales (no en experiencia) y la calificación del personal responsable de la diseminación de la trazabilidad en las mediciones. La sinergia entre TGI y el CDT de GAS (industria / CDT) es clave para la apropiación del conocimiento y especialmente para su aplicación para la mejora productiva.

6. BIBLIOGRAFÍA

- [1] NTC ISO 10012 “Sistemas de Gestión de la Medición. Requisitos para los Procesos de Medición y los Equipos de Medición”, ICONTEC, 2003.
- [2] API MPMS Chapter 21, Sección 1”Flow Measurement Using Electronic Metering System - Electronic Gas Measurement”.
- [3] JCGM 100 “Evaluation of Measurement Data - Guide to the expression of Uncertainty in Measurement”, 2008
- [4] JCGM 200: “Vocabulario Internacional de Metrología - Conceptos Fundamentales y Generales y Términos Asociados (VIM)”, 3ra Edición, 2008.
- [5] Bicking C.A. “Some Uses of Statistics in the Planning of Experiments. Industrial Quality Control”, 1954
- [6] Informe de Ingeniería No. INFG - 10 - VAR - 032 - 1408 e INFG - 10 - VAR - 082 - 1408 “Confirmación metroológica basada en ISO 10012 para las mediciones de presión, temperatura y magnitudes eléctricas”, Convenio TGI S.A. ESP y CDT de GAS, 2010
- [7] Bolea Gonzales B. “ISO 10012 y UNE 66180: Marco Idóneo para la Gestión Metroológica de centros de Investigación”, 2009.
- [8] RUT