

ESTIMACION DE LA INCERTIDUMBRE DE CALIBRACION EN SISTEMAS DE MEDICION DE LLENADO Y DESCARGA PARA HIDROCARBUROS

Francisco Javier Aguilera Camacho, Noemi Cristina Hernandez
 Centro Nacional de Metrología
 km. 4.5 Carretera a los Cués, El Marqués, Querétaro
 (442) 2110500 extensión 3815, fax extensión 3776, faguiler@cenam.mx

Resumen: Se detalla el procedimiento de estimación de la incertidumbre asociada con el factor de calibración determinado durante la calibración en sitio de los sistemas de llenado o descarga de hidrocarburos refinados, al emplear un medidor de desplazamiento positivo como referencia. Se incluye la validación de los cálculos de incertidumbre mediante la simulación por Monte Carlo.

1. INTRODUCCIÓN

Dentro de las Terminales de Almacenamiento y Distribución de PEMEX Refinación, se cuentan con sistemas de llenado y descarga de hidrocarburos (tales como gasolinas, diesel y turbosina) para distribuir estos productos hacia otras terminales o bien hacia los puntos de venta al consumidor. Esta transferencia de custodia o venta de productos se hace a través de medidores tipo turbina instalados en posiciones de llenado en las terminales de embarque, y se descarga por medio de medidores del tipo desplazamiento positivo en las terminales de recibo.

La calibración de los medidores instalados en las terminales de embarque y recibo, se realiza utilizando un medidor de desplazamiento positivo como patrón (en lo sucesivo medidor maestro).

La calibración y la estimación de incertidumbre se realizan en base a las recomendaciones del Manual de Mediciones de Petróleo (MPMS) del American Petroleum Institute (API) [1], y se valida mediante el método de simulación por Monte Carlo [2].

2.1 Procedimiento de calibración

El medidor maestro (patrón de referencia) se conecta en serie aguas abajo del calibrando (ver figura 1), instrumentados ambos con sensores de temperatura y presión para la posterior corrección de los volúmenes [3]. La calibración se hace por comparación directa de volúmenes entre el patrón y el calibrando, a las mismas condiciones de temperatura y presión. La calibración se realiza en varios caudales dentro del alcance del calibrando, dependiendo de las condiciones específicas de instalación y operación de cada terminal. Se

realizan por lo menos 5 pruebas para cada valor de caudal.

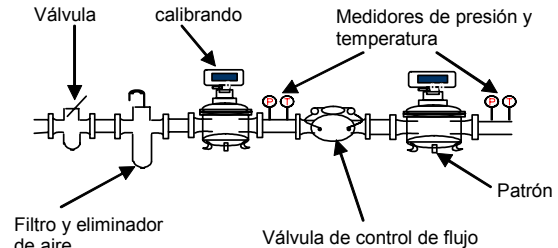


Fig.1 Instalación de una posición de llenado y/o descarga

2.2 Nomenclatura

FC	Factor de calibración, [adimensional]
V_p	Volumen en el patrón, [L]
V_m	Volumen en el medidor, [L]
L_f	Lectura final del patrón, [L]
L_i	Lectura inicial del patrón, [L]
L_m	Lectura en el medidor bajo calibración, [L]
F_{20}	Factor del patrón a 20 °C, [adimensional]
F_p	Factor de corrección del patrón, [adim.]
Q	Flujo de prueba, [L/min]
T_p	Temperatura en el patrón, [°C]
α	Coefficiente de expansión térmica del metal del patrón, [1/°C]
CPL	Factor de corrección por presión del líquido, [adimensional]
P_p	Presión en el patrón, [Pa]
P_m	Presión en el calibrando, [Pa]
κ	Factor de compresibilidad del líquido, [1/MPa]
CTL	Factor de corrección por temperatura del líquido, [adimensional]
T_m	Temperatura en el calibrando
β_{15}	Coefficiente de expansión térmica del líquido a 15 °C
$K0, K1$	Constantes características del fluido, según API 2540, [4]
ρ_{15}	Densidad del líquido a 15 °C, [kg/m³]

2.3 Modelo matemático

El cálculo del factor de calibración, se realiza en base a los volúmenes corregidos por presión y temperatura. Según la propuesta del Manual de Mediciones de Petróleo del API [2],

$$FC = \frac{(L_f - L_i) * F_p * CTL_p * CPL_p}{L_m * CTL_m * CPL_m} + C_{rep} + C_{der} \quad (1)$$

Los últimos dos términos de la ecuación anterior se agregan para considerar la contribución a la incertidumbre del factor de corrección debido a la repetibilidad del proceso de calibración y a la deriva que experimenta el patrón.

2.3.1 Factor de corrección del patrón

Los medidores maestros se calibran normalmente usando como referencia un patrón volumétrico de capacidad congruente con el caudal máximo del medidor. La calibración se lleva a cabo usando los diferentes fluidos con los cuales el medidor será empleado en forma posterior; de hecho, se generan curvas de calibración con cada uno de los diferentes hidrocarburos refinados.

Debido a lo extenso de un ejercicio de calibración de un medidor maestro, es usual que la temperatura del fluido experimente variaciones muchas veces del orden de 5 °C o mayores. Si el medidor maestro es después usado a temperaturas significativamente diferentes a la temperatura a la cual fue calibrado, entonces es indispensable aplicar un factor de corrección debido a los fenómenos de expansión o contracción que ocurren en la cámara de medición del medidor maestro. El coeficiente de expansión aplicado para este propósito fue corroborado experimentalmente sometiendo a diferentes medidores de desplazamiento positivo (de paletas deslizantes) a ejercicios de calibración a temperaturas significativamente diferentes en periodos de tiempo cortos, teniendo siempre como referencia un patrón volumétrico. El valor del coeficiente de expansión térmico resultó en 0,000 05 °C⁻¹, con una incertidumbre estándar de ± 0,000 01 °C⁻¹. Este coeficiente α es diferente para cada tipo de medidor, ya que depende directamente de los materiales de construcción.

Como en la mayoría de los medidores de caudal, el desempeño metrológico que exhiben los medidores maestros dista de ser lineal. Los resultados de

calibración se expresan normalmente mediante ecuaciones polinómicas de orden 2 o 3 (dependiendo del fluido y de las condiciones mecánicas del medidor). La ecuación 2 representa la forma genérica para conocer el factor de corrección del medidor maestro, en función del caudal y de la temperatura de operación.

$$F_p = AQ^3 + BQ^2 + CQ + D + 0,000\,05 * (T_p - 20) + C_{ac} + C_p \quad (2)$$

donde C_{ac} se incluye para propagar la incertidumbre debido a la calidad de la regresión lineal, mientras que C_p representa la contribución por la calibración del medidor maestro.

2.3.2 Factor de corrección CTL

Este factor se incluye para tomar en cuenta que pueden existir diferencias en la densidad del fluido en los puntos adyacentes al medidor bajo calibración y al medidor maestro, debido a las diferencias de temperatura entre ambos equipos de medición. De acuerdo con el MPMS de API, la relación de CTLs puede calcularse de la siguiente forma,

$$\left(\frac{CTL_p}{CTL_m} \right) = \frac{\exp(-\beta_{15}(T_p - 15)(1 + 0,8\beta_{15}(T_p - 15)))}{\exp(-\beta_{15}(T_m - 15)(1 + 0,8\beta_{15}(T_m - 15)))} \quad (3)$$

donde

$$\beta_{15} = \frac{K_0}{\rho_{15}^2} + \frac{K_1}{\rho_{15}} \quad (4)$$

K_0 y K_1 representan las constantes características del fluido; sus valores se encuentran publicados en el Capítulo 11 del MPMS de API [3] para diferentes hidrocarburos.

2.3.3 Factor de corrección CPL

De igual manera que se consideró para el factor de corrección por temperatura en el líquido CTL, también es necesario incluir en ocasiones un factor de corrección que tome en cuenta las diferencias de presión entre medidor bajo calibración y medidor maestro respectivamente. Este factor de corrección tiene la siguiente forma,

$$CPL_p = \frac{1}{1 - P_p * \kappa_{CP}}; \quad CPL_m = \frac{1}{1 - P_m * \kappa_{Cm}} \quad (5)$$

el factor de compresibilidad isotérmico κ , se calcula de acuerdo con la siguiente ecuación,

$$\kappa = 0,001 * \exp(-1,620 \cdot 8 + 2,159 \cdot 2 \cdot 10^{-4} * T + 0,870 \cdot 96 * \rho_{15}^{-2} + 4,209 \cdot 2 \cdot 10^{-3} * T * \rho_{15}^{-2}) \quad (6)$$

donde

T : temperatura del fluido a las condiciones de medición, [°C]

ρ_{15} : densidad del fluido a la temperatura de 15 °C, [kg/L]

La densidad del fluido de trabajo a las condiciones de referencia es normalmente medida por personal de Petróleos Mexicanos en laboratorios de medición instalados en cada una de las terminales de almacenamiento; aunque en ocasiones este valor puede ser suministrado por la refinería correspondiente.

3. RESULTADOS

Se presentan los resultados de calibración de un medidor tipo turbina instalado en una posición de llenado en una terminal de embarque y su presupuesto de Incertidumbre.

3.1. Resultados de la calibración

Q L/min	T °C	FC	$U(FC)$ k=2
1 157	18,9	0,999 5	0,1 %
940	19,3	0,999 0	0,1 %
510	19,5	0,994 3	0,1 %

Tabla 1 Resultados de la calibración de un medidor tipo turbina.

En la tabla anterior se muestran los valores límite de incertidumbre. Se incluye también la temperatura de calibración para que el usuario realice las correcciones por temperatura pertinentes cuando utilice el medidor en condiciones de temperatura significativamente diferentes a las que fue calibrado.

Es de notar en la tabla 1 que la diferencia relativa entre los factores de corrección FC para los caudales de 1 157 L/min y 510 L/min es del orden de 0,5%, lo cual refleja que la "linealidad" de este medidor en particular se encuentra en el límite. Aún

cuando los sistemas de adquisición y procesamiento de datos de los sistemas de medición de carga y/o descarga tienen la capacidad de interpolación, no es recomendable que los medidores exhiban faltas de linealidad como la que se muestra en la tabla 1. De hecho, como se verá en el cuadro de presupuesto de incertidumbre, también la repetibilidad del medidor es pobre, lo cual sugiere que este medidor en particular pronto tendrá que ser sometido a algún ejercicio de mantenimiento.

3.2. Presupuesto de Incertidumbre.

Se muestran en la figura 2 las variables de influencia para el cálculo de incertidumbre asociado con el factor de calibración. Las variables intermedias se muestran en un círculo con relleno sombreado.

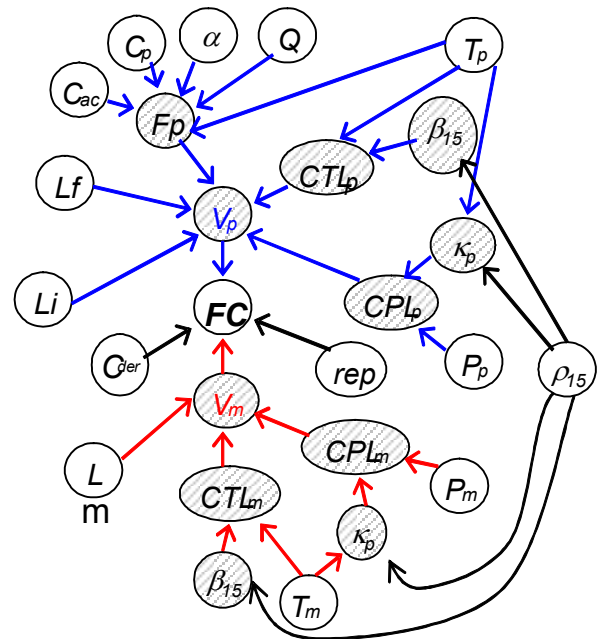


Fig. 2 Diagrama de árbol para la calibración de un medidor tipo turbina contra un medidor maestro del tipo de desplazamiento positivo.

En el cálculo de incertidumbre se considerará que todas las fuentes de incertidumbre son independientes; lo cual no necesariamente es cierto en todos los casos; de hecho, en cierta medida los sensores de temperatura y presión, tanto del medidor como del medidor maestro, pueden estar correlacionados en lo que se refiere a su calibración. Sin embargo, debido a que dichas contribuciones son muy pequeñas, comparadas con : a) la variabilidad del proceso de calibración o b) la

estabilidad a largo plazo de los sensores, se ha juzgado como despreciables las contribuciones por correlación.

VARIABLE	VALOR NUMERICO	UNIDAD	TIPO		$u(x_i)$	$\partial f / \partial x_i$	$[\partial f / \partial x_i]^2 u^2(x_i)$	CONTRIBUCION
L_f	9293.72	L	B	Rectangular	0,029	3,61 E-4	1.09 E-10	0,09 %
L_i	6526.65	L	B	Rectangular	0,029	- 3,61 E-4	1.09 E-10	0,09 %
L_m	2798.34	L	B	Rectangular	0,022	- 3,57 E-4	6.29 E-11	0,05 %
Q	1 157	L/min	B	Rectangular	14,4	1.69 E-7	5.95 E-12	0,01 %
α	5,0 E-5	°C ⁻¹	B	Rectangular	5,77 E-6	-9.49E-1	3.00 E-11	0,03 %
T_p	19.0	°C		Normal	0,01	- 1,17 E-3	4,53 E-11	0,04 %
T_m	18.9	°C		Normal	0,06	1,21 E-3	4.88 E-09	4,16 %
P_p	0,15	MPa		Normal	0,005	1,08 E-3	2,60 E-11	0,02 %
P_m	0,20	MPa		Normal	0,006	- 1,08 E-3	3.86 E-11	0,03 %
ρ_{15}	750	kg/m ³	B	Rectangular	1,08	1.94 E-5	4.41 E-10	0,38 %
Ajuste por regresión	0	*	A	Rectangular	3,40 E-6	1,00 E 0	1,16 E-11	0,01 %
Patrón	0	*	A	Normal	3,00 E-4	1,00 E 0	9,00 E-08	76,87 %
Repetibilidad	0	*	B	Normal	1,34 E-4	1,00 E 0	1,80 E-08	15,37 %
Deriva	0	*	A	Rectangular	5,77 E-5	1,00 E 0	3,33 E-09	2,84 %

100 %

FC

0,999 5

Incertidumbre expandida con k=2

0,000 684

Tabla 2. Presupuesto de incertidumbre para la calibración de un medidor tipo turbina contra un medidor maestro de desplazamiento positivo, empleando gasolina como fluido de trabajo.

3.3. Validación por el método de Montecarlo.

El presupuesto de incertidumbre mostrado en la tabla 2 se realizó siguiendo las directrices de la GUM [5]. La incertidumbre expandida se calcula usando un factor de cobertura $k=2$, el nivel de confianza asociado con la incertidumbre expandida es del orden de 95,4%. Para propósitos de validación del cálculo de incertidumbre se aplica el método de simulación por Monte Carlo con 10 000 réplicas. Los datos pseudo-aleatorios fueron generados desde el programa de cálculo Excel, a través de un complemento especialmente diseñado para extraer datos aleatorios de distribuciones de probabilidad comunes.

En la tabla 3 se ilustra la comparación entre los dos métodos de estimación de incertidumbre.

	x_i	$u(x_i)$	$y-U(x_i) < y < y+U(x_i)$ 95,45%
GUM	0,999 5	0,000 342	0,998 815-1,000 184
Monte Carlo	0,999 5	0,000 336	0,998 842-1,000 177

Tabla 3 Tabla comparativa de los resultados de estimación de incertidumbre obtenidos por medio del método GUM y la simulación por Monte Carlo

Los resultados de estimación de incertidumbre aplicando los dos métodos no muestran diferencias significativas. De hecho, si se calculan los grados efectivos de libertad a los datos mostrados en la tabla 2 y con este número se calcula el factor *t-student* para un nivel de confianza de 95,45%, se obtiene un valor $t_{54,95,45} = 2.04$, que multiplicado por la incertidumbre estándar $u(FC) = 0,000 342$ produce

un valor de incertidumbre expandida $U(FC) = 0,00070$; valor muy cercano al obtenido por el método de Monte Carlo (0,000 67).

4. DISCUSIÓN

Los certificados de calibración emitidos por el Centro Nacional de Metrología establecen un valor de incertidumbre de 0,1% como valor límite. Del presupuesto de incertidumbre mostrado en la tabla 2 se aprecia que las principales contribuciones proceden de: 1) la calibración del patrón, 2) la repetibilidad del proceso de calibración y 3) la temperatura del medidor; de estas tres fuentes de incertidumbre, la repetibilidad es la fuente que mas puede amenazar el valor objetivo de 0,1%.

Por esta razón, los metrologos mantienen siempre la atención sobre este parámetro; de hecho, cuando la desviación estándar de la media del factor de corrección **FC** es mayor que 0,015% entonces los responsables del sistema de medición son inmediatamente notificados, con el propósito de investigar sobre las causas que dieron origen a dicha variabilidad, deteniéndose momentáneamente el trabajo de calibración, hasta resolver el problema en forma satisfactoria.

En ocasiones, la ecuación 1 puede ser simplificada eliminando los factores de corrección **CTL** y **CPL** para ambos instrumentos (patrón y medidor bajo calibración) sin amenazar el valor de incertidumbre límite igual a 0,1%. Si las diferencias de temperatura entre patrón y medidor son menores que 0,15 °C; y si del mismo modo, las diferencias entre los valores de presión son menores que 0,15 MPa entonces sin inconvenientes se puede usar el modelo 1 simplificado, con la seguridad de que la incertidumbre expandida será menor que 0.1%.

5. CONCLUSIONES

- La principal fuente de incertidumbre en la calibración de un medidor tipo turbina procede de la calibración del patrón (75% del total).
- La repetibilidad del proceso aporta 15% a la incertidumbre total. Esto significa que la calidad de las turbinas, como del sistema de control es adecuado para cumplir con los requisitos de exactitud en la transferencia de custodia de los hidrocarburos.

- El cálculo de incertidumbre según la propuesta de la GUM produce resultados equivalentes a los obtenidos por medio del método de simulación por Monte Carlo. Dicha comparación entre diferentes métodos de cálculo se considera como herramienta de validación del método de cálculo.

REFERENCIAS

- [1] API MPMS Chapter 4.5 "Master Meter Provers", Manual of Petroleum Measurement Standards". American Petroleum Institute, May 2000.
- [2] API MPMS Chapter 12.2 Part 3, "Calculation of Petroleum Quantities using Dynamic Measurement Methods and Volumetric Correction Factors", American Petroleum Institute, April 1999.
- [3] API MPMS Chapter 11, "Physical Properties Data", American Petroleum Institute.
- [4] CENAM, "Procedimiento de calibración, 714-AC-P.309", División Flujo y Volumen
- [5] ISO/BIPM, *Guide to the Expression of uncertainty in Measurements*, 1995.