

Recomendaciones para el Aseguramiento Metroológico de las Mediciones de Presión en Procesos de Transferencia de Custodia de Gas Natural

Luis Eduardo García S., Jorge Andrés Reyes V.

Corporación CDT de GAS
km 2 Vía Refugio, Sede UIS Guatiguara, Santander, Colombia.
lgarcia@cdtdegas.com

RESUMEN

En el presente trabajo se estima y analiza la incertidumbre, asociada a la desviación de los Sistemas de Medición de Presión –SMP- mediante el método de Montecarlo, considerando las tecnologías comunes, los procedimientos de calibración utilizados, y los efectos generadores de incertidumbre, que han sido identificados durante los procesos de calibración, realizados en campo por parte de la Corporación CDT de GAS de Colombia. Se analizan los resultados para estos escenarios y se generan conclusiones en torno a los instrumentos y procedimientos necesarios para dar trazabilidad y garantizar las mediciones de presión con un adecuado nivel de incertidumbre, en los procesos de transferencia de custodia en gasoductos.

1. INTRODUCCIÓN

En Colombia, las mediciones del gas natural transportado a través del sistema nacional de gasoductos, se realizan en base volumétrica, corrigiendo por efectos de presión, temperatura y compresibilidad, para llevar el volumen indicado por el medidor de flujo a condiciones estándar¹, de acuerdo con lo establecido por el Reglamento Único de Transporte – RUT [1], el cual, se constituye en la referencia reglamentaria aplicable, que establece en el numeral 5.5.1 Márgenes de Error en la medición, literal a): “El porcentaje de variación de cualquier equipo de medición de las variables del proceso de flujo de gas (presión estática y temperatura, celda diferencial, etc.) debe permanecer dentro del margen de error de más o menos el uno por ciento ($\pm 1\%$)”.

Como puede deducirse del párrafo anterior, la regulación aplicable, no se encuentra alineada con la terminología metroológica establecida en el VIM o el VIML, lo cual, dificulta su interpretación y aplicación en los procesos de medición. Debido a esta dificultad, los transportadores vienen interpretado, mediante acuerdo verbales, el “margen de error” como EMP² del instrumento. El EMP es evaluado mediante calibraciones periódicas en campo. Sin embargo y considerando que un error sistemático de 1 % en las mediciones de presión, puede representar un alto costo económico para alguna de las partes involucradas en el proceso de

transferencia de custodia del gas, los transportadores y remitentes (usuarios del sistema de transporte, productores, comercializadores, consumidores, etc.) han optado por disminuir el EMP requerido, ubicándolo en 0,25 % de la indicación o lectura suministrada por el instrumento, durante el proceso de calibración.

Esta disminución del EMP requerido, es beneficiosa, ya que, al mantener el instrumento dentro de un límite de control más estrecho, se reducen los errores sistemáticos, asociados a las magnitudes de influencia como la presión y por ende al volumen de gas medido; pero, existen limitantes en los procesos de calibración en campo, que impiden evaluar adecuadamente el EMP y su incertidumbre, dificultando la tarea de mantener la trazabilidad para estas mediciones.

El trabajo, se inicia con la descripción de los SMP, típicamente utilizados, se describen: el método, el procedimiento y los patrones de calibración, los modelos matemáticos y las fuentes de incertidumbre asociadas al mensurando de interés. Luego se listan los parámetros utilizados para las corridas de las simulaciones por el Método Montecarlo, se analizan los resultados, y se listan las conclusiones y recomendaciones pertinentes.

1.1. Abreviaturas

RUT: Reglamento Único de Transporte [1]

SMP: Sistema de medición de presión

EMP: Error Máximo Permissible

CL: Clase del instrumento

ET: Escala Total

GP: Presión manométrica - *Gauge pressure*

ALS: Alcance límite superior

AA: Alcance ajustado - *Span*

¹ Presión = 14,65 Psia (101.01 kPa) y Temperatura = 60 °F (288.7 K)

² NTC 2194 (VIM) 5.21 ERRORES MÁXIMOS PERMISIBLES (DE UN INSTRUMENTO DE MEDICIÓN) Valores extremos de un error permitido por las especificaciones, las regulaciones, etc. para un instrumento de medición dado.

ET_{amb}: Efecto temperatura ambiente
 I_{ins}: Indicación del SMP en psig o kPa
 I_p: Indicación del patrón en psig o kPa
 PDF: *Probability density function*

2. SISTEMAS PARA MEDICIÓN DE PRESIÓN

Para aclarar la relación existente entre la medición de presión y el volumen de gas a condiciones estándar, se presenta a continuación, la ecuación de corrección para medidores lineales de flujo, tales como las turbinas, ultrasónicos, rotativos, etc.;

$$V_{std} = V_f \left(\frac{P_f}{P_{std}} \right) \left(\frac{T_{std}}{T_f} \right) \left(\frac{Z_b}{Z_f} \right), \quad (1)$$

donde:

| Magnitud | Símbolo | Unidades |
|--|------------------|--------------------------------|
| Volumen a condiciones base | V _b | ft ³ m ³ |
| Volumen a condiciones de flujo | V _f | ft ³ m ³ |
| Presión estándar (Constante) | P _{std} | Psia kPa |
| Presión de flujo | P _f | Psia kPa |
| Temperatura estándar (Constante) | T _{std} | °R K |
| Temperatura de flujo | T _f | °R K |
| Compresibilidad a condiciones base | Z _b | A/D ³ |
| Compresibilidad a condiciones de flujo | Z _f | A/D |

En Colombia, existen diversas configuraciones utilizadas para medir la presión del gas natural en los puntos de transferencia de custodia, sin embargo, prevalecen dos (Figs. 1 y 2): los transductores de presión asociados a electrocorrectores y los transmisores de presión asociados a computadores de flujo.

La principal diferencia entre estos dos sistemas, radica en las características metroológicas, ya que los transductores poseen clases de exactitud más amplias que los transmisores, y para estos últimos es posible realizar calibraciones en lazo abierto, en laboratorio o bajo condiciones mas controladas que en campo.

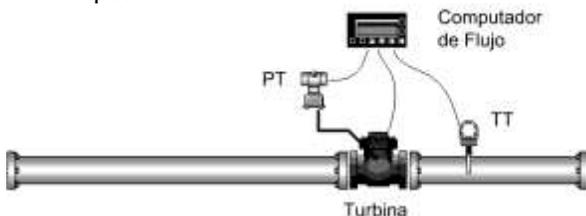


Fig. 1. Transmisor de presión asociado a computador de flujo.

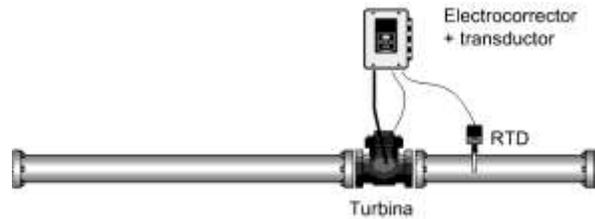


Fig. 2. Transductor de presión asociado a electrocorrector

2.1. Características Metroológicas de los SMP

Un SMP se halla constituido por el elemento sensor y el elemento indicador, que en conjunto poseen una clase y su respectivo EMP, dependiendo generalmente de la tecnología de los elementos (Capacitivos, Piezoeléctricos, etc.), señal de salida (0 VDC – 5 VDC, 4 mA – 20 mA, Modbus, Fielbus, etc.), y la electrónica de los conversores A/D o D/A.

Entre esta amplia variedad de SMP, se seleccionaron los más comunes, cuyas características se resumen en la Tabla 1.

Tabla 1. Características de los SMP.

| Tipo | CL | ALS | Resolución | Comunicación |
|----------------------------------|---------|---------------------|-----------------------|--------------|
| Transductor + Electrocorrector | 0,4% ET | 720 psi 4,96 MPa | 0,1 psi 0,68 kPa | 0 VDC-5 VDC |
| Transmisor + Computador de flujo | 0,1% ET | 800 psi 5,51 MPa | 0,01 psi 0,068 kPa | 4 mA-20 mA |

El nivel de presión generalmente es fijo, debido a que los sistemas de medición operan aguas abajo de un sistema de regulación de presión, que puede encontrarse ajustado a presiones comprendidas entre 60 psig (414 kPa) y 1 200 psig (8274 kPa) dependiendo de las condiciones contractuales.

2.2. Método, Procedimiento y Patrones de Calibración

Considerando la dependencia tecnológica de EEUU en la industria del petróleo y gas en Colombia, la normativa técnica aplicable al proceso de calibración de acuerdo con el RUT es la norma API 21.1 [4] . Esta norma no ha sido recientemente actualizada, por lo que se encuentra desalineada respecto al estado del arte metroológico en la magnitud presión, dificultando así, el aseguramiento de la trazabilidad.

Lo anterior, ha generado la adaptación de los procesos de calibración, mediante acuerdos contractuales, llegando a generalizarse las características (Ver Tabla 2) del proceso de calibración.

³ Adimensional

Tabla 2. Características del proceso de calibración.

| Método | Procedimiento | | | | | |
|---------------------|------------------|------|-------------------|-----------------|------------------|----------|
| | U _{Req} | Ptos | P _{Prev} | t _{pr} | t _{ALS} | ASC/DESC |
| Comparación directa | N/C | 6 | 1 | >30s | 300s | 2/1 |

En la Tabla 2, U_{Req} es la incertidumbre de calibración, la cual, no es considerada o estimada en el proceso; Ptos se refiere al número de puntos de calibración; P_{Prev} es el número de presurizaciones a ET previo a la calibración; t_{pr} es el tiempo de presurización y estabilización entre puntos de calibración; t_{ALS} es el tiempo de sostenimiento de la presión en el ALS; y ASC/DESC es el número de ciclos de presurización en ascenso y descenso.

Debido a que el procedimiento de calibración no considera la incertidumbre de medición (Ver Tabla 2), los resultados obtenidos del proceso, son incompletos, imposibilitando la evaluación del desempeño metrológico de los SMP y validación de los resultados.

Hasta hace poco, los patrones comúnmente utilizados para realizar calibraciones en campo eran los pesos muertos, pero debido a la facilidad de operación de los manómetros electrónicos; estos últimos, son actualmente los más populares, teniendo generalmente las características listadas a continuación.

Tabla 3. Patrones de Presión.

| ALS* | CL Patrón | ET _{amb} | Resolución | Estabilidad /Año |
|-----------------------|---------------|-------------------|-----------------------|------------------|
| 1000 psig 6895 kPa | 0,025 % ET | 0,003 %AA/°C | 0,01 psi 0,068 kPa | 0,025 % ET |

En la Tabla 3, ALS corresponde al alcance de medición del patrón utilizado en la calibración de los SMP listados en la Tabla 1, y ET_{amb} es el efecto de la temperatura ambiente

3. PROCESOS DE CALIBRACIÓN EN CAMPO

Los sistemas de transferencia de custodia de gas natural generalmente son diseñados sin considerar facilidades que permitan obtener mediciones confiables y con el adecuado nivel de incertidumbre, puesto que, solo se brinda relevancia a factores de índole operativo; muestra de ello es la ausencia de protección contra la intemperie, o fuentes de alimentación de baja gama (léase estabilidad de voltaje), etc. Lo cual puede no afectar la operación del sistema pero generan inestabilidades que

incrementan la incertidumbre de las mediciones provistas por los sistemas de medición. Otro factor relevante es la posición organizacional en la cual se enmarcan las labores metrológicas, pues generalmente estas, son responsabilidad de los departamentos de mantenimiento, los cuales por su perfil, no ejecutan las calibraciones con la rigurosidad metrológica necesaria.

Las calibraciones son entonces realizadas en campo abierto y a la intemperie utilizando montajes similares al mostrado en la Fig. 3. y de acuerdo con las características del proceso de calibración descrito en la Tabla 2.

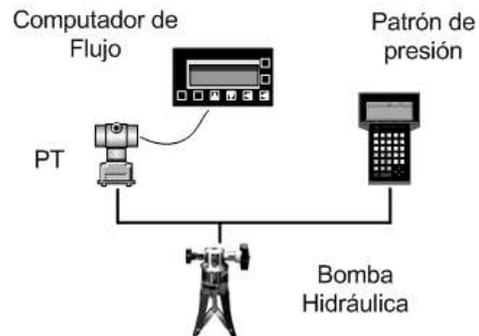


Fig. 3. Montaje utilizado en la calibración de SMP en campo.

3.1. Mensurando, Modelos Matemáticos y Fuentes de Incertidumbre

Las calibraciones son realizadas para evaluar el EMP a través de la estimación de la desviación del SMP, que se obtiene como:

$$Desv = I_{ins} - I_p \quad (2)$$

donde Desv es la desviación del SMP en psig o kPa, I_{ins} es la indicación del SMP en psig o kPa, I_p es la indicación del patrón en psig o kPa, corregida a partir del Certificado de Calibración.

Con base en el modelo matemático y la experiencia desarrollada durante las calibraciones en campo, se definieron las fuentes de incertidumbre y se asociaron las PDF mostradas en la Fig. 4.

Variabilidad: Inestabilidad de la indicación del SMP o el patrón debido a efectos tales como:

- Volumen y características del fluido utilizado como medio para transmitir la presión. Generalmente aceite, para calibraciones a presiones superiores de 500 psig (3 447 kPa),
- Compresibilidad y coeficiente de dilatación térmica del fluido.

- Deformación elástica o permanente de las líneas presurizadas.
- Hermeticidad y/o presencia de aire en las líneas presurizadas.
- Ajuste fino del sistema generador de presión.
- Estabilidad térmica del medio ambiente y los elementos utilizados durante la calibración.

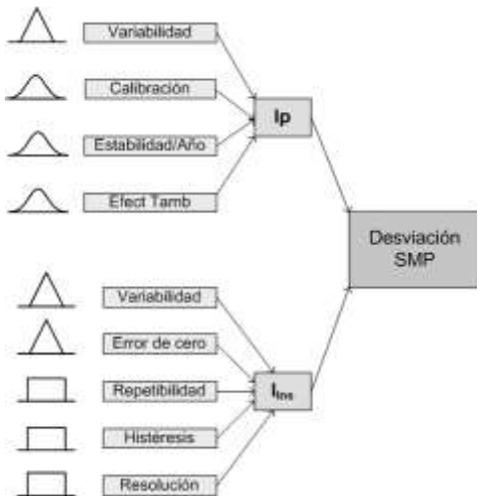


Fig. 4. Árbol de fuentes de incertidumbre.

Según datos experimentales de las calibraciones realizadas en campo, la inestabilidad en la indicación de presión es proporcional a la presión aplicada, y afecta al patrón y al SMP, pudiendo ser modelada con una distribución triangular cuyos parámetros se resumen en la Tabla 4.

Tabla 4. Parámetros de la distribución triangular asociada a la variabilidad en I_{ins} e I_p .

| | Min | Med | Max |
|---|----------------|----------------|----------------|
| % Lectura | 0,05 | 0,08 | 0,1 |
| P. Ej. representa: para 800 psig (5516 kPa) | 0,40 (2.76) | 0,64 (4.41) | 0,80 (5.51) |

Calibración: Incertidumbre de calibración del patrón, que típicamente corresponde, por lo menos, a la mitad de su clase [3] y puede ser estimada a partir de la siguiente ecuación:

$$U_p = 0,01\% \cdot ALS + 0,005\% \cdot Lectura \quad (k=2); \quad (3)$$

siendo aproximadamente 0,15 % a escala total con $k=2$.

La Ec. (3) no representa la estimación detallada de incertidumbre para el patrón, simplemente es una aproximación para las incertidumbre que típicamente se obtienen al calibrar patrones de clase 0,025 %.

Estabilidad/Año: Obtenida de las características del patrón y considerada como un efecto de deriva;

$$U_{Est/Año} = 0,025\% \cdot ALS \quad (k=3). \quad (4)$$

Efecto Temperatura Ambiente: Obtenida de las características del patrón, considerando que la calibración se realiza tan solo a 5°C de diferencia con respecto a la condición de calibración;

$$U_{ETamb} = 0,003\% \cdot ALS \cdot \Delta T \quad (k=3). \quad (5)$$

Error de cero: Estimado como el máximo valor absoluto de la diferencia obtenida de las indicaciones de cero entre ciclos de ascenso y descenso.

Repetibilidad: Estimada como la desviación de las indicaciones entre ciclos de ascenso y descenso para cada punto de calibración.

Histéresis: Estimada a partir de la siguiente ecuación [2] :

$$U_{Hist} = \frac{1}{2} \left(|P2_{Ins} - P1_{Ins}| + |P3_{Ins} - P2_{Ins}| \right). \quad (6)$$

Resolución: Obtenida de las características del instrumento y modelada con una distribución uniforme.

Otras Fuentes: Aunque existen otras fuentes de incertidumbre, tales como efectos de columna no corregidos, efecto de la alimentación eléctrica en el patrón o el SMP, posición de montaje, etc.; éstas se consideran despreciables debido a la facilidad de evitarlas o controlarlas y corregirlas

4. PROCESO DE SIMULACIÓN

Las simulaciones de MC, realizadas para estimar la incertidumbre de calibración asociada a la desviación del SMP, se ejecutaron de acuerdo con los lineamientos descritos en el suplemento 1 [5] de la GUM, tomando como parámetros un conjunto de datos típicamente obtenidos durante calibraciones en campo para los SMP, descritos en la Tabla 1.

Para cada simulación se ejecutaron 20 000 corridas utilizando macros de visual combinadas con funciones de Excel®.

Condiciones supuestas:

- Los instrumentos bajo calibración se encontraban operativamente en buen estado.
- El AA corresponde al ALS del instrumento
- El punto de operación nominal es de 350 psig (2413 kPa), debido a que operan en sistemas con regulación de presión aguas arriba.
- Se analizan 2 casos de calibración por cada uno de los SMP propuestos.

Tabla 5. Casos de calibración analizados.

| Tipo | Calibración 1 | Calibración 2 |
|---------------------------------|---|---|
| Transmisor+ Computador de flujo | Calibración típica con imposibilidad de ajustar exactamente el nivel de presión durante los ciclos de ASC y DESC, considerando esta limitación proporcional a la presión con un valor de $\pm 1,25$ psi a ET (± 8.62 kPa a ET) | Calibración propuesta con exacto ajuste del nivel de presión durante los ciclos de ASC y DESC |
| Transductor+ Electro-corrector | | |

Es claro que el método tradicional GUM, reviste una herramienta completa, si se trata de optimizar un proceso específico de medición, ya que provee la sensibilidad del mensurando frente a cada magnitud de influencia. Sin embargo, el presente trabajo se desarrolló utilizando el método de Montecarlo, como alternativa válida del método tradicional.

5. ANALISIS DE RESULTADOS

Con el objeto de facilitar el análisis de los resultados, se realizaron diagramas para las curvas de calibración (Desv vs I_{ns}), agregando los límites correspondientes al EMP y la clase del instrumento. Adicionalmente se graficó el punto nominal de 350 psig (2 413 kPa), a la cual opera el SMP, representándolo con una línea vertical. Esto permitió contrastar el desempeño del SMP con base en sus características metrologías y los resultados de calibración frente al EMP, establecido como requisito contractual de las mediciones.

5.1. Calibración 1:

Transmisor + Computador de Flujo

Los resultados mostrados en la Fig. 5 indican una incertidumbre del mismo orden que los límites de desviación especificados para la clase del SMP,

debido principalmente a la imposibilidad de ajustar la misma presión durante los ciclos de ascenso y descenso, y la inestabilidad en la indicación del patrón y el SMP, lo cual incrementa la incertidumbre por concepto de Histéresis y variabilidad. Esta incertidumbre impide evaluar adecuadamente el EMP y definir la conformidad frente al requisito contractual. De otra parte al cruzar el EMP y el Error a ET (Ver Fig. 5 - área sombreada de gris), se observa que el SMP opera en el límite inferior del alcance de medición sobre el cual puede suministrar mediciones confiables, pero es necesario reducir el nivel de incertidumbre, asociada a la desviación del SMP, para evaluar la conformidad del requisito.

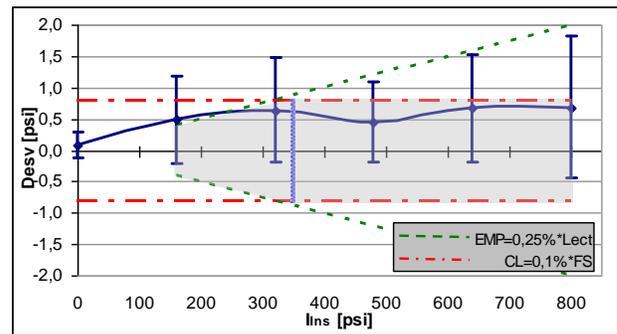


Fig. 5. Calibración 1 Transmisor + Computador de Flujo⁴.

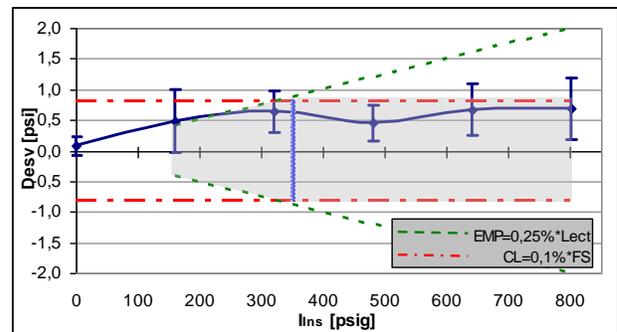


Fig. 6. Calibración 2 Transmisor + Computador de Flujo.

5.2. Calibración 2:

Transmisor + Computador de Flujo

Al realizar la calibración, ajustando exactamente el nivel de presión durante los ciclos de ascenso y descenso (ver Fig. 6), se logra reducir la incertidumbre expandida, asociada a la desviación de la indicación del SMP, hasta niveles cercanos a la mitad del límite especificado para la clase del SMP. En este nuevo caso se reduce la incertidumbre por concepto de histéresis y variabilidad. Sin embargo, se prevé que al mejorar

⁴ Equivalencia: 1 psi = 6,894757 kPa

el control de las condiciones que generan variabilidad en la indicación del patrón y el SMP, hasta obtener una variabilidad inferior a 0,02 % de la indicación del patrón (ver numeral 0), se reduciría la incertidumbre hasta valores cercanos a 1/3 del límite especificado para la clase del SMP. Esta sustancial mejora en la incertidumbre, permitiría disminuir el riesgo asociado a mediciones fuera de especificación, optimizar los periodos de calibración y dar mayor confianza y transparencia entre las partes involucradas en el proceso de transferencia de custodia.

5.3. Calibración 1:

Transductor + Electrocorrector

Para el caso del SMP constituido por un transductor asociado a un electrocorrector, se obtuvo de manera similar a la calibración 1 del transmisor, una incertidumbre del mismo orden que el límite especificado para el % Error a ET, sin embargo, en esta ocasión, la sensibilidad frente a las diversas fuentes de incertidumbre fue más equilibrada, debido a que, la clase del SMP analizado posee un menor desempeño metrológico, que para el caso del transmisor. En relación con la evaluación del EMP, se puede concluir que no es posible definir su conformidad frente al requisito contractual debido a la incertidumbre de calibración.

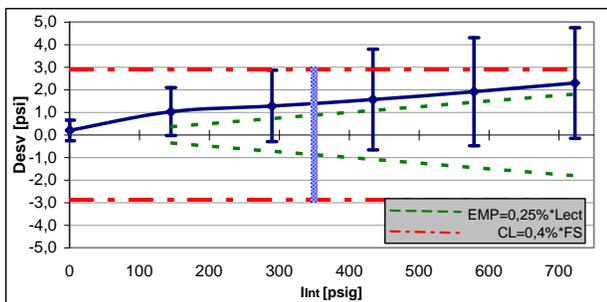


Fig. 7. Calibración 1 Transductor + Electrocorrector.

Este caso particular presenta una problemática generalizada, por cuanto el EMP exigido es inferior al límite especificado para la clase del SMP, siendo probable que las mediciones presenten desviaciones superiores a las especificadas contractualmente, a pesar de la practica de ajustar periódicamente (mensualmente) los SMP. Esta particularidad indica una inadecuada selección del SMP.

5.4. Calibración 2:

Transductor + Electrocorrector

Al realizar la calibración, ajustando exactamente el nivel de presión durante los ciclos de ascenso y

descenso (ver Fig. 8), se redujo la incertidumbre expandida asociada a la desviación de la indicación del SMP, hasta niveles cercanos a 1/3 del límite especificado para la clase del SMP, permitiendo evaluar con mayor claridad la conformidad respecto a los límites especificados para la clase del SMP. En este nuevo caso, la dificultad en el aseguramiento de las mediciones de presión no radica en lo complejo que pueda resultar, el obtener incertidumbres de calibración adecuadas, sino en el inapropiado desempeño metrológico del SMP, producto de una mala selección.

Se estima que al mejorar el control de las condiciones que generan variabilidad en la indicación del patrón y el SMP hasta obtener una variabilidad inferior a 0,02 % de la lectura indicada por el patrón (ver numeral 0), se reduciría la incertidumbre ubicándola en valores cercanos a 1/5 del límite especificado para la clase del SMP.

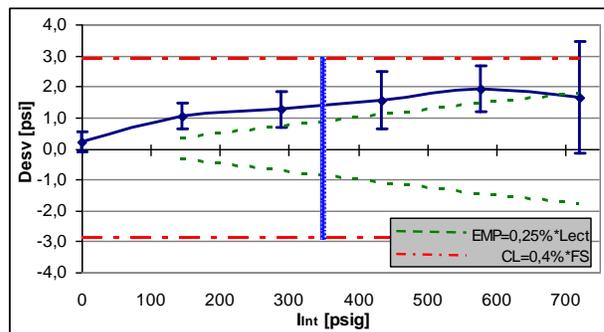


Fig. 8. Calibración 2 Transductor + Electrocorrector.

6. CONCLUSIONES

Las calibraciones de los SMP realizadas en campo, presentan limitaciones para la obtención de incertidumbres adecuadas debido a la inestabilidad en la generación de la presión de calibración, por los efectos expuestos en el numeral 0; haciéndose necesario, en cada caso, caracterizar el proceso de calibración, para identificar y controlar aquellas fuentes que generan los mayores incrementos de incertidumbre.

Las bombas hidráulicas utilizadas como generadores de presión, la rigidez y la hermeticidad de las conexiones, la estabilidad térmica del ambiente, la presencia de aire en la línea de calibración y la compresibilidad del liquido utilizado para transmitir la presión, impiden la generación exacta de las presiones de calibración entre los diferentes ciclos de ascenso y descenso, incrementando la incertidumbre de calibración.

La repetibilidad y la histéresis del SMP, las cuales son estimadas a partir de los valores indicados por el SMP y el patrón, pueden incrementarse y generar una alta incertidumbre, cuando se realiza la calibración bajo condiciones de inestabilidad y no es posible generar exactamente los niveles de presión entre los ciclos ascenso/descenso, de las calibraciones realizadas en campo, siendo este efecto más acentuado, para los SMP con mejor clase ($< 0,1 \% ET$).

La adecuada selección de la clase, alcance de medición y demás características metrológicas de los SMP y patrones utilizados para garantizar la trazabilidad de las mediciones, debe ser realizada con base en las especificaciones contractuales, previo análisis de la incertidumbre de medición esperada.

7. RECOMENDACIONES

Realizar las calibraciones en campo bajo las mejores condiciones de estabilidad posible, caracterizando y controlando en cada caso, aquellos efectos que contribuyen en mayor grado al incremento de la incertidumbre de calibración.

En SMP (transmisor + computador de flujo), para los cuales no sea posible controlar los efectos de inestabilidad, provenientes principalmente de factores ambientales, es recomendable, realizar la calibración en lazo abierto, calibrando el transmisor en un local con condiciones estables y generando al computador de flujo la señal eléctrica recibida desde el transmisor. Este proceso es necesario para SMP con clases mejores a $0,1\% ET$, ya que los límites especificados son muy estrechos y el nivel de incertidumbre adecuado sólo puede ser obtenido bajo condiciones de laboratorio. Sin embargo es necesario realizar un análisis previo de incertidumbre considerando la combinación de los resultados obtenidos en la calibración del transmisor y el computador de flujo.

Seleccionar los SMP con base en el EMP estipulado como requisito contractual y las limitaciones técnicas que impliquen garantizar la trazabilidad y el adecuado nivel de incertidumbre en las mediciones de presión.

Analizar los modelos matemáticos y procedimientos propuestos por normativas y recomendaciones generalmente aplicables a calibraciones en laboratorio, con el objeto de adaptarlos y validarlos para su uso en procesos de calibración de SMP en campo.

Considerar la incertidumbre de medición como parámetro clave para la especificación y evaluación de los EMP establecidos de manera contractual en los procesos de transferencia de custodia de gas natural en Colombia.

REFERENCIAS

- [1] Resolución No. 071 de 1999 “Reglamento Único de Transporte de Gas Natural”, CREG.
- [2] Guideline DKD-R 6-1 Calibration of Pressure Gauges, Edition 01/2003.
- [3] EURAMET/cg-17, Guidelines on the calibration of electromechanical manometers, v.01, 2007.
- [4] API 21.1 Chapter 21, Section 1-Electronic Gas Measurement, 1993.
- [5] ISO - GUM Supplement 1: Numerical methods for the propagation of distributions. 2004.