Tecnología

*Todas las teorías son legítimas y ninguna tiene importancia. Lo que importa es lo que se hace con ellas.* ***Jorge Luis Borges (1899-1986) Escritor argentino***

Conjunto de teorías y de técnicas que permiten el aprovechamiento práctico del conocimiento científico, orientados a producir bienes y servicios de utilidad económica, social, y política.

En esta sección, cada semestre, expertos nacionales y/o extranjeros, ofrecerán artículos técnicos que buscan sensibilizar a nuestros lectores, acercándolos con conocimiento, a la aplicación de la metrología en las diferentes actividades de nuestra sociedad.

# Validación del uso de los Medidores de Flujo Másico Tipo Coriolis como Patrones de Referencia en Aplicaciones de Transferencia de Custodia.

Dario A. Loza Guerrero *(aloza@cenam.mx)*
Emmanuel Ríos Carrizalez *(erios@cenam.mx)*

Centro Nacional de Metrología CENAM
Municipio del Marqués, Querétaro, México

6ª Jornada Internacional de Medición de Fluidos (Bogotá - Colombia)
28 Junio al 1º Julio 2011

***Resumen***

***En este trabajo se presentan los resultados y la incertidumbre asociada a los mismos del proceso de confirmación metrológica efectuada a los medidores de flujo másico tipo coriolis (CMF) empleados como patrones de referencia en la calibración de medidores de flujo en aplicaciones de transferencia de custodia en sitio.***

***Los medidores fueron evaluados inicialmente con el Patrón Nacional para Flujo de Líquidos, establecido en México, por el método gravimétrico con agua como fluido de trabajo. Se efectuó la validación de su comportamiento metrológico en sitio empleando un probador bidireccional y productos derivados del petróleo como fluido de trabajo. Las características determinadas fueron: el error, el factor del medidor (MF) y el K-factor a diferentes flujos másicos. Los resultados obtenidos se compararon y se puede concluir que son equivalentes.***







## 1. INTRODUCCIÓN

Los múltiples procesos de transferencia de custodia en la industria del petróleo, demandan del uso de sistemas de medición de caudal con características metrológicas especiales para cumplir con los cada vez más exigentes requisitos establecidos en las normas de referencia y/o en los contratos de compra venta correspondientes.

En el balance energético nacional, los hidrocarburos continúan siendo la principal fuente de energía producida en el país, con una aportación el 90.5%[1]. En 2009 la producción de energía primaria totalizó 9,852.9 petajoules (PJ)[2] .

La energía producida a partir de fuentes renovables representó 6.2%, la energía nuclear aportó 1.1% y el carbón mineral 2.2%.

México continuó siendo un exportador neto de energía primaria, al exportar 2,868.7 PJ en 2009. Prácticamente el total (99.9%) correspondió a las exportaciones de petróleo crudo.

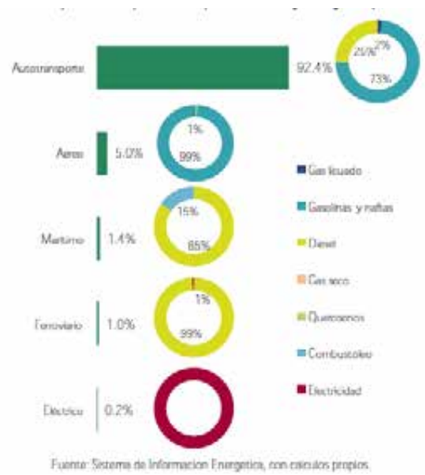



***Figura 1****. Consumo de energía del sector transporte 2009 (estructura porcentual por subsector y energético).*

[1] *Balance Nacional de Energía 2009 - Publicación de la Secretaria de Energía - México.*

[2] *El Balance Nacional de Energía utiliza el joule (J) como unidad común. De acuerdo con la Ley Federal sobre Metrología y Normalización, el Sistema General de Unidades de Medida es el único instrumento legal de uso obligatorio en los Estados Unidos Mexicanos, donde se determina que la cantidad de calor y de energía debe medirse en joule. 1 PJ corresponde a 947.08 barriles de petróleo crudo equivalentes*

La oferta interna bruta de energía fue equivalente a 8,246.96 PJ. En tanto, las importaciones totales representaron 20.1% de la oferta. Por su parte, 35.0% de la producción nacional fue enviada al exterior.

A partir del petróleo crudo se obtiene toda una gama de productos derivados que dan origen a diferentes mercados. Los productos petrolíferos más importantes son el gas licuado, las gasolinas, el diáfano, la turbosina, el diesel, el combustóleo, las grasas, los lubricantes y el asfalto. Además, la industria petroquímica produce multitud de productos.

La necesidad de regular la comercialización del petróleo crudo y sus derivados de acuerdo a las normas internacionales tiene el propósito de asegurar la equidad en el intercambio de productos y la equidad entre vendedores y compradores.

### 1.2 Marco normativo actual

La ISO/IEC 17025 – Requisitos generales para la competencia de los laboratorios de ensayo y de calibración, establece en el punto 5.4.5 Validación de métodos lo siguiente:

5.4.5.1 La validación es la confirmación, a través del examen y el aporte de evidencias objetivas, de que se cumplen los requisitos particulares para un uso específico previsto.
5.4.5.2 El Laboratorio debe validar los métodos no normalizados.
5.4.5.3 La gama y la exactitud de los valores que se obtienen empleando métodos validados deben responder a las necesidades de los clientes.

*Validación de métodos - Confirmación por examen y la provisión de evidencia objetiva de que se cumplen los requisitos particulares para un uso específico propuesto*

La validación de métodos es requerida cuando los métodos no han sido aceptados cabalmente por la comunidad de expertos o se pretende modificar un método aceptado en alguno de sus aspectos.

Proceso de validación:

- Identificar el método sujeto a validación y el uso específico propuesto.
- Decidir el método de validación
- Realizar los estudios, pruebas, etc., para la validación

- Registrar los resultados de tales actividades.
- Declarar si el método cumple los requisitos para el uso específico o no.

Técnicas (puede aplicarse una combinación de ellas):

1. Calibración con patrones (o materiales) de referencia
2. Comparación con resultados de otros métodos
3. Comparaciones entre laboratorios
4. Evaluación sistemática de magnitudes de influencia
5. Evaluación de la incertidumbre con base en conocimiento científico

En ese sentido, la recomendaciones del API MPMS - Capítulo 4 no contempla el uso de medidores de flujo másico como patrones de referencia, sin embargo, el API MPMS capítulo 5 sección 6 describe el método para utilizarlos como medidores de referencia.

Las técnicas de calibración en sitio nos permiten calibrar los sistemas de medición bajo las condiciones de instalación y operación de los sistemas empleando patrones de referencia.

- *Medidas volumétricas*
- *Probadores de desplazamiento positivo*
- *Medidores de desplazamiento positivo*

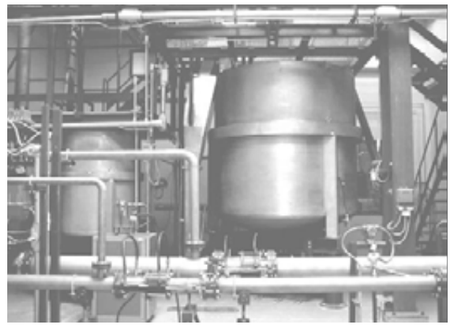
En México, se ha extendido el uso de los medidores de flujo másico tipo coriolis por los laboratorios secundarios acreditados, como patrones de referencia, en aplicaciones de transferencia de custodia en la industria del petróleo para calibrar medidores de flujo másico tipo coriolis, medidores de flujo tipo turbina y medidores ultrasónicos. Esto planteó en el momento la necesidad de validar el uso de los medidores de flujo másico tipo coriolis.

El objetivo de este proyecto es determinar los errores sistemáticos a través de la comparación entre un probador compacto de desplazamiento positivo –método volumétrico- y el Patrón Nacional de Flujo de Líquidos –método gravimétrico-, sistemas de medición de flujo metrológicamente independientes mantenidos en la División de Flujo y Volumen del CENAM y un patrón de flujo másico tipo coriolis, como patrón de transferencia se empleó un medidor de flujo tipo turbina.

Las conclusiones de este trabajo, versan sobre las diferencias encontradas en el comportamiento del medidor de flujo tipo turbina que fue calibrado simultáneamente por los tres sistemas de medición descritos arriba. También, se observa el comportamiento de un medidor de flujo másico, configurado en masa, calibrado con agua por el método gravimétrico en el laboratorio y el calibrado del mismo medidor de flujo por el método volumétrico con un probador bidireccional en sitio empleando como productos de trabajo y diesel.

## 2. PATRONES DE REFERENCIA

**El Patrón Nacional para Flujo de Líquidos** se fundamenta en el pesado estático de la masa colectada de líquido, la cantidad de líquido colectada por unidad de tiempo es determinada gravimétricamente para obtener el flujo másico ***(qm)***. El flujo volumétrico ***(qv)*** que pasa a través de un área de sección transversal en un intervalo de tiempo definido se determina mediante la densidad del líquido.



La ***Figura 2***. *Observe al fondo los sistemas para pesar del patrón nacional para flujo de líquidos.*

masa corregida de agua colectada en los tanques esta dada por:

$$m_c = m_i \, f_{cm} \, C_{Div} \frac{1 - \frac{\rho_a}{\rho_p}}{1 - \frac{\rho_a}{\rho}} \quad \text{(kg)} \qquad \textbf{(1)}$$

El volumen determinado a condiciones de temperatura y presión de la línea de prueba es:

$$V_m = \frac{m_C}{\rho_L \, C_{PL}} \quad \text{(L)} \qquad \textbf{(2)}$$

Donde:

$m_c$ Es la masa de agua corregida colectada en el sistema (kg)
$m_i$ Masa indicada (kg)
$f_{mc}$ Factor de corrección de la masa (adimensional)
$C_{Div}$ Factor de corrección de la masa debido a errores de la válvula desviadora de flujo
$\rho_a$ Densidad del aire (kg/m$^3$)
$\rho_P$ Densidad de las pesas utilizadas en la caracterización de los sistemas de pesado (kg/m$^3$)
$\rho$ Densidad del agua (kg/m$^3$)
$V_m$ Volumen a las condiciones del medidor bajo prueba (m$^3$)
$\rho_L$ Densidad del agua en la línea (kg/m$^3$)
$C_{PL}$ Factor de corrección por compresibilidad del líquido en la línea. (adimensional)

El factor de compresibilidad CPL[4] esta dado por:

$$C_{PL} = \left[ 1 + \begin{pmatrix} 50.74 \cdot 10^{-11} \\ -0.326 \cdot 10^{-11} \cdot T_L \\ +0.00416 \cdot 10^{-11} \cdot T_L^2 \end{pmatrix} (P_L - 81500) \right] \quad \text{(adimensional)} \qquad \textbf{(3)}$$

Donde $T_L$ es la temperatura de la línea (°C) y $P_L$ es la presión absoluta de la línea (Pa). La presión atmosférica en el Laboratorio de Flujo en el CENAM es de 81 500 Pa

El factor K esta dado por:

$$Kv = \frac{N}{V_m} \quad \text{(pulsos/L)} \qquad \textbf{(4)}$$

Donde *N* es el número de pulsos del medidor bajo prueba totalizados durante el tiempo de colección de agua en los sistemas para pesar.

El patrón Nacional para Flujo de Líquidos mantiene trazabilidad[3] hacia los patrones nacionales de las magnitudes de masa, tiempo y temperatura y hacia los patrones nacionales en las magnitudes derivadas de densidad, de presión y de humedad mantenidos por el CENAM.

[3] ***Trazabilidad:*** *Parámetro no-negativo que caracteriza la dispersión de los valores atribuidos a un mensurando, a partir de la información que se utiliza.*

**El probador compacto de desplazamiento positivo tipo pistón** está constituido principalmente por el cilindro del probador, la válvula "popet" y los detectores de posición ópticos.

Inicialmente, antes de iniciar su operación, el probador compacto está en estado de reposo con la válvula "popet", montada sobre el pistón, mantenida abierta hidráulicamente permitiendo que el fluido pase libremente a través del arreglo pistón cilindro. Cuando se inicia una corrida, la válvula "popet" es cerrada neumáticamente, y el fluido empuja el pistón aguas abajo a través del cilindro.

Durante esta acción, una bandera instalada en el vástago del pistón pasa a través de los detectores ópticos que definen el volumen certificado del probador.

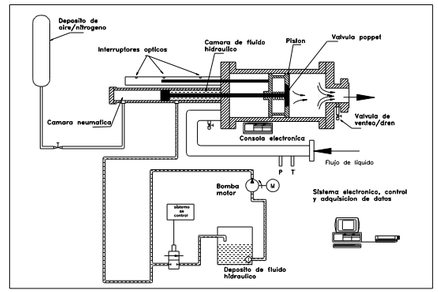



***Figura 3***. *Diagrama esquemático del probador compacto de desplazamiento positivo tipo pistón.*

Los pulsos que provienen del medidor bajo prueba son totalizados por un contador de pulsos en el lapso de tiempo requerido para que la bandera alcance esos dos detectores ópticos.

Finalmente, la válvula "popet" es abierta y el pistón es regresado hidráulicamente a la posición inicial de reposo. Esto constituye una pasada del probador compacto.

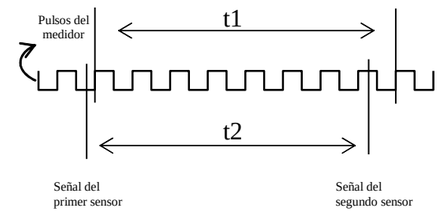



***Figura 4***. *Tiempos definidos en la técnica de doble cronometría.*

La técnica de doble cronometría es la más usada para interpolar los pulsos de probadores compactos cuyo volumen es pequeño.
Usando la relación de tiempos podemos obtener el número de pulsos interpolado de la manera siguiente:

$$\acute{N} = N\,\frac{t2}{t1}\quad \text{(pulsos)} \qquad \textbf{(5)}$$

Donde:

*Ń* Número de pulsos interpolados,
*N* Número de pulsos enteros,
*t1* Tiempo transcurrido para el conteo del número de pulsos com¬pletos, y
*t2* Tiempo entre sensores ópticos.

A partir del número de pulsos colectados del medidor en calibración y el conocimiento del volumen certificado del probador podemos definir el factor K como:

$$KF = \frac{N * t2}{(CPL) * CPS_P * (CTL) * CTS_P * CTS_V * CPL_m * t1 * KV_{base}}$$

(pulsos/L) **(6)**

$V_{p20°}$ Volumen del patrón a 20 °C, en L.
*CTSc* Factor de corrección por efecto de la temperatura en el cilindro.
*CTSv* Factor de corrección por efecto de la temperatura en el vástago.
*CPS* Factor de corrección por efecto de la presión del fluido en el cilindro.
*CTL* Factor de corrección por efecto de la temperatura en la densidad del fluido.
*CPL* Factor de corrección por efecto de la presión en la densidad del fluido.

La calibración del probador compacto se efectúa por la técnica de desplazamiento de líquido empleando una medida volumétrica ("water draw"). El probador compacto mantiene trazabilidad hacia los patrones nacionales de las magnitudes de volumen (masa y densidad), tiempo, temperatura y presión mantenidos por el CENAM.

**El patrón de transferencia** empleado fue un medidor de flujo tipo turbina, marca Brooks de 100 mm de diámetro con clase de exactitud según OIML R 117 de 0.3[4].

[4] *OIML (Organización internacional de Metrología Legal). La recomendación OIML R 117 se refiere a sistemas de medición de flujo para liquidos diferentes al agua.*

**Probador bidireccional**

Patrón de referencia utilizado en la calibración de los medidores de flujo empleados por la industria del petróleo en sitio. Principio de operación de desplazamiento positivo.

Consiste normalmente de una tubería especial, comúnmente dispuesta en forma de U, dentro del cual se desplaza una esfera (por ejemplo de poliuretano), con el propósito de actuar a los sensores de posición necesarios para definir el volumen de referencia. La esfera puede cambiar la dirección de desplazamiento debido a la operación de una válvula de 4 vías instalada entre las cámaras de recepción de la esfera.

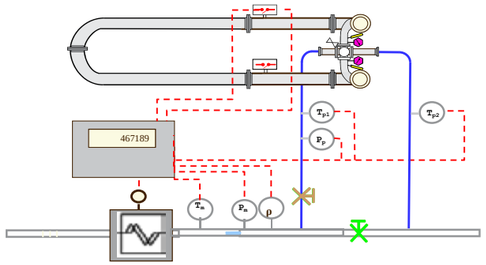



***Figura 5**. Diagrama esquemático de un arreglo para calibración de un medidor Coriolis usando como patrón de referencia un probador bidireccional.*

**Detectores de paso de esfera:** Dispositivo electromecánico instalado en forma permanente el probador, y que tiene como propósito emitir una señal de tipo eléctrico al paso de la esfera.

**Corrida completa (Round trip):** Recorrido realizado por la esfera en el proceso de calibración de los medidores de flujo en ambos sentidos.

**Corrida:** Recorrido en una sola dirección realizado por la esfera durante el proceso de calibración.

**Ambientación:** Práctica para lograr homogeneizar las temperaturas entre el fluido en el medidor bajo calibración y el probador bidireccional, previo al inicio de las corridas de calibración; lo cual puede lograrse haciendo circular fluido a través de todo el sistema medidor- probador.

**Método waterdraw:** Método de calibración consistente en colectar el volumen de agua que desplaza la esfera de un probador desde una posición de inicio hasta la posición final. El volumen desplazado puede medirse mediante el empleo de medidas volumétricas.



**Cálculos**

**Cálculo del factor de corrección del medidor bajo calibración, MFm.**

La obtención del factor del medidor en calibración se determina por comparación directa del volumen del probador, corregido por temperatura y presión y el volumen del medidor Coriolis obtenido del número de pulsos generados y el *factor K*. El modelo matemático propuesto para el cálculo del factor de corrección es el siguiente:

$$MF_m = \frac{Masa_{probador}}{IM_m} \qquad (7)$$

Donde:

*MFm* Es el factor del medidor en masa (adimensional)
*Masa probador* Masa del fluido en el probador en una vuelta completa (kg)
*IMm* Masa indicada por el medidor de flujo másico tipo Coriolis (kg)

$$MF_m = \frac{Masa_{probador}}{IM_m} = \frac{BVP \cdot CTS_p \cdot CPS_p \cdot \rho_{fp}}{IM_m} \qquad (8)$$

Donde:

*BVP* Volumen base del probador (L)
*CTSP* Factor de corrección por efecto de temperatura en el acero del probador (adimensional)
*CPSP* Factor de corrección por efecto de la presión en el acero del probador (adimensional)
*ρfp* Densidad del fluido a condiciones de temperatura y presión en el probador (kg/m$^3$)
*IMm* Masa indicada por el medidor de flujo másico tipo Coriolis (kg)

$$\rho_{fp} = \rho_{fD}\,\frac{CTL_p \cdot CPL_p}{CTL_D \cdot CPL_D} \qquad (9)$$

Donde:

*ρfp* Densidad del fluido a condiciones de temperatura y presión en el probador (kg/m$^3$)
*ρD* Densidad del fluido en el densímetro a frecuencia (kg/m$^3$)
*CTLP* Factor de corrección por efecto de la temperatura en la densidad del líquido en el probador (adimensional)
*CTLD* Factor de corrección por efecto de la temperatura en la densidad del líquido en el densímetro a frecuencia (adimensional)
*CPL P* Factor de corrección por efecto de la presión en la densidad del líquido en el probador (adimensional)
*CPL D* Factor de corrección por efecto de la presión en la densidad del líquido en el densímetro a frecuencia (adimensional)

Substituyendo en la ecuación (7 las ecuaciones (8) y (9), tenemos:

$$MF_m = \frac{Masa_{probador}}{IM_m} = \frac{BVP \cdot CTS_p \cdot CPS_p \cdot}{IM_m}\left(\rho_{fD}\,\frac{CTL_p \cdot CPL_p}{CTL_D \cdot CPL_D}\right) \qquad (10)$$

$$IM_m = \frac{Pulsos\ \ del\ \ medidor}{KF_m} \cdot MFm \qquad (11)$$

Donde:

*N* Son los pulsos del medidor de flujo másico tipo Coriolis colectados en una corrida, [pulsos]
*KFm* Factor K en masa del medidor, que se ingresa a el elemento secundario (es escalable) y es el número de pulsos por unidad de masa (pulsos/kg).
*MFm* Factor del medidor anterior ingresado en el elemento secundario o en el computador de flujo (adimensional).

**Calculo de Incertidumbre del factor del medidor (MFM) - Probador bidireccional.**

**Consideraciones:**
Es suficiente la aproximación lineal en los factores de corrección por efectos de presión y temperatura.

No existen fugas de fluido entre el probador y el medidor bajo calibración.

La temperatura en el metal del cuerpo del probador, es la misma que la del fluido que contiene, en el momento de la calibración.

La temperatura en el metal del cuerpo del medidor en calibración, es la misma que la del fluido que contiene, en el momento de calibración.

Se desprecian los efectos por las variaciones de presión en el interior del probador.
La relación de diámetro externo contra el diámetro interno del probador es del orden de 1,15 por lo cual se pude aplicar la teoría de los cilindros de pared delgada para estimar la deformación del probador por efecto de la presión.

**Suposiciones básicas.**

1.- Volumen certificado del medidor de referencia, *BVP*: Incertidumbre asociada con la calibración del probador compacto. Esta incertidumbre puede catalogarse como incertidumbre tipo B; el valor de incertidumbre informado en el certificado se expresa con un factor de cobertura k=2.03 y 73 grados efectivos de libertad que corresponden aproximadamente a un nivel de confianza del 95 %. Ver certificado.

2.- Temperatura del fluido en el probador, $T_P$: La incertidumbre estándar del sistema de medición de temperatura (integrado por sensor e indicador), según se indica en su certificado de calibración. Una contribución adicional procede del gradiente de temperatura en la dirección axial del probador, para lo cual se sugiere considerar una distribución de probabilidad rectangular. Debe de incluirse la resolución del instrumento y la estabilidad de la temperatura en las corridas para un flujo determinado (variación máxima).

3.-Presión en el interior del probador, $P_P$: Esta fuente de incertidumbre es tipo B y la incertidumbre estándar se especifica en el certificado de calibración, este valor debe combinarse con la incertidumbre debido a la falta de estabilidad en la presión que el fluido ejerce sobre las paredes del probador. La incertidumbre estándar por dicha inestabilidad se calcula asumiendo una distribución rectangular, con límites que se definen de las lecturas máxima y mínima dentro de una corrida de calibración.

4.- Temperatura del fluido en el densímetro a frecuencia, $T_D$: La incertidumbre estándar del sistema de medición se tomará del certificado del instrumento. Debe de incluirse la resolución del instrumento y la estabilidad de la temperatura en las corridas para un flujo determinado (variación máxima).

5.- Presión del fluido en el densímetro a frecuencia, $P_D$: Esta incertidumbre se tomará del certificado de calibración del instrumento, y debe combinarse con la incertidumbre debido a la falta de estabilidad en la presión que el fluido. La incertidumbre por dicha inestabilidad se calcula asumiendo una distribución rectangular, con límites que se definen de las lecturas máximas y mínima dentro de una corrida de calibración.

6.- Coeficiente cúbico de expansión térmica del material del cilindro del probador, *Gc*: El material de fabricación del probador es de acero al carbón, del cual se desconoce su composición química particular. En este caso, y de acuerdo con valores publicados en la literatura [2, 3], en este caso se utiliza el coeficiente cúbico $33.5 \times 10^{-6}$ y se le atribuirá una distribución de probabilidad rectangular con ancho de $0.5 \times 10^{-6}$ (API MPMS, Cap. 12, Sección 2) para la estimación de la incertidumbre estándar.

7.- Diámetro interior del probador, *ID*: De la experiencia en medición de diámetro interno en tuberías usando micrómetros de interiores, un valor conservador de incertidumbre estándar es de ± 0,4 % del valor del diámetro [4].

8.- Módulo de elasticidad del material de fabricación del probador, *E*: De acuerdo con recomendaciones en documentos del fabricante es de $1.965 \times 10^5$ MPa. Respecto de la incertidumbre, Kegel [5] propone un valor de ± 2.5% (incertidumbre estándar)

9.- Espesor de pared del probador, *WT*: La incertidumbre estándar asociada con esta variable se calculará a partir de una distribución rectangular con un ancho de 0.001 m, que corresponde a la tolerancia permitida en la fabricación de tuberías.

10.- Pulsos, *N*: Una práctica conservadora es atribuir una incertidumbre estándar igual a 2 pulsos debido a las operaciones de arranque y paro en el conteo de los pulsos.

11.- Repetibilidad: Se calcula para el factor del medidor a partir del número de corridas de calibración. Su valor se estima de acuerdo con la GUM 1995 [8]



12.- Densidad del fluido en el densímetro a frecuencia, $\rho_D$: Se debe considerar la incertidumbre de calibración del instrumento de densidad. De acuerdo a CNM-CC-730-001/2008 la incertidumbre es de 0.022 kg/m³ con un factor de cobertura k = 2 que asegura un nivel de confianza aproximado del 95 %.

13.- Ecuación para el cálculo del factor de compresibilidad isotérmico, F: De acuerdo con el Manual de Mediciones de Petróleo del American Petroleum Institute (API MPMS, capítulo 11.2.1M), la incertidumbre aplicable al modelo matemático para calcular F es de 6,5% con un nivel de confianza de 95%. Así, la incertidumbre estándar se puede estimar como

$$u_{ECF} = \frac{0.065 \cdot F}{k} = \frac{0.065 \cdot F}{1.96} \qquad (12)$$

14,- Modelo matemático de API 2540: De acuerdo con la experiencia, se propone considerar una incertidumbre estándar igual a 0.1 kg/m³ por el uso del modelo matemático propuesto. Este valor se basa en las diferencias máximas encontradas entre los resultados de aplicar el modelo API 2540 y las mediciones de densidad usando el método de pesada hidrostática.

15.- *MFm del medidor de flujo tipo Coriolis* (previo): Este factor del medidor fue determinado de la calibración anterior, un valor típico es de 0.050 % con k= 2 y un nivel de confianza aproximado del 95 %.

16.- *KFm del medidor de flujo tipo Coriolis:* Este parámetro es configurable en el elemento secundario del medidor en función de la frecuencia (1 000 Hz a 10 000 Hz) y el flujo másico máximo. Es una constante.

17.- El peso de la correlación entre la temperatura del fluido en el probador y la temperatura del fluido en el CMF es muy pequeño respecto a la incertidumbre combinada. Este hecho confirma la validez de las hipótesis presentadas anteriormente.

**Incertidumbre estándar combinada**

La incertidumbre estándar combinada se calcula aplicando la ley de propagación de las incertidumbres al modelo matemático que se usa para calcular el factor del medidor. A continuación se escribe el desarrollo correspondiente,

$$u_{c}^{2}(MF_M) = \left[\frac{\partial MF_M}{\partial N} u_N\right]^2 + \left[\frac{\partial MF_M}{\partial BVP} u_{BVP}\right]^2 + \left[\frac{\partial MF_M}{\partial G_C} u_{Gc}\right]^2 + \left[\frac{\partial MF_M}{\partial T_P} u_{TP}\right]^2 + \left[\frac{\partial MF_M}{\partial P_P} u_{PP}\right]^2 + \left[\frac{\partial MF_M}{\partial ID} u_{ID}\right]^2 + \left[\frac{\partial MF_M}{\partial WT} uWT\right]^2 + \left[\frac{\partial MF_M}{\partial E} uE\right]^2 + \left[\frac{\partial MF_M}{\partial P_D} u_{PD}\right]^2 + \left[\frac{\partial MF_M}{\partial \rho_{fD}} u_{\rho Fd}\right]^2 + \left[\frac{\partial MF_M}{\partial T_D} u_{TD}\right]^2 + 2\frac{\partial MF_M}{\partial T_P}\cdot\frac{\partial MF_M}{\partial T_D}\cdot u_{T_P}\cdot u_{T_D}\cdot r(T_P, T_D) + \frac{sMF_M^2}{n}$$

(13)

**Medidores de Flujo másico tipo Coriolis.**

Cuando un fluido fluye a través de los tubos del sensor[5] en oscilación, se produce la fuerza de Coriolis. Esta fuerza origina una flexión en sentidos opuestos entre la entrada y la salida del sensor (torsión). Si el flujo másico a través del sensor en oscilación se incrementa la flexión es mayor, y es medida por los detectores montados a la entrada y salida de los tubos.

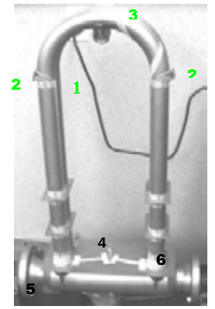



***Figura 6**. Sensor de flujo másico tipo Coriolis de tubos en U (1. Bobina excitadora, 2. Detectores electromagnéticos, 3. Tubos del sensor, 4. Conexiones eléctricas - señales, 5. Bridas de conexión al proceso y 6. RTD adherido a la pared exterior del tubo.)*

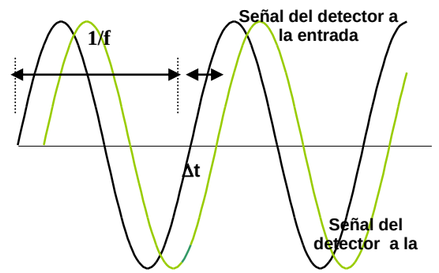



***Figura 7**. Aspecto de la curva cuando el líquido fluye a través de los tubos del sensor que están oscilando, se produce la fuerza de Coriolis, el transmisor del sistema de medición procesa la señal sinusoidal de los detectores y determina el desfasamiento, Δt (μs), de la señal entre la entrada y la salida del sensor.*

[5] *Elemento de un instrumento de medición que está sometido directamente a la acción del mensurando*

Los detectores electromagnéticos producen una señal de voltaje sinusoidal, que representa el movimiento del sensor y que es procesada por el transmisor del sistema de medición que determina el desfasamiento, Δt, en microsegundos entre las señales de entrada y salida del sensor.

$$qm \propto K\Delta K \qquad \textbf{(14)}$$

**El flujo másico (qm) es proporcional al intervalo de tiempo *Δt* y depende también de ciertas características geométricas del sensor.** Así, el flujo másico es independiente de la frecuencia de oscilación del tubo de medición.
Si el fluido esta en reposo, no existe diferencia de tiempo entre las señales sinusoidales.

El módulo de elasticidad K depende del material del sensor y debe ser corregido por cambios de temperatura que ocurran en el proceso de medición. Normalmente se instala una resistencia de platino (RTD) que permite ajustar esta constante de proporcionalidad y obtener un flujo másico compensado por los cambios en el módulo de elasticidad del sensor.

La mayoría de los diseños de los medidores de flujo másico tipo Coriolis poseen la capacidad de medir la densidad del fluido empleando la frecuencia de oscilación del sensor.

Así como los densímetros a frecuencia, los métodos de calibración empleados en los medidores Coriolis para medir densidad deben poseer trazabilidad hacia los patrones nacionales, acciones que determinarán la estabilidad de sus características metrológicas durante su empleo in situ.

La oscilación de los tubos es registrada por los detectores como una señal de voltaje sinusoidal que refleja su movimiento. La frecuencia de esa señal de voltaje sinusoidal de los detectores representa la frecuencia natural de vibración del tubo (sensor).

Si la densidad del fluido cambia durante el proceso provoca un cambio en la frecuencia natural de oscilación del sensor que es captada por los detectores como un cambio en la señal de voltaje sinusoidal. La densidad del fluido durante el proceso puede ser determinada por la siguiente ecuación.

$$\rho = C_1T^2 + C_0 \qquad \textbf{(15)}$$

La densidad del fluido ($\rho$) es directamente proporcional al cuadrado del periodo de vibración de los tubos.

Las constantes $C_1$ y $C_2$ están definidas por la geometría, el volumen interno, la masa del sensor, las propiedades características del material del sensor y la corrección por efecto de la temperatura del modulo de elasticidad. Estas constantes son particulares de cada sensor.

## 3. INVESTIGACIÓN Y PRUEBAS

Los principales aspectos sujetos a estudio son los siguientes:

- Determinar errores sistemáticos con el fin de identificar si estos provienen de los sistemas de medición o del método particular empleado.
- Establecer el comportamiento metrológico y la estabilidad del medidor de flujo tipo turbina empleado como medidor de transferencia.
- Determinar si la estimación de incertidumbre del medidor de transferencia está dentro de lo esperado.
- Finalmente, como beneficio adicional, los resultados de la comparación nos permitirá detectar oportunidades de mejora en el proceso de medición y establecer un protocolo adecuado en la comparación nacional.

Inicialmente se efectuó la calibración previa del medidor de flujo tipo turbina bajo un régimen de flujo turbulento completamente desarrollado, es decir, un perfil de velocidades aguas arriba de la turbina libre de distorsiones y vórtices. Se utilizó tubería recta con una longitud equivalente, $L/D$ = 180.

Durante la prueba de comparación el patrón de referencia probador compacto tipo pistón de desplazamiento positivo (OF 1500) empleando reducciones concéntricas de 150 mm por 100 mm y mangueras flexibles de 150 mm el medidor de transferencia se instaló aguas abajo, esto provoca distorsiones y vórtices severos en el perfil de velocidades, por esa razón se empleo tubería recta con una longitud equivalente, L/D = 110.

Aguas abajo del patrón de transferencia se instaló el medidor de flujo másico tipo Coriolis (CMF 300), que además de permitirnos verificar el comportamiento de los sistemas gravimétricos durante las pruebas, se utilizó como patrón de referencia en la calibración del medidor de flujo tipo turbina. Así mismo, se empleó para producir una caída de presión cuando el fluido circula a través de él, permitiendo asegurar que la presión mínima requerida aguas abajo evitó el fenómeno de cavitación sobre la turbina durante su funcionamiento.

$$Pb \approx 2\Delta p + 1{,}25pe \qquad (16)$$

*Pb* Presión mínima requerida aguas abajo del medidor de flujo tipo turbina, (kPa)
*Δp* Pérdida de carga a través del medidor de flujo, (kPa)
*pe* Presión de vapor del fluido a la temperatura de operación, (kPa)

Finalmente la masa de agua que paso a través de cada uno de estos elementos fue colectada por uno de los dos sistemas para pesar (SEP).

La figura 5 muestra un diagrama esquemático de la instalación empleada durante la comparación interna, observe aguas abajo el probador compacto, en serie con la turbina y el medidor de flujo másico aguas abajo.

Durante las pruebas, tres expertos operaron los diferentes sistemas de medición y efectuaron las pruebas de acuerdo a lo requerido por procedimientos de calibración específicos para cada método de calibración, trabajando simultáneamente pero independientemente el uno del otro, lo que adicionó un parámetro extra a evaluar.

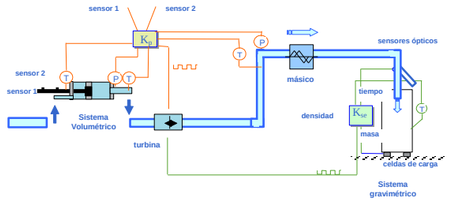



***Figura 8**. Sistema de medición que combina patrones de referencia gravimétricos y volumétricos utilizados para efectuar comparación interna.*

### Correcciones por temperatura

La determinación del factor K de la turbina a 20 °C se efectuó tomando en cuenta únicamente el coeficiente de expansión de superficie de la carcasa de la turbina manufacturada en acero inoxidable, α = 34 x $10^{-6}$ 1/°C la temperatura del agua durante las pruebas varió entre 20 °C y 26 °C y la siguiente ecuación para la corrección de la turbina fue usada:

$$KF_{20} = (1 + 2\alpha\,(T_l - 20))\;\; KF \text{ (pulsos/L)} \qquad (17)$$

## 4. RESULTADOS – Comparación interna

La repetibilidad se expresa como la desviación estándar experimental de la media ($s_j$), expresada como porcentaje del valor promedio de un punto del factor *K* ($\overline{KF}_j$).

$$\overline{KF}_j = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} KF_{i\,(qvj)} \text{ (pulsos/L)} \qquad \textbf{(18)}$$

Donde *n* es el número de mediciones al flujo *qvj*.

$$s_j^{\,2} = \frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}(KF_i - \overline{KF}_j)^2 \text{ (pulsos/L)} \qquad \textbf{(19)}$$

El *factor K* representativo para un método y a un flujo determinado *qvj* ($KF_{rep}$) es:

$$KF_{rep} = \frac{1}{z}\sum_{h=1}^{z}\overline{KF}_{i\,(qvj)} \qquad \text{(pulsos/L)} \qquad \textbf{(20)}$$

Donde z es el número de pruebas empleando un método determinado al flujo *qvj*.

El promedio de la desviación estándar experimental de la media para el flujo *qvj*, está dado por:

$$\overline{s}_j = \frac{1}{z}\sum_{i=1}^{n} s_{j\,(qvj)} \quad \text{(pulsos/L)} \qquad \textbf{(21)}$$

Desviación estándar experimental del promedio ($s_{KFrep}$) del factor K ($\overline{KF}_j$) al flujo qvj.

$$s_{KFrep}^{\;2} = \frac{1}{z-1}\sum_{h=1}^{z}(\overline{KF}_j - KF_{rep})^2 \text{ (pulsos/L)} \qquad \textbf{(22)}$$

Reproducibilidad del $\overline{KF}_j$ para z pruebas empleando un método determinado al flujo qvj, está dado por:

$$R = \sqrt{\overline{s}_j^{\,2} + s_{KFrep}^{\;2}} \qquad \text{(pulsos/L)} \qquad \textbf{(23)}$$

La incertidumbre expandida del factor K, se expresa en con un factor de cobertura k basado en la distribución-t para vef grados efectivos de libertad que corresponden aproximadamente a un nivel de confianza del 95 %, se estimó basándose en la Guía para la Expresión de la Incertidumbre en las Mediciones –BIMP, IEC, IFCC, ISO, IUPAC, IUPAP, OIML. Publicada por ISO en 1995.

### 4.1. Resultados de las pruebas de calibración del medidor de flujo tipo turbina empleando el sistema gravimétrico (SEP).

La dispersión del factor K en el alcance de medición de la turbina oscila entre 0.1 % a 0.03 %, la repetibilidad ≤ 0.05 % y una reproducibilidad de ≤ 0.1 % con excepción del flujo de 400 L/min donde la dispersión es de 0.28 %, repetibilidad de ≤ 0.18 % y reproducibilidad de ≤ 0.7 %.

La incertidumbre expandida del factor *K* es de 0.067 % expresada con un factor de cobertura k = 2.04 y *vef*=64 grados efectivos de libertad, con excepción del flujo bajo donde se estimo una incertidumbre de ± 0.1 % expresada con un factor de cobertura k = 2.21 y *vef*=13 grados efectivos de libertad.

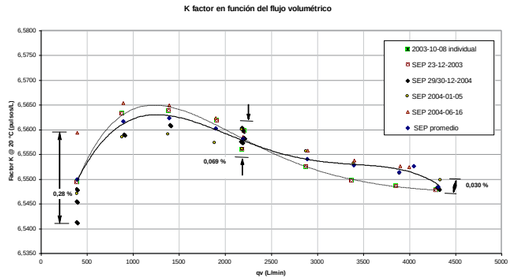



***Figura 9**. Resultados de las diferentes pruebas de calibración del medidor de flujo tipo turbina empleando como referencia el Patrón Nacional para Flujo de Líquidos.*

### 4.2. Resultados de las pruebas de calibración del medidor de flujo tipo turbina empleando el probador compacto de desplazamiento positivo (OF 1500).

La dispersión del factor *K* en el alcance de medición de la turbina oscila entre 0.1 % a 0.06 %, la repetibilidad ≤ 0.07 % y una reproducibilidad de ≤ 0.3 % con excepción del flujo de 400 L/min donde la dispersión es de 0.26 %, repetibilidad de ≤ 0.18 % y reproducibilidad de ≤ 0.8 %.

La incertidumbre expandida del *factor K* es de ± 0.074 % expresada con un factor de cobertura k = 2.08 y *vef*=32 grados efectivos de libertad, con excepción del flujo bajo donde se estimo una incertidumbre de ± 0.15 % expresada con un factor de cobertura k = 2.32 y *vef*=9 grados efectivos de libertad.

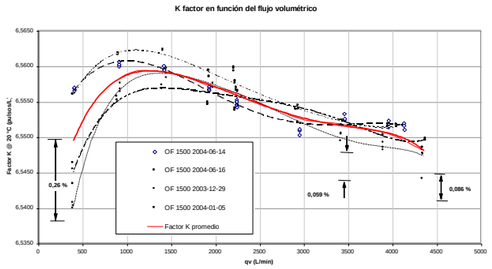



***Figura 10**. Resultados de las diferentes pruebas de calibración del medidor de flujo tipo turbina empleando como referencia el probador compacto de desplazamiento positivo tipo pistón.*

### 4.3. Diferencia de los valores promedio.

| qv | SEP KF promedio | OF 1500 KF promedio | CMF 300 KF promedio | Diferencias de los valores representativos del KF (%) | |
|---|---|---|---|---|---|
| (L/min) | (Pulsos/L) | (Pulsos/L) | (Pulsos/L) | SEP/ OF 1500 | SEP/ CMF 300 |
| 4 317 | 6.548 39 | 6.548 05 | | -0.005 | |
| 3 896 | 6.551 26 | 6.550 50 | | -0.012 | |
| 3 401 | 6.552 69 | 6.551 70 | | -0.015 | |
| 2 897 | 6.554 01 | 6.552 60 | 6.553 02 | -0.022 | -0.015 |
| 2 197 | 6.558 05 | 6.556 10 | 6.557 33 | -0.030 | -0.011 |
| 1 904 | 6.560 21 | 6.557 13 | 6.559 26 | -0.047 | -0.014 |
| 1 399 | 6.562 23 | 6.559 13 | 6.562 64 | -0.047 | 0.006 |
| 897 | 6.561 64 | 6.558 17 | 6.561 95 | -0.053 | 0.005 |
| 397 | 6.549 88 | 6.549 44 | | -0.007 | |

***Tabla 1**. Diferencias determinadas empleando los promedios del factor K de las diferentes pruebas.*

Las diferencias se determinaron utilizando los factores representativos determinados con cada método y varía entre 0.005 % y 0.053 %.

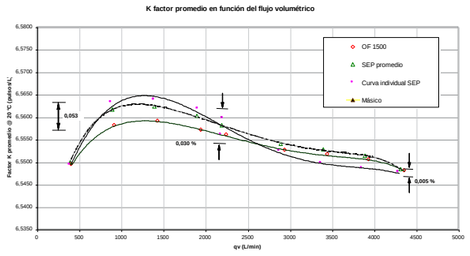



***Figura 11**. Diferencias de los resultados del factor K del patrón de transferencia obtenidos con los diferentes sistemas de referencia.*



## 5. DISCUSIÓN

En la figura 10 se observan variaciones entre la curva de la calibración ideal de la turbina y la curva producida con el arreglo empleado en la comparación puede estimarse que esas variaciones se deben principalmente a efectos de distorsiones en el perfil de velocidades sobre el medidor de flujo producidos por la instalación y operación del probador compacto de desplazamiento positivo.

Entre los resultados mostrados en las figuras 10 y 11 se observan dispersiones similares en las diferentes pruebas efectuadas empleando el método gravimétrico y el método volumétrico lo que significa que es parte del comportamiento del medidor flujo tipo turbina bajo esas condiciones de instalación.

En la tabla 1 se observa que las diferencias entre el SEP y el OF 1500 son siempre negativas y aunque están dentro de la incertidumbre de medición confirman la existencia de errores sistemáticos en el proceso de medición.

La tabla 1, muestra también, los resultados del K factor de la turbina empleando como patrón de referencia un medidor de flujo másico (CMF 300) los errores son positivos y negativos, cabe destacar que ese sistema de medición fue calibrado directamente contra el Patrón Nacional de Flujo de Líquidos y se empleo además para verificar el comportamiento del mismo.

## 6. CONCLUSIONES

- Las diferencias y la dispersión de los datos en la comparación interna muestran que la estabilidad del patrón de referencia es adecuada, con excepción del flujo bajo de 400 L/min, donde la variación de los resultados muestran un efecto en el comportamiento del medidor.

- La estabilidad del patrón de transferencia se efectuó sobre la base de la repetibilidad y de la reproducibilidad del factor K.

- Las diferencias muestran la existencia de errores sistemáticos entre ambos métodos empleados, que aunque están dentro de la incertidumbre de medición debe determinarse la fuente de los mismos.

## 6. RESULTADOS - Calibración en sitio empleando un probador bidireccional.

***Figura 12**. Fotografía de una instalación que combina un medidor de flujo másico de referencia y un probador para su calibración.*

Los medidores de flujo másico tipo Coriolis son empleados por la industria del petróleo en aplicaciones de transferencia de custodia, crudo y productos terminados tanto en masa como en volumen, y como patrones de referencia para la calibración de medidores de flujo.

Los resultados provienen de la calibración de un medidor tipo Coriolis configurado para medir en masa, y con indicación de la densidad a la temperatura de prueba; usando como referencia un probador bidireccional. El fluido de trabajo es diesel, sin embargo pueden emplearse otros combustibles en la calibración.

Medidor másico tipo Coriolis bajo calibración

Realizar el procedimiento de ajuste del "ZERO" al sensor del medidor de flujo másico antes de iniciar las pruebas de calibración.

La aplicación de este tipo de calibraciones debe tomar en cuenta las especificaciones técnicas tanto del medidor bajo calibración como las del probador bidireccional empleado como patrón de referencia.

**Nomenclatura para la densidad del líquido**

*API:* Densidad del líquido en grados API.
*RD:* Densidad relativa del líquido.
*RHO:* Densidad del líquido (kg/m$^3$, g/L)
*RHOb:* Densidad base del líquido.
*RHOobs:* Densidad observada del líquido a presión base.

*RHOtp:* Densidad del líquido a las condiciones de presión y temperatura de la prueba.

| Certificado CNM - CC - 710-001-2008 (agua) | | | |
|---|---|---|---|
| qm (ton/h) | e (%) | MF | ut (%) |
| 301.9 | 0.01 | 0.99986 | |
| 241.2 | 0.01 | 0.99994 | |
| 210.1 | 0 | 1.00002 | |
| 181.1 | -0.01 | 1.00008 | |
| 150.2 | -0.01 | 1.0001 | 0.043 |
| 120.2 | -0.02 | 1.00016 | |
| 120 | 0.05 | 0.99953 | K=2 |
| 90.4 | 0.02 | 0.99978 | |
| 58.3 | -0.01 | 1.0001 | |
| 30.6 | -0.05 | 1.00052 | |
| 14.3 | -0.16 | 1.00159 | |
| 120.4 | 0.04 | 0.99962 | |
| 119.7 | -0.03 | 1.00032 | |

***Tabla 2**. Resultados de la calibración del medidor de flujo másico en el Laboratorio de Flujo de Líquidos del CENAM.*

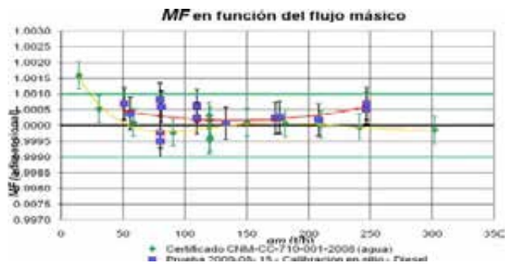



***Figura 13**. La gráfica muestra los resultados obtenidos para el medidor de flujo másico tipo Coriolis con agua en laboratorio y con Diesel en una instalación de productos terminados.*

## Incertidumbre de medida

Magnitudes de mayor contribución

**Repetibilidad:** Se calcula para el factor del medidor a partir del número de corridas de calibración. Su valor se estima de acuerdo con la GUM 1995.

**Volumen certificado del medidor de referencia, *BVP*:** Incertidumbre asociada con la calibración del probador compacto. Esta incertidumbre puede catalogarse como incertidumbre tipo B; el valor de incertidumbre informado en el certificado se expresa con un factor de cobertura k=2,03 y 73 grados efectivos de libertad que corresponden aproximadamente a un nivel de confianza del 95 %.

**Densidad del fluido en el densímetro a frecuencia, *ρD*:** Se debe considerar la incertidumbre de calibración del instrumento de densidad. De acuerdo a CNM-CC-730-135/2008 la incertidumbre es de 0,022 kg/m3 con un factor de cobertura k = 2 que asegura un nivel de confianza aproximado del 95 %.

| Medidor de Flujo másico tipo Coriolis CMF | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Flujo másico | *N* | *CTLm* | *CPLm* | *Masa m* | *e* | *MF* | *s* | *UT* | *U máx* |
| (toneladas/h) | (pulsos) | (adimensional) | (adimensional) | (kg) | (%) | (adimensional) | (%) | (%) | (%) |
| 80.1 | 157359.2 | 0.98383 | 1.00066 | 1573.59 | -0.02 | 0.99982 | 0.025 | 0.043 | |
| 80.0 | 157397.0 | 0.98373 | 1.00066 | 1573.97 | -0.06 | 0.99939 | 0.018 | 0.038 | |
| 110.3 | 157275.9 | 0.98303 | 1.00064 | 1572.76 | 0.01 | 1.00011 | 0.036 | 0.051 | |
| 133.1 | 157300.0 | 0.98359 | 1.00063 | 1573.00 | 0.01 | 1.00006 | 0.017 | 0.037 | |
| 173.6 | 157306.4 | 0.98313 | 1.00060 | 1573.06 | 0.00 | 0.99998 | 0.011 | 0.034 | |
| 247.4 | 157262.0 | 0.98294 | 1.00085 | 1572.62 | 0.06 | 1.00055 | 0.013 | 0.038 | 0.051 con $k$ =2,20 $vef$ = 40 $p$≈ 95 % |
| 247.2 | 157244.4 | 0.98255 | 1.00085 | 1572.44 | 0.03 | 1.00032 | 0.008 | 0.034 | |
| 176.7 | 157274.4 | 0.98345 | 1.00057 | 1572.74 | 0.01 | 1.00012 | 0.019 | 0.037 | |
| 55.6 | 157277.8 | 0.98360 | 1.00062 | 1572.78 | 0.04 | 1.00043 | 0.011 | 0.034 | |
| 55.8 | 157232.2 | 0.98360 | 1.00061 | 1572.32 | 0.07 | 1.00071 | 0.025 | 0.041 | |
| 80.7 | 157264.0 | 0.98371 | 1.00063 | 1572.64 | 0.07 | 1.00065 | 0.017 | 0.037 | |
| 109.6 | 157279.6 | 0.98371 | 1.00064 | 1572.80 | 0.06 | 1.00055 | 0.012 | 0.035 | |
| 208.6 | 157328.4 | 0.98314 | 1.00056 | 1573.28 | 0.03 | 1.00026 | 0.005 | 0.034 | |
| 79.7 | 157297.8 | 0.98395 | 1.00065 | 1572.98 | 0.07 | 1.00068 | 0.013 | 0.036 | |

***Tabla 3**. Resultados de la calibración del medidor de flujo másico utilizando el probador bidireccional en sitio. Se utilizó diesel como fluido de trabajo.*

***Figura 14**. La figura muestra la contribución de las variables de entrada y el peso que tienen durante el proceso.*

Modelo matemático de API 2540: De acuerdo con la experiencia, se propone considerar una incertidumbre estándar igual a 0,1 kg/m$^3$ por el uso del modelo matemático propuesto. Este valor se basa en las diferencias máximas encontradas entre los resultados de aplicar el modelo API 2540 y las mediciones de densidad usando el método de pesada hidrostática.

## 7. CONCLUSIONES

Los resultados de la prueba de aptitud son SATISFACTORIOS, es decir, están dentro del límite de aceptación (En ≤ 1), las diferencias entre los resultados de La calibración del patrón de referencia empleando dos métodos diferentes son menores que la incertidumbre expresada.

Conclusiones generales:

1. Se provee información cuantitativa para determinar las limitaciones de un método de medición en particular.
2. Ofrece una descripción de las magnitudes de influencia.
3. Permitirá a los usuarios establecer objetivamente la incertidumbre total del proceso de medición de flujo.
4. Proveerá la posibilidad de cuantificar cualquier desviación de los resultados fuera de la incertidumbre estimada de medición.
5. Ayudará a simplificar de manera racional los procedimientos de medición.
6. Se debe evaluar periódicamente del comportamiento del patrón de referencia.


## 8. RECONOCIMIENTOS

Al Dr. George E. Mattingly precursor incansable de la metrología de flujo de fluidos en nuestro país.

Al M. en C. José Lara Manríquez (†) precursor de este trabajo.


## REFERENCIAS


[1] G. E. Mattingly, “Dynamic Traceability of Flow Measurements, Flowmeko 1979, Tokio (Japan) Proceedings pp. 401-411.

[2] ISO 4185 “Measurement of liquid flow in closed conduits – Weighing method” – 1980.

[3] M. Tanaka, G. Girard, R. Davis, A. Peuto and N. Bignell- Recommended table for the density of water between 0°C and 40 °C based on recent experimental reports – metrologia - 2001.

[4] Guía BIPM/ISO para la expresión de la incertidumbre en las mediciones CNM-MED-PT-0002.

[5] API -Manual of petroleum measurement standards, Chapter 12.2 Calculation of petroleum quantities, Section Calculation of liquid petroleum quantities measurement by turbine or displacement meters.

[6] API - Manual of Petroleum Measurement Standards – Chapter 5 Metering. Section 6 – Measurement of Liquid Hydrocarbons by Coriolis Meters. October 2002.

[7] OIML R119 Pipe prover for testing measuring systems for liquids other than water.

[8] ISO 7278-2 Liquid hydrocarbons -Dynamic measurement - Proving systems for volumetric meters. Part 2.