

COMPARACIÓN INTERNA ENTRE EL SISTEMA GRAVIMÉTRICO DE PESAJE ESTÁTICO Y EL SISTEMA VOLUMÉTRICO DE DESPLAZAMIENTO POSITIVO TIPO PISTÓN

José Lara Manríquez, Dario A. Loza Guerrero, y Emmanuel Ríos Carrizalez
Centro Nacional de Metrología
División de Flujo y Volumen
km 4,5 Carretera a los Cués, Municipio El Marqués, Querétaro, México
Correo electrónico aloza@cenam.mx, jlara@cenam.mx, erios@cenam.mx

Resumen

Se presentan los resultados 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 Centro Nacional de Metrología (CENAM), como patrón de transferencia se empleó un medidor de flujo tipo turbina, el cual fue calibrado simultáneamente por ambos métodos.

Esta comparación se ubica dentro del programa de aseguramiento de las mediciones de flujo de líquidos que tiene por objeto no solo el aseguramiento metrológico de los patrones de referencia, sino que además, nos permite sentar las bases de una comparación nacional en esta magnitud.

1. INTRODUCCIÓN

Dos de las funciones fundamentales del Centro Nacional de Metrología son la conservación de los patrones nacionales y la participación en comparaciones nacionales e internacionales.

El sistema de medición de flujo de líquidos establecido por el CENAM ha sido declarado como patrón nacional para Flujo de Líquidos por el Gobierno Federal, establece una referencia para mejorar la exactitud y dar confiabilidad a las mediciones de flujo en nuestro país.

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 independientes¹ mantenidos en la División de Flujo y Volumen del CENAM, como patrón de transferencia se empleó un medidor de flujo tipo turbina.

Actualmente, la División de Flujo y Volumen del CENAM impulsa un programa de Aseguramiento de las Mediciones – comparación nacional – con la finalidad de fortalecer nuestra infraestructura metrológica en el área de flujo de líquidos, sobre la base de la experiencia y los resultados obtenidos en las comparaciones con laboratorios nacionales de otros países, que nos permiten afirmar que el Patrón Nacional para Flujo de Líquidos ofrece la confiabilidad necesaria para dar coherencia a las mediciones de flujo de líquidos en México.

Esta comparación nacional, proveerá información cuantitativa para determinar las limitaciones de un método de medición en particular, ofrecerá una descripción de las magnitudes de influencia y permitirá establecer objetivamente la incertidumbre total del proceso de medición de flujo, proveerá la posibilidad de cuantificar cualquier desviación de los resultados fuera de la incertidumbre estimada de medición, ayudará a simplificar de manera racional los procedimientos de medición y ofrece, sin duda alguna, una manera de evaluación cíclica del comportamiento de los procesos de medición. En pocas palabras, permitirá evaluar de manera integral la competencia técnica de los laboratorios secundarios acreditados.

¹ La trazabilidad de ambos métodos empleados en esta investigación está vinculada con los patrones de masa. Por lo que existe una correlación entre ambos métodos.

Las conclusiones de este trabajo, versan sobre las diferencias encontradas en el comportamiento del medidor de flujo tipo turbina que fue calibrado simultáneamente por ambos sistemas y adicionalmente, por un medidor de flujo másico tipo Coriolis.

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.

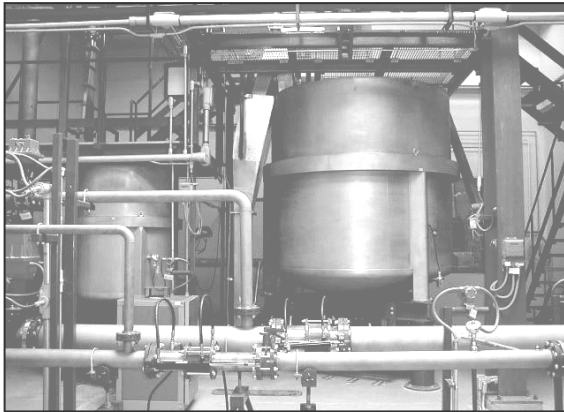


Figura 1. Observe al fondo los sistemas para pesar del patrón nacional para flujo de líquidos.

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

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

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

$$V_m = \frac{m_c}{\rho_L C_{PL}} \quad (L) \quad (2)$$

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

ρ_a - densidad del aire (kg/m^3)

ρ_p - densidad de las pesas utilizadas en la caracterización de los sistemas de pesado (kg/m^3)

ρ - densidad del agua colectada en los tanques (kg/m^3)

V_m - volumen a las condiciones del medidor bajo prueba (m^3)

ρ_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 $C_{PL}^{[4]}$ esta dado por:

$$C_{PL} = \left[1 + \frac{\left(50,74 \cdot 10^{-11} - 0,326 \cdot 10^{-11} \cdot T_L + 0,00416 \cdot 10^{-11} \cdot T_L^2 \right) (P_L - 81500)}{(adimensional)} \right] \quad (3)$$

Donde T_L es la temperatura de la línea ($^{\circ}C$) y P_L es la presión absoluta de la línea (Pa).

El factor K esta dado por:

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

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

Nota: $1 m^3 = 1\,000\,L$.

El patrón Nacional para Flujo de Líquidos mantiene trazabilidad² hacia los patrones nacionales de las magnitudes de masa, tiempo y temperatura y hacia los patrones nacionales en las magnitudes derivadas de densidad, presión y humedad mantenidos por el CENAM.

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,

² **Trazabilidad:** Propiedad de un resultado de medición consistente en poder relacionarlo con los patrones apropiados, generalmente internacionales o nacionales, por medio de una cadena ininterrumpida de comparaciones, teniendo todas las incertidumbres determinadas

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.

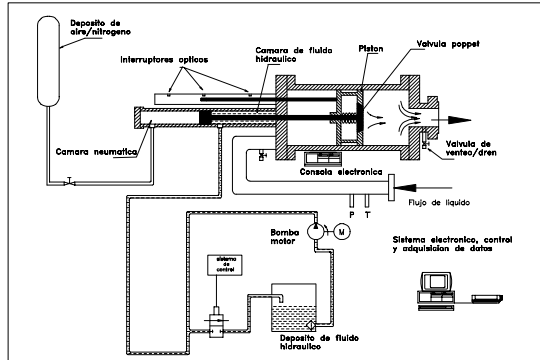


Figura 2. Diagrama esquemático del probador compacto de desplazamiento positivo tipo pistón.

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.

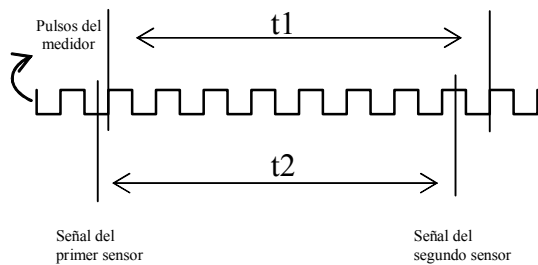


Figura 3. Tiempos definidos en la técnica de doble cronometría.

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:

$$\dot{N} = N \frac{t_2}{t_1} \quad (\text{pulsos}) \quad (5)$$

Donde:

$\dot{N}$ - número de pulsos interpolados,

N - número de pulsos enteros,

t_1 - tiempo transcurrido para el conteo del número de pulsos completos, y

t_2 - 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:

$$KF = \frac{N * t_2}{(CPL) * CPS_p * (CTL) * CTS_p * CTS_v * CPL_m * t_1 * KV_{base}} \quad (\text{pulsos/L}) \quad (6)$$

V_{p20} - volumen del patrón a 20 °C, en L.

CTS_c - factor de corrección por efecto de la temperatura en el cilindro.

CTS_v - 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 el fluido.

CPL - factor de corrección por efecto de la presión en el 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.

Medidor de flujo másico tipo Coriolis



Figura 4. Instalación del medidor de flujo másico.

Cuando un fluido fluye a través de los tubos del sensor³ 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.

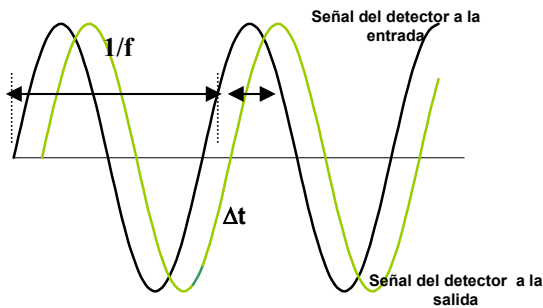


Figura 5. Aspecto de la curva cuando el líquido fluye a través de los tubos del sensor que están oscilando, se produce la fuerza de Coriolis.

Los detectores electromagnéticos producen una señal de voltaje sinusoidal, se muestra en la figura 5, que representa el movimiento del sensor y que es procesada por el transmisor del sistema de medición que determina el desfase, Δt , en microsegundos entre las señales de entrada y salida del sensor.

$$qm \propto K \Delta t \quad (kg/min) \quad (7)$$

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 está 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.

³ Elemento de un instrumento de medición que está sometido directamente a la acción del mensurando.

Si la temperatura del fluido en el patrón de referencia es igual a la temperatura del fluido en el medidor, el factor K del medidor bajo prueba puede escribirse como:

$$KF_m = \frac{N_m}{N_{mm}} \cdot \frac{KF_{mm}}{MF_{mm}} \cdot \rho_{fmm} \frac{CPL_{mm}}{CPL_m} \quad (\text{pulsos/L}) \quad (8)$$

Donde:

KF_m – K-factor del medidor [1/L]

N_m – Pulsos totalizados del medidor [adimensional]

N_{mm} – Pulsos totalizados del patrón de referencia [adimensional]

KF_{mm} – K-Factor en masa del patrón de referencia [1/kg]

MF_{mm} – Factor de medición del patrón de referencia [adimensional]

ρ_{fmm} – Densidad del fluido en el patrón de referencia [kg/L]

CPL_{mm} -factor de corrección por presión en el líquido en el medidor másico de referencia (adimensional).

CPL_m - factor de corrección por presión en el líquido en el medidor bajo prueba (adimensional).

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

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

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

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 empleó 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. Asimismo, 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.

$$P_b \approx 2\Delta p + 1,25p_e \quad (9)$$

P_b - presión mínima requerida aguas abajo del medidor de flujo tipo turbina, (kPa)

Δp - pérdida de carga a través del medidor de flujo, (kPa)

p_e - 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 4 muestra un diagrama esquemático de la instalación empleada durante la comparación interna, observe aguas arriba el probador compacto, en serie con la turbina y el medidor de flujo másico aguas abajo de este último.

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.

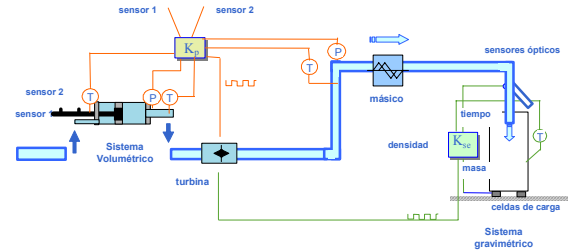


Figura 6. Sistema de medición que combina patrones de referencia gravimétricos y volumétricos utilizados para efectuar la comparación interna.

Correcciones de 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, $\alpha = 34 \times 10^{-6} 1/^{\circ}\text{C}$ 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:

$$KF_{20} = (1 + 2\alpha(T_L - 20))KF \quad (\text{pulsos/L}) \quad (10)$$

4. RESULTADOS

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

$$K\bar{F}_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n KF_{i(qvj)} \quad (\text{pulsos/L}) \quad (11)$$

Donde n es el número de mediciones al flujo qvj.

$$s_j^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (KF_i - K\bar{F}_j)^2 \quad (\text{pulsos/L}) \quad (12)$$

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

$$KF_{rep} = \frac{1}{z} \sum_{h=1}^z K\bar{F}_{i(qvj)} \quad (\text{pulsos/L}) \quad (13)$$

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 qv_j , está dado por:

$$\bar{S}_j = \frac{1}{z} \sum_{i=1}^n S_{j(qvj)} \quad (\text{pulsos/L}) \quad (14)$$

Desviación estándar experimental del promedio (S_{KFrep}) del factor K ($K\bar{F}_j$) al flujo qv_j .

$$S_{KFrep} = \sqrt{\frac{1}{z-1} \sum_{h=1}^z (K\bar{F}_j - K_{Frep})^2} \quad (\text{pulsos/L}) \quad (15)$$

Reproducibilidad del $K\bar{F}_j$ para z pruebas empleando un método determinado al flujo qv_j , está dado por:

$$R = \sqrt{\bar{S}_j^2 + S_{KFrep}^2} \quad (\text{pulsos/L}) \quad (16)$$

La incertidumbre expandida del factor K, se expresa con un factor de cobertura k basado en la distribución-t para v_{ef} 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 $\leq 0,05$ % y una reproducibilidad de $\leq 0,1$ % con excepción del flujo de 400 L/min donde la dispersión es de 0,28 %, repetibilidad de $\leq 0,18$ % y reproducibilidad de $\leq 0,7$ %.

La incertidumbre expandida del factor K es de $\pm 0,067$ % expresada con un factor de cobertura $k = 2,04$ y $v_{ef}=64$ grados efectivos de libertad, con excepción del flujo bajo donde se estimó una incertidumbre de $\pm 0,1$ % expresada con un factor de cobertura $k = 2,21$ y $v_{ef}=13$ grados efectivos de libertad.

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 $\leq 0,07$ % y una reproducibilidad de

$\leq 0,3$ % con excepción del flujo de 400 L/min donde la dispersión es de 0,26 %, repetibilidad de $\leq 0,18$ % y reproducibilidad de $\leq 0,8$ %.

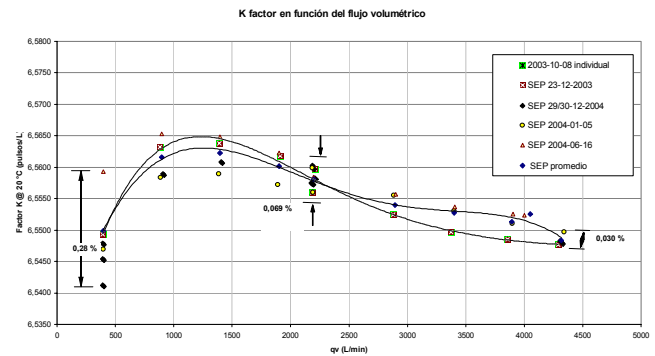


Figura 7. Resultados de las diferentes pruebas de calibración del medidor de flujo tipo turbina empleando como referencia el Patrón Nacional para Flujo de Líquidos.

La incertidumbre expandida del factor K es de $\pm 0,074$ % expresada con un factor de cobertura $k = 2,08$ y $v_{ef}=32$ grados efectivos de libertad, con excepción del flujo bajo donde se estimó una incertidumbre de $\pm 0,15$ % expresada con un factor de cobertura $k = 2,32$ y $v_{ef}=9$ grados efectivos de libertad.

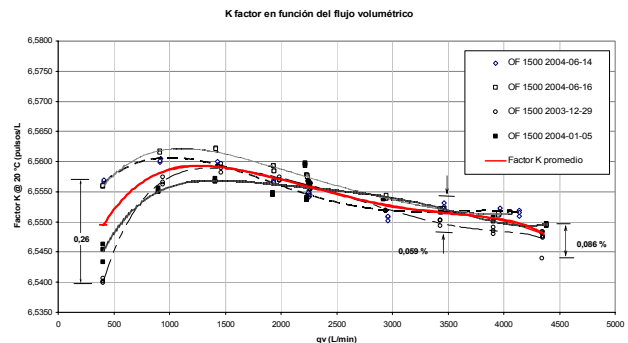


Figura 8. Resultados de las diferentes pruebas de calibración del medidor de flujo tipo turbina empleando como referencia el probador compacto de desplazamiento positivo tipo pistón.

4.3. Resultados de las pruebas de calibración del medidor de flujo tipo turbina empleando el medidor de flujo másico.

La repetibilidad del factor K en el alcance de medición de la turbina fue $\leq 0,06$ %. La incertidumbre expandida del factor K es de $\pm 0,07$

% expresada con un factor de cobertura $k = 2,05$ y $v_{ef}=54$ grados efectivos de libertad.

4.4. 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 %.

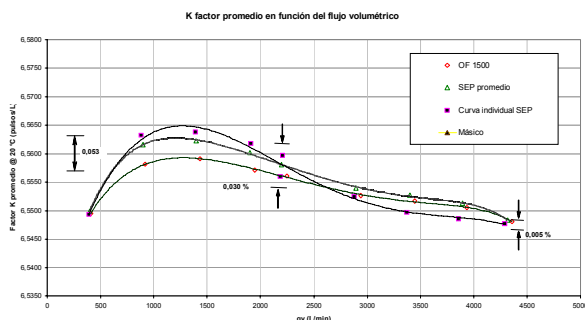


Figura 9. Diferencias de los resultados del factor K del patrón de transferencia obtenidos con los diferentes sistemas de referencia.

5. DISCUSIÓN

En la figura 7 se pueden observar variaciones entre la curva de la calibración ideal de la turbina y la curva producida con el arreglo empleado en la comparación. Puede asumirse que esas variaciones se deben principalmente a efectos de distorsiones en el perfil de velocidades sobre el medidor de flujo producidas por la instalación y operación del probador compacto de desplazamiento positivo.

Entre los resultados mostrados en las figuras 7 y 8 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 factor K 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 empleó 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.

RECONOCIMIENTOS

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

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.