

Comparabilidad Internacional de las Mediciones Colombianas en Alto Flujo de Gas

Luis E. García¹ lgarcia@cdtdegas.com
Henry Abril B² habril@cdtdegas.com

Corporación CDT de GAS



Casos de ÉXITO

El secreto de permanecer siempre vigente, es comenzar a cada momento. *Agatha Christie, escritora británica.*

En Colombia, el Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e Innovación COLCIENCIAS, trabaja para fortalecer la competitividad de los sectores productivos y de servicios, a través de apoyo a programas estratégicos sectoriales y/o proyectos de investigación, desarrollo tecnológico e innovación (I+D+I), que impliquen el mejoramiento o desarrollo de nuevos productos, servicios, y procesos productivos u organizacionales. Esta sección destaca entidades que han desarrollado potencialidades en torno a los avances de la ciencia y tecnología, en unión con grupos de investigación de universidades, centros de desarrollo tecnológico o centros de desarrollo productivo.

Abstract:

In this article the experiences and results obtained in the development of the first "International Comparison in Volume Metrology and Gas Flow" (Comparación Internacional, en Metrología de Volumen y Flujo de Gas in Spanish) are described. The comparison was made between the laboratory of the Transportadora de Gas del Sur S.A. (TGS) from Argentina, the Fluids metrology center from the Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT) from the Sao Paulo state in Brazil and the Corporación Centro de Desarrollo Tecnológico de GAS (CDT de GAS) from Colombia, last one acting as coordinator and pilot laboratory. This exercise confirmed the traceability in the results emitted by the participating laboratories. This is a relieving for the clients who now have one more trustable element in the comparability of measurements provided and also for the awarding entities and each country government as a prove of the laboratories competences and metrological performances against a possible evaluation process of the Calibration and Measurement Capabilities declared.

¹ Líder de Investigación Tecnológica Corporación CDT de GAS

² Director Corporación CDT de GAS

1. INTRODUCCIÓN

El Gas Natural representa para Colombia y para diversos países Latinoamericanos un energético de vital importancia en el sector productivo, cuyo valor impacta directamente los costos operativos por cuanto no cabe duda respecto a la importancia de garantizar la trazabilidad de las mediciones de este energético, tanto en Transferencia de Custodia como a nivel de procesos, en aras de mantener, controlar e incluso optimizar su consumo. Para garantizar la trazabilidad y realizar mediciones con adecuados niveles de incertidumbre es necesario contar con procesos de medición normalizados, infraestructuras adecuadas y personal competente, que permita proveer trazabilidad al SI. En este sentido, los NMI's y los laboratorios que proveen servicios de metrología a la industria, juegan un papel clave, pues en estos recae la responsabilidad de diseminar las magnitudes del SI y propender por el reconocimiento de los Patrones Nacionales y las respectivas CMC [1].

Ya se trate del cumplimiento del requisito relativo a la Validación de Métodos dado en el Numeral 5.4.5 de la ISO/IEC 17025 [2] o como herramienta de confirmación para las CMC declaradas [3], la comparaciones constituyen uno de los procesos mejor reconocidos en la validación de los resultados emitidos por un Laboratorio, al facilitar la mejora continua y brindar confianza en los servicios de metrología. Más allá de las motivaciones (anteriormente descritas) de índole normativo para la realización de comparaciones, existen diversidad de razones para la ejecución de comparaciones interlaboratoriales, como las enunciadas por Ruiz et al [4], artículo editado en la edición N° 4 de la Revista M&F y del cual se recomienda su consulta.

Tomando en consideración la anterior argumentación, el CDT de GAS -con recursos provistos por el Estado colombiano a través de COLCIENCIAS³ lideró y desarrolló un programa de "Comparación Internacional, en Metrología de Volumen y Flujo de Gas", entre el laboratorio de la Transportadora de Gas del Sur S.A. (TGS) de Argentina, el Centro de Metrología de Fluidos del Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT) del Estado de Sao Paulo en Brasil y por supuesto la Corporación Centro de Desarrollo Tecnológico de GAS (CDT de GAS) de Colombia, actuando como laboratorio coordinador y piloto. Como todo proceso de comparación y a pesar de los esfuerzos realizados en su gestión y ejecución se presentaron inconvenientes de diversa índole, los cuales fueron superados y finalmente se logró culminar el programa según las características y con los resultados descritos a continuación.

³ Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e Innovación

2. ABREVIATURAS

| | |
|------------|---|
| BIPM | Bureau International des Poids et Mesures |
| CDT de GAS | Corporación Centro de Desarrollo Tecnológico |
| CMC | Calibration and Measurement Capabilities |
| DT | Dispositivo de Transferencia |
| EAL | European Cooperation For Accreditation Of Laboratories |
| INTI | Instituto Nacional de Tecnología Industrial (NMI de Argentina) |
| IPT | Instituto de Pesquisas Tecnológicas del Estado de Sao Paulo (CMF) |
| KCs | Comparaciones Clave entre NMIs avaladas por el BIPM |
| NMi | Netherlands Metrology Institute, Actualmente VSL |
| NMIs | Institutos Nacionales de Metrología |
| ONAC | Organismo Nacional de Acreditación de Colombia |
| PTB | Physikalisch-Technische Bundesanstalt |
| SI | Sistema Internacional de Unidades del francés "Le Système International d'Unités" |
| SIC | Superintendencia de Industria y Comercio (Colombia) |
| TGS | Transportadora del Gas del Sur S.A. |
| VSL | National Metrology Institute of the Netherlands |

3. COMPARACIÓN TGS-CDT-IPT

Tres laboratorios Acreditados y líderes en metrología de volumen y flujo de gas (Ver Tabla 1) en sus diferentes países, iniciaron en enero de 2010 el programa de comparación (Ver Logos en la Figura 1) siguiendo las directrices de los documentos "The Guidelines for CIPM key comparisons" [5] y "EAL-P7"[6], con el objeto de estimar el grado de equivalencia de sus mediciones, facilitar y asegurar los procesos de medición de gas natural, y apropiar conocimientos para continuar garantizando la trazabilidad al SI, en sus entornos de influencia, ampliando el marco de confianza en cada uno de los países participantes.



Figura 1. Logos de Identificación para la Comparación

| Descriptor | TGS | CMF-IPT | CDT de GAS |
|--------------------------------------|------------------------------------|---|--|
| País | ARGENTINA | BRASIL | COLOMBIA |
| Nombre legal | Transportadora de Gas del Sur S.A. | CMF – IPT Instituto de Pesquisas Tecnológicas | Corporación Centro de Desarrollo Tecnológico del Gas |
| Intervalo | 0,5 m³/h a 6500 m³/h | 0,6 m³/h a 5100 m³/h | 3 m³/h a 4800 m³/h |
| Incertidumbre Típica | 0,28 % (k=2) | 0,20 % (k=2) | 0,20 % (k=2) |
| Trazabilidad en Volumen | NMI Holanda | PTB Alemania | PTB Alemania |
| Trazabilidad en Magnitudes asociadas | INTI | INMETRO | SIC |
| Patrones de Trabajo | Rotativos | Turbinas | Rotativos y Turbinas |
| Acreditación ISO/IEC 17025 | INTI | INMETRO | ONAC |

Tabla 1. Descripción de los Laboratorios Participantes

4. CONSIDERACIONES TECNICAS DE LA COMPARACIÓN

4.1 Mensurando del programa de comparación

El mensurando objeto de la comparación correspondió al Error de Medida relativo (Ec. 1), obtenido por los laboratorio participantes al calibrar el DT sobre un conjunto de 10 caudales (Ver Tabla 2).

$$E_i(\%) = \frac{V_{DT} - V_{Lab@DT}}{V_{Lab@DT}} * 100 = \frac{Np_{DT} - V_{Lab@DT}}{Kf_{DT}} * 100$$

Ec. 1

Donde; $V_{Lab@DT}$ = Volumen indicado por el laboratorio participante, V_{DT} = Volumen registrado por el Dispositivo de Transferencia. Ambos referenciados a las mismas condiciones termodinámicas.

Particularmente en el CDT de GAS, se corrige el volumen indicado por los patrones, para llevarlo a las condiciones termodinámicas del DT, según la Ec. 2.

$$V_{Lab@DT} = \left[\frac{T_{DT} + 273,15}{P_a + P_{DT}} \right] * \left[\frac{100 * Np_{MMI}}{(\%E_{pi@Q} + 100) * Kf_{MMI}} \right] * \left[\frac{(P_a - P_{MMI})}{(T_{MMI} + 273,15)} \right]$$

Ec. 2

| Caudal No. | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|------|------|
| %Qmax | 10 | 15 | 20 | 25 | 30 | 40 | 55 | 70 | 85 | 100 |
| m³/h | 160 | 240 | 320 | 400 | 480 | 640 | 880 | 1120 | 1360 | 1600 |

Tabla 2. Caudales de la Comparación

Dónde:

$\%E_{pi@Q}$ [%] Error del Medidor Patrón correspondiente al caudal de operación, según certificado de calibración.

Np_{MMI} [Pulsos] Número de pulsos del medidor patrón

Kf_{MMI} [Pulsos/m³] K-Factor del medidor patrón

Np_{DT} [Pulsos] Número de pulsos del DT

Kf_{DT} [Pulsos/m³] K-Factor del DT

T_{MMI} [°C] Temperatura del fluido de Calibración en el medidor patrón

T_{DT} [°C] Temperatura del fluido de Calibración en el DT

P_{MMI} [mbar] Presión diferencial del fluido de calibración en el medidor patrón respecto a la presión atmosférica

P_{DT} [mbar] Presión diferencial del fluido de calibración en el DT respecto a la presión atmosférica

P_a [mbar] Presión atmosférica

4.2 Dispositivo de Transferencia

El dispositivo de transferencia utilizado (Ver Tabla 3) correspondió a una Turbina modelo TRZ03, designación G1000 del fabricante RMG de Alemania, patrón de medida que fue manufacturado bajo recomendaciones especiales, sin odómetro mecánico. Este modelo, debido a su alta calidad metrológica, posee aprobación del PTB de Alemania para uso en procesos de transferencia de



| | |
|---------------------------------|---------------|
| DN | 150 mm (6 in) |
| Qmin | 80 m³/h |
| Qt | 320 m³/h |
| Qmax | 1600 m³/h |
| Masa | 45 kg |
| Longitud entre Bridas | 450 mm |
| Conexión Bridada | ANSI 150 |
| $\Delta P@Air, Q_{max}, 1,1bar$ | 20,5 mbar |
| Max Vibración Mecánica | 1 mm/s |
| Temp. de Operación | -10°C a 50°C |
| Linealidad (0,1Qmax→Qmax) | <0,5 % |
| Repetibilidad (0,1Qmax→Qmax) | ≤ 0,025 % |

Tabla 3. Características del Dispositivo de Transferencia [8]

| Laboratorio | Tubería Aguas Arriba A | Acondicionador o rectificador B | Tubería Aguas Abajo C | Ubicación Termopozo D | Diámetro del Sensor RTD |
|-------------|------------------------|----------------------------------|-----------------------|-----------------------|-------------------------|
| TGS | 1524 mm | Rectificador 19 Tubos 1200 mm | 762 mm | 152 mm | 6,35 mm |
| IPT | 1580 mm | Acondicionador Mitsubishi 830 mm | 750 mm | 300 mm | 3,00 mm |
| CDT de GAS | 1676 mm | Acondicionador Mitsubishi 899 mm | 767 mm | 301 mm | 4,76 mm |

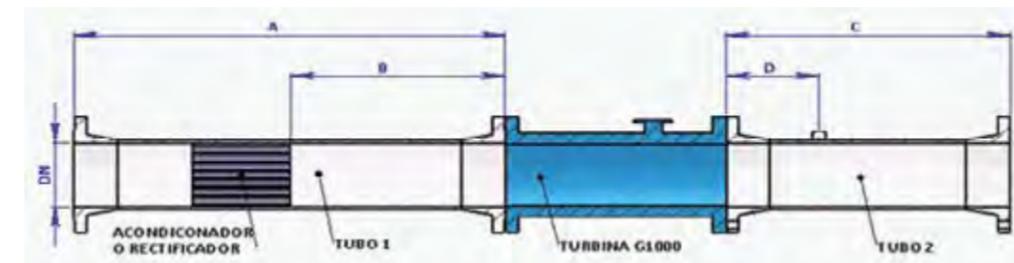


Tabla 4. Instalación del Dispositivo de Transferencia

custodia de Gas Natural (GN) y ha sido utilizado en otras comparaciones internacionales [7]. El patrón de medida tipo Turbina posee dos salidas de pulsos (de alta frecuencia), desfasadas 180° y un Kfactor de 3801,1 pulsos/m3 cada una.

4.3 Condiciones de Instalación

Para la calibración del DT los Laboratorios utilizaron la instalación descrita en la Tabla 5, la cual fue acordada previamente y sus características fueron descritas en el Protocolo Técnico del Programa de Comparación [9] con el objeto de generar perfiles de velocidad axisimétricos a la entrada del medidor.

5 CARACTERIZACIÓN DE DISPOSITIVO DE TRANSFERENCIA

La caracterización del DT reviste una de las fases más importantes de una comparación, por cuanto permite evaluar y confirmar el desempeño metrológico del medidor (%Error, repetibilidad, reproducibilidad, etc), así como definir las condiciones de operación y manipulación que permitirán reproducir el valor del mensurando.

Cabe anotar que aunque el DT seleccionado viene operando desde el año 2008 en el CDT de GAS, y su desempeño metrológico ha sido evaluado en el tiempo, confirmando la estabilización del Error de medida obtenido, se desarrollaron durante los 3 meses previos a la comparación, pruebas que permitieron obtener los resultados descritos en la Tabla 5, mediante las cuales se logró confirmar la aptitud del DT para ser utilizado en la comparación.

| Criterio Evaluado | Pruebas realizadas | Resultado |
|--|---|--|
| Asentamiento Mecánico por Rodaje | Operación continua durante 250 h entre 320 m ³ /h y 800 m ³ /h, con calibración previa, intermedia y final. | El DT indicó un error estable Reproducibilidad ⁴ ≤ 0,05% |
| Estabilidad del estado mecánico del DT | STT a 0,1Qmax (160 m ³ /h) y 0,2 Qmax (320 m ³ /h), bajo condiciones de repetibilidad y reproducibilidad. | El STT debe ser realizado a 320 m ³ /h, obteniendo un tiempo promedio de 323 s y una desviación máxima (entre 3 mediciones) de 5 s bajo condiciones de repetibilidad y de 10 s bajo condiciones de reproducibilidad. |
| Efecto de la Lubricación | Lubricación recomendada por el fabricante con posterior operación a 320 m ³ /h hasta obtener estabilización del STT ⁵ y la confirmación mediante calibración final. Operación posterior, durante 250 h, sin lubricación intermedia para emular un ciclo completo de comparación, calibración final de confirmación. | El DT requiere ser operado luego de su lubricación por 12 h para estabilizar la fricción fluida generada por el lubricante y reproducir el error dentro de 0,05%. Bajo condiciones normales, una lubricación es suficiente para mantener la reproducibilidad del error ≤ 0,05%, considerando un ciclo completo de comparación: CDT→TGS→CDT→IPT→CDT, razón por la cual no se hace necesario lubricar el medidor durante la comparación |
| Valor de referencia Inicial | Evaluación del Error para cada uno de los 10 caudales, como el promedio de 6 calibraciones realizadas en diferente día, utilizando 2 patrones del banco de alto caudal del CDT de GAS. | El DT indicó un excelente comportamiento metrológico con Repetibilidad ≤ 0,025% y Reproducibilidad ≤ 0,05%. Se obtuvo el valor de referencia inicial para cada caudal, respecto al cuál es posible evaluar la estabilidad del DT durante la comparación. |
| <p>Nota: Las calibraciones fueron realizadas cada vez, utilizando 2 medidores patrón del Banco de alto caudal del CDT de GAS, que poseen similares características metrológicas al DT. Reproducibilidad evaluada como la desviación máxima entre mediciones bajo condiciones de reproducibilidad. Repetibilidad evaluada como la desviación estándar de tres mediciones,</p> | | |

Tabla 5. Pruebas y Resultados de la caracterización del DT

6. RETOS Y COMPLEJIDADES DE LA COMPARACIÓN

Al iniciar la gestión para la presente comparación, el CDT de GAS era consciente de los retos y responsabilidades que esta implicaba, por lo cual se estudiaron en detalle los programas de comparación similares, registrados en la KCDB [10], para identificar los retos técnicos y logísticos afrontados por los laboratorios participantes y generar lineamientos que permitieran minimizar los riesgos y ejecutar con éxito la comparación. La Tabla 2 resume los principales retos y complejidades identificados para el contexto de la comparación.

⁴ Evaluada como la máxima desviación del error (sobre el intervalo de interés) entre calibraciones.

⁵ Por sus Siglas en Ingles Spin Time Test

7. CRONOGRAMA DESARROLLADO

El cronograma previsto para la comparación de acuerdo a la convención dada por "EAL-P7" [6] fue de tipo estrella, según el orden:

CDT de GAS → TGS → CDT de GAS → IPT → CDT de GAS.

Sin embargo, a pesar de los procedimientos y cuidados implementados en el Protocolo Técnico del Programa de Comparación [9] y la detallada coordinación entre laboratorios participantes, se presentaron inconvenientes tales como el maltrato del embalaje del DT, excesivas demoras por tramitología aduanera, e incluso exigencia de desarmar el DT, por parte de la autoridad Antinarcóticos en Colombia, so pena de inmovilizar el dispositivo.

| TECNICOS INTERNOS DE CADA LABORATORIO | TECNICOS DE INTEGRACION | LOGISTICOS Y TRANSPORTE |
|--|---|---|
| <ul style="list-style-type: none"> Control de las condiciones ambientales Aptitud para reproducir condiciones acorde con sus capacidades de medición Adecuado aseguramiento de las mediciones de magnitudes asociadas⁶ Detalle del Modelo matemático para la estimación del mensurando Mitigación de fenómenos de flujo, tales como asimetría, "swirl", resonancia, etc, durante la calibración" | <ul style="list-style-type: none"> Infraestructura adquirida o desarrollada de forma independiente. Diferente trazabilidad de la magnitud volumen y de las magnitudes asociadas Exigencias específicas de los organismos de acreditación Procedimientos técnicos y prácticas metrológicas particulares Tecnologías de medición diferentes. | <ul style="list-style-type: none"> Adecuado embalaje y transporte para un dispositivo de transferencia (DT⁷) con sensibilidad a las vibraciones y las temperaturas extremas Dificultad para monitorear la condición de transporte del DT por largos periodos de tiempo Desconocimiento en las autoridades de aduana acerca de los procesos de comparación La necesidad de resguardar la integridad del DT, mediante su mínima intervención |

Tabla 6. Retos y Complejidades identificadas para la Comparación



Figura 2. Cronograma de la comparación

El programa discurrió normalmente hasta octubre de 2010 cuando el DT retornó al CDT de GAS luego de su viaje a Argentina, aun cuando se presentó avería del embalaje, el cual fue reemplazado por TGS. En este punto de la comparación el DT presentaba un desempeño metrológico estable y reproducible de acuerdo con la caracterización realizada entre Febrero y Abril de 2010 por parte del CDT de GAS. Luego de esto, el DT fue enviado a Brasil, en cuya aduana permaneció por más de 2 meses bajo condiciones de bodega desconocidas, y en cuyo trayecto debió sufrir alguna alteración en su estado de lubricación o ajuste mecánico, lo cual generó una desviación no prevista en su desempeño metrológico. Por

⁶ Hacen referencia a todas aquellas magnitudes, diferentes a volumen o caudal, y que participan del modelo matemático que describe el mensurando acorde con la infraestructura de cada laboratorio. P. Ej: Presión, Temperatura, frecuencia o tiempo, etc.

⁷ Dispositivo de Transferencia (Turbina Patrón)

esta razón el Comité Técnico de la Comparación decidió continuar con el proceso, pero analizando los resultados en dos ciclos independientes para aislar el efecto de la desviación en el DT

Ciclo 1:

CDT de GAS → TGS → CDT de GAS

Ciclo 2:

IPT → CDT de GAS → TGS → CDT de GAS

Para lo cual fue necesario el reenvío del DT a TGS en Argentina por segunda vez. El cronograma finalmente ejecutado se presenta en la Figura 1, en la cual se observa el Ciclo 1 en color azul y el Ciclo 2 en color rojo. Como puede apreciarse el tiempo finalmente invertido en la Comparación fue de 22 meses.

8. VALORES DE REFERENCIA Y MODELOS DE EVALUACIÓN

Cada laboratorio estimó y declaró la incertidumbre de medición para los resultados de la calibración del dispositivo de transferencia, considerando los lineamientos dados por la guía GUM [11] y la norma ISO 5168 [12].

8.1 Valores de Referencia

El valor de referencia del error Y para cada caudal reportado por los laboratorios, se evaluó a partir de los Inversos de Aislamiento⁸, como lo cita COX en "The evaluation of key comparison data" [13] y su validez fue confirmada mediante una prueba de significancia estadística.

$$Y = \frac{\sum \frac{X_i}{u^2(X_i)}}{\sum \frac{1}{u^2(X_i)}} \quad \text{Ec. 3}$$

Donde:

Las incertidumbres utilizadas son todas con k = 1
 Xi= Error reportado por el laboratorio independiente i, al mismo valor de caudal.

u(x_i) = Incertidumbre estándar de cada laboratorio respecto del error Xi, considerando la estabilidad del DT.

Para la incertidumbre de cada laboratorio se consideró la estabilidad (reproducibilidad) del dispositivo de transferencia durante el ciclo de comparación u_{est} con k = 1.

$$u(X_i) = \sqrt{(u(R_i))^2 + (u_{est})^2} \quad \text{Ec. 4}$$

u(R_i)= Es la incertidumbre reportada por cada laboratorio con k = 1

El valor de la incertidumbre del ciclo de comparación U(y) se estimó mediante:

$$\frac{1}{u^2(y)} = \sum \frac{1}{u^2(X_i)} \rightarrow U(y) = 2 * u(y) \quad \text{Ec. 5}$$

8.2 Error normalizado

Para evaluar el grado de equivalencia respecto al valor convencional se calculó el Error normalizado, el cual puede ser estimado entre parejas de laboratorios participantes para obtener el grado de equivalencia entre laboratorios (GoD).

$$En_i = \frac{di}{2 * u(di)} = \frac{X_i - Y}{2 * \sqrt{abs[u^2(X_i) - u^2(Y)]}} \quad \text{Ec. 6}$$

Donde di corresponde a la desviación del Error reportado por el Laboratorio respecto del valor de referencia al caudal correspondiente.

8.3 Evaluación de resultados

Tanto el error normalizado (En) como los grados (GoD) de equivalencia entre parejas de Laboratorios son evaluados utilizando los siguientes criterios:

- En < 1 La comparación es aprobada █
- 1 < En < 1,2 La comparación es aprobada con reserva █
- En > 1,2 La comparación no es aprobada █

9. RESULTADOS PRIMER CICLO DE COMPARACIÓN

Debido a la extensión de los datos generados durante los ciclos de comparación, solo se presentan en forma gráfica los principales resultados y se tabulan en el presente artículo los grados de equivalencia entre laboratorios (GoD).

Las curvas de calibración obtenidas para el DT, durante el Ciclo 1, se observan en la Figura 3. En la misma se pueden apreciar las curvas color rojo, que corresponden al valor de referencia (VR_{COX}) obtenido para el Ciclo 1 de Comparación y sus bandas de incertidumbre (VR+ y VR-).

Debido a que en el Ciclo 1 solo participaron dos laboratorios (TGS y CDT de GAS), y que las incertidumbres reportadas son del mismo orden, el valor de referencia se ubicó en medio de los valores reportados por los laboratorios. Para visualizar con más claridad la desviación di de los dos laboratorios, se presenta en la Figura 4 un gráfico radial, cuyo centro corresponde al valor de referencia. En el gráfico se aprecia el excelente

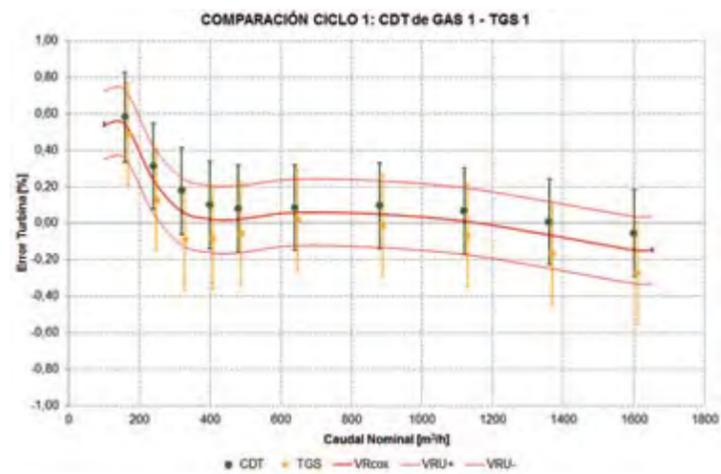


Figura 3. Resultados Comparación Ciclo 1

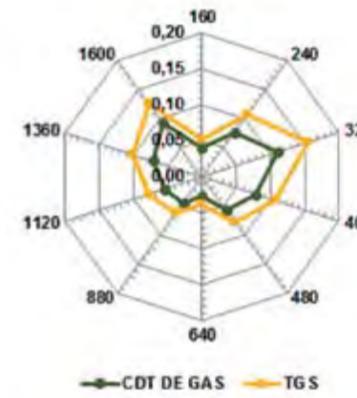


Figura 4. Desviación de los Laboratorios respecto al Valor de Referencia durante el Ciclo 1

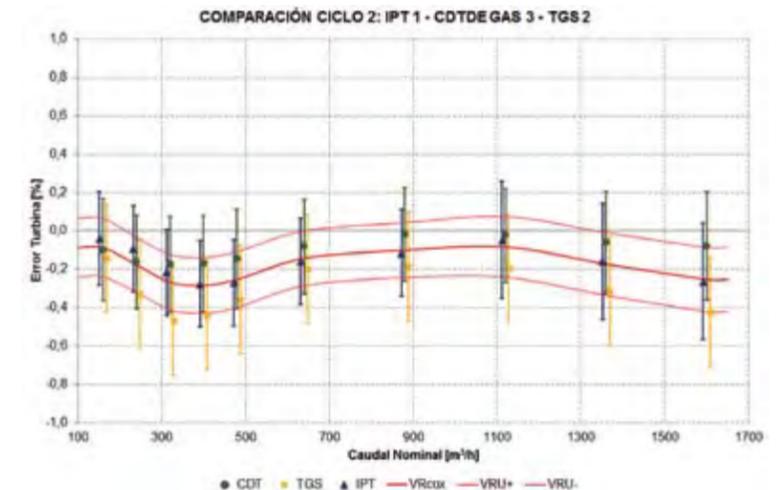


Figura 5. Resultados Comparación Ciclo 2

grado de concordancia entre los dos Laboratorios y el Valor de Referencia, presentando desviaciones inferiores a 0,15%, la cual es inferior a las incertidumbre promedio reportadas (0,24% k=2 del CDT de GAS) y 0,28% k=2 de TGS).

Finalmente para el ciclo 1, se presentan en la Tabla 7, los grados de Equivalencia entre los resultados emitidos por el CDT de GAS y los emitidos por TGS, siendo todos inferiores a uno (1), mediante lo cual se puede afirmar que los laboratorios aprobaron la comparación y que sus mediciones pueden considerarse equivalentes, según los criterios descritos en el numeral 8.3.

10. SEGUNDO CICLO DE COMPARACIÓN⁹

Para el segundo ciclo 2 de la comparación no se logró desarrollar un proceso bajo el esquema de estrella, puesto que se inició el ciclo con el IPT. Sin embargo, las incertidumbres de los laborato-

rios participantes fueron ajustadas, incorporando la estabilidad que presentó el DT entre las calibraciones CDT 3 y CDT 4 (Ver Figura 2). Los resultados de las curvas obtenidas por los tres Laboratorios se muestran en la Figura 5, en la cual se aprecia la misma tendencia en el error del DT respecto al caudal. En la misma figura se observan las curvas color rojo, que corresponden al valor de referencia (VR_{COX}) obtenido para el Ciclo 2 de Comparación y sus bandas de incertidumbre (VR+ y VR-). Respecto a la Figura cabe recordar que la desviación evidenciada entre laboratorios, especialmente entre el CDT de GAS y TGS, es parcialmente atribuible a la estabilización del Error en el DT, luego del deterioro que presentó en su desempeño metrológico, durante el viaje hacia Brasil y posterior bodegaje en la Aduana Brasileña. No obstante, es evidente una pequeña tendencia de desviación entre los dos Laboratorios a caudales cercanos a 320 m³/h y superiores a 1360 m³/h, la cual se apreció también, pero en menor grado, durante el Ciclo 1 de Comparación (Ver Figura 3).

| Ref. | Caudal Nominal | CDT DE GAS | | |
|------|----------------|------------|-----------|-------|
| | | di,j % | U(di,j) % | GoD % |
| TGS | 160 | 0,09 | 0,37 | 0,24 |
| | 240 | 0,18 | 0,37 | 0,50 |
| | 320 | 0,27 | 0,37 | 0,73 |
| | 400 | 0,18 | 0,37 | 0,50 |
| | 480 | 0,14 | 0,37 | 0,37 |
| | 640 | 0,07 | 0,36 | 0,18 |
| | 880 | 0,11 | 0,37 | 0,29 |
| | 1120 | 0,13 | 0,37 | 0,37 |
| | 1360 | 0,17 | 0,37 | 0,48 |
| | 1600 | 0,22 | 0,37 | 0,59 |

Tabla 7. Grados de Equivalencia entre laboratorios

⁹ Los resultados correspondiente a este Ciclo de la Comparación fueron presentados en el II CIMMEC - International Congress on Mechanical Metrology, Natal, Brazil, 2011 [15].

Para guardar homogeneidad con la presentación de resultados utilizada en el Ciclo 1, se observa en la Figura 6, un gráfico radial mediante el cual se presenta el valor absoluto de la desviación de los Laboratorios participantes respecto del Valor de referencia. En el Gráfico se evidencia el buen desempeño de los resultados del IPT, los cuales presentan desviaciones inferiores a 0,1% respecto del valor de referencia al caudal correspondiente. En términos generales todos los resultados emitidos por los Laboratorios participantes presentaron desviaciones di ≤ 0,2%, lo cual es ligeramente superior al 0,15% obtenido en el Ciclo 1 y cuya diferencia podría radicar en el desempeño del DT durante el Ciclo 2 como se enunció en el párrafo anterior.

Al evaluar los grados de Equivalencia entre los resultados emitidos por los Laboratorios partici-

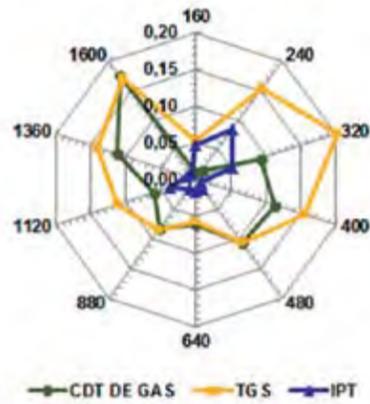


Figura 6. Desviación de los Laboratorios respecto al Valor de Referencia durante el Ciclo 2

| Ref. | Caudal Nominal | CDT DE GAS | | | IPT | | |
|------------|----------------|------------|-----------|-------|--------|-----------|-------|
| | | di,j % | U(di,j) % | GoD % | di,j % | U(di,j) % | GoD % |
| TGS | 160 | 0,04 | 0,38 | 0,11 | 0,10 | 0,38 | 0,26 |
| | 240 | 0,17 | 0,37 | 0,46 | 0,24 | 0,37 | 0,64 |
| | 320 | 0,29 | 0,37 | 0,79 | 0,25 | 0,37 | 0,68 |
| | 400 | 0,27 | 0,37 | 0,72 | 0,16 | 0,37 | 0,44 |
| | 480 | 0,21 | 0,38 | 0,56 | 0,09 | 0,38 | 0,24 |
| | 640 | 0,12 | 0,37 | 0,32 | 0,04 | 0,37 | 0,11 |
| | 880 | 0,17 | 0,37 | 0,45 | 0,07 | 0,37 | 0,19 |
| | 1120 | 0,17 | 0,37 | 0,47 | 0,15 | 0,37 | 0,41 |
| CDT DE GAS | 1360 | 0,25 | 0,38 | 0,66 | 0,15 | 0,38 | 0,40 |
| | 1600 | 0,34 | 0,39 | 0,87 | 0,16 | 0,39 | 0,41 |
| | 160 | | | | 0,06 | 0,35 | 0,17 |
| | 240 | | | | 0,07 | 0,32 | 0,21 |
| | 320 | | | | -0,04 | 0,33 | 0,12 |
| | 400 | | | | -0,11 | 0,33 | 0,32 |
| | 480 | | | | -0,12 | 0,33 | 0,37 |
| | 640 | | | | -0,08 | 0,32 | 0,24 |
| 880 | | | | -0,10 | 0,33 | 0,30 | |
| 1120 | | | | -0,02 | 0,38 | 0,06 | |
| 1360 | | | | -0,10 | 0,40 | 0,25 | |
| 1600 | | | | -0,18 | 0,41 | 0,45 | |

Tabla 8. Grados de Equivalencia entre laboratorios

pantes se obtuvieron los Datos tabulados en la Tabla 8, siendo todos inferiores a uno (1), mediante lo cual se puede afirmar que los laboratorios aprobaron la comparación y que sus mediciones pueden considerarse equivalentes (CDT de GAS ↔ TGS, CDT de GAS ↔ IPT y TGS ↔ IPT) según los criterios descritos en el numeral 8.3.

11. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Sin lugar a dudas los resultados y experiencias obtenidas con la ejecución del Programa de comparación, aquí descrito, son satisfactorios tanto a nivel técnico como a nivel institucional y profesional.

Los grados de equivalencia obtenidos entre los Laboratorios participantes son excelentes, consi-

¹⁰ Las líneas punteadas indican que los NMI's son trazables al SI mediante la reproducción de la magnitud de interés o la calibración provista por otro NMI.

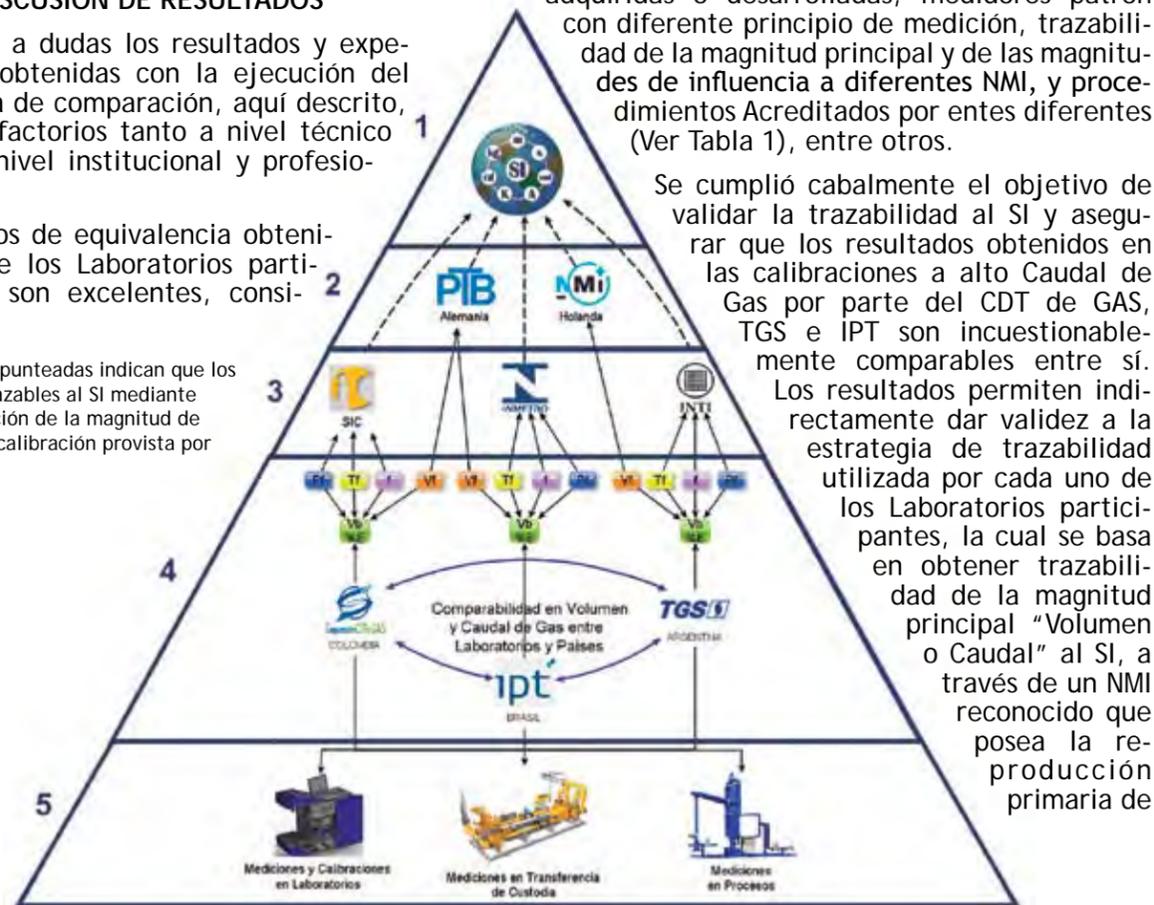


Figura 7. Cadena de Trazabilidad al SI y Comparabilidad de los Laboratorios participantes¹⁰

derando que en la reproducción de la magnitud Volumen o Caudal, los Laboratorios poseen marcadas diferencias, tales como Infraestructuras adquiridas o desarrolladas, medidores patrón con diferente principio de medición, trazabilidad de la magnitud principal y de las magnitudes de influencia a diferentes NMI, y procedimientos Acreditados por entes diferentes (Ver Tabla 1), entre otros.

Se cumplió cabalmente el objetivo de validar la trazabilidad al SI y asegurar que los resultados obtenidos en las calibraciones a alto Caudal de Gas por parte del CDT de GAS, TGS e IPT son incuestionablemente comparables entre sí.

Los resultados permiten indirectamente dar validez a la estrategia de trazabilidad utilizada por cada uno de los Laboratorios participantes, la cual se basa en obtener trazabilidad de la magnitud principal "Volumen o Caudal" al SI, a través de un NMI reconocido que posea la reproducción primaria de

la magnitud de interés, y obtener trazabilidad para las magnitudes de influencia, a través del propio NMI. De esta manera se confirma que este tipo de estrategia es adecuada para países como los Latinoamericanos, cuyo valor del mercado interno del energético (Gas Natural) no amerita la cuantiosa inversión en patrones primarios, y cuya implementación solo podría estar sustentada en una demostración de soberanía para el establecimiento, custodia y mejora del Patrón Primario para alto caudal de Gas.

En resumen y con base en los resultados arrojados por los dos ciclos de Comparación, la Corporación CDT de GAS puede hoy día, compartir a sus clientes de servicios de calibración, un elemento más de confianza en la comparabilidad de las mediciones provistas y para el ente Acreditador y el Gobierno la demostración de las competencias y el desempeño metrológico del Banco de Alto Caudal del CDT de GAS. En otras palabras se confirmó mediante el Programa de Comparación, la Trazabilidad y Comparabilidad de las mediciones hasta el nivel de los Laboratorios participantes, tal y como se observa en la Figura 7, la cual resume el objetivo alcanzado y expone por sí misma la estrategia de trazabilidad del CDT de Gas, TGS e IPT.

12. CONCLUSIONES

- Se confirmó la comparabilidad de las mediciones entre los Laboratorios participantes, entre los cuales se alcanzaron Grados de Equivalencia inferiores a uno (1), mediante lo cual se puede brindar un parte de tranquilidad a los usuarios de los servicios de metrología, a los cuales se provee trazabilidad en los respectivos países.
- El transporte y la logística juegan un papel clave y crítico para el desarrollo de los procesos de comparación. Particularmente la carencia de un "estatus especial" que permita minimizar los trámites aduanales y reducir el riesgo de los dispositivos de transferencia ante una inadecuada manipulación, hace necesario escoltar y resguardar los DT, el mayor tiempo posible.
- En lo sucesivo, es necesario ejecutar los procesos de comparación, con dos (2) dispositivos de transferencia que permitan continuar la ejecución del proceso, en caso de que uno de ellos presente un deterioro apreciable en su desempeño metrológico.
- Se confirmó la alta reproducibilidad que poseen los medidores tipo turbina y su aplicabilidad como patrones de referencia o transferencia en laboratorios secundarios de volumen o caudal de gas.

13. BIBLIOGRAFIA

- [1] BIPM/ILAC working group, «Calibration and Measurement Capability». BIPM, Oct-2007.
- [2] ISO/IEC, «ISO/IEC 17025 Requisitos generales para la competencia de los laboratorios de ensayo y de calibración». ISO, 2005.
- [3] Michael Kuhne, Stephen Patoray, Peter Unger, y Peter Steele, «JOINT BIPM, OIML, ILAC and ISO DECLARATION ON METROLOGICAL TRACEABILITY». BIPM - OIML - ILAC - ISO, 09-Nov-2011.
- [4] Jackson E. Ruiz S., Luis E. García S., y Henry Abril B., «Comparaciones Interlaboratorios en Medición De Alto Volumen y Flujo de Gas», MET&FLU CIENCIA - TECNOLOGÍA - INNOVACIÓN, vol. 4, págs. 60-69, Jun-2011.
- [5] International Committee For Weights and Measures - CIPM, «Guidelines for CIPM key comparisons». BIPM, 01-Mar-1999.
- [6] EAL Committee 2, «EAL-P7 Interlaboratory Comparisons». EAL, 01-Mar-1996.
- [7] B. Mickan et al., «Final report on the bilateral CIPM Key Comparison CCM.FF-K5.a.1 for natural gas at high pressure», Metrologia, vol. 44, no. 1, págs. 07006-07006, Ene. 2007.
- [8] RMG Messtechnik GmbH, «Turbine Meters TRZ 03 - TRZ 03-L - TRZ 03-K Operating Instructions». RMG, 2004.
- [9] CDT de GAS, «PROTOCOLO PRIMERA COMPARACION INTERNACIONAL - METROLOGIA DE VOLUMEN Y FLUJO DE GAS». CDT de GAS, Mar-2010.
- [10] «The BIPM key comparison database». [Online]. Available: http://kcdb.bipm.org/kcdb_statistics.asp. [Accessed: 10-Jun-2011].
- [11] JCGM/WG 1, «Evaluation of measurement data - Guide to the expression of uncertainty in measurement». BIPM, 2008.
- [12] ISO/TC 30, «ISO 5168 Measurement of fluid flow - Procedures for the evaluation of uncertainties». ISO, 2005.
- [13] M. Cox, «The evaluation of key comparison data», Metrologia, vol. 39, págs. 589, 2002.
- [14] M. G. Cox, «The evaluation of key comparison data: determining the largest consistent subset», Metrologia, vol. 44, págs. 187, 2007.
- [15] Helena C. Manosso, Rui G. T. de Almeida, Henry Abril B., Kazuto Kawakita, Luis E. García S., y Adrián Trujillo, «South American Program for Gas Flow Laboratory Comparison», presented at the II CIMMEC - International Congress on Mechanical Metrology, Natal, Brazil, 2011.
- [16] Collège français de métrologie., Metrology in industry: the key for quality, 1o ed. London, Newport Beach CA: ISTE, 2006.