

REALIZACIÓN POR METODO GRAVIMÉTRICO DE LA ESCALA PRIMARIA PARA LAS MEDICIONES DE VOLUMEN DE GAS NATURAL EN LA ARGENTINA

J. Forastieri – S. Lupo
INTI – Física y Metrología

1 RESUMEN

Dada la necesidad que impone asegurar que los resultados informados en un proceso de medición se encuadren dentro de un determinado nivel de calidad, el INTI como custodio por ley de los patrones nacionales de medida ha encarado desde su Departamento de Física y Metrología, tareas para realizar la escala primaria de volumetría en gas a partir de la unidad del kg con el fin de dar a los usuarios la posibilidad de vincular sus mediciones a los patrones nacionales y de esta forma garantizar la trazabilidad de las medidas en la industria del gas dentro de ciertos niveles de exactitud, evitando de esta forma tener que enviar sus patrones de referencia o de transferencia al exterior con los costos y riesgos conocidos.

Con este fin se ha desarrollado el método de determinación volumétrica por comparación gravimétrica que permite lograr niveles de incertidumbre estándar en la determinación de volúmenes desplazados a presión atmosférica mejores que 0,1%. El método utilizado, resultados y análisis se exponen en este artículo.

2 INTRODUCCIÓN

Establecer una escala de medida de una magnitud determinada y diseminarla implica conocer su definición dentro de un sistema coherente de unidades para luego estudiar su realización física que permita ser mantenida en el tiempo y a su vez poder ser transferida a aplicaciones científicas, técnicas y comerciales.

Llevado este concepto a la magnitud volumen podemos decir que por su definición se encuentra vinculada en un principio con la magnitud de base que es la longitud y se la puede vincular con la magnitud masa a través de las siguientes expresiones:

$$\begin{aligned} V &= longitud^3 \\ V &= masa / densidad \end{aligned} \tag{1}$$

Luego podemos asociarla físicamente con el kilogramo patrón que es custodiado por ley en el Instituto Nacional de Metrología de cada nación.

Su realización conlleva el arreglo físico de un conjunto de operaciones metrológicas que permita obtener calidad de valores representativos de los niveles de exactitud que la industria y la ciencia requieren para efectuar transacciones técnicas y comerciales con el más alto grado de confianza asignable.

Luego de este paso, es decir de su realización al más alto nivel nacional, es necesario producirla y mantenerla para garantizar su transferencia.

Lógicamente para su posterior aplicación en el ámbito de las transacciones entre partes, se requiere del conocimiento para diseminar la escala en múltiplos y submúltiplos y su aplicación masiva.

La etapa descrita anteriormente es la denominada capacidad de diseminar una unidad determinada que recorrida en forma inversa permite garantizar la trazabilidad de las mediciones con su concepto de una cadena ininterrumpida de vinculaciones de medidas con los patrones nacionales.



3 CONCEPTO

Para establecer la metodología de ensayo que permita arribar a niveles de incertidumbre aplicables, es necesario primeramente, conocer los niveles de exactitud requeridos por las normas y reglamentaciones nacionales e internacionales para los caudales de prueba.

Si consultamos por ejemplo la recomendación de la OIML (Organización Internacional de Metrología Legal) para los ensayos de medidores, observamos que los errores tolerados en los mismos para caudales comprendidos entre Q_t y Q_{max} no deben superar el valor del 1 % en verificación primitiva o aprobación de modelo.

Este valor no debe ser confundido con la incertidumbre de medición que se requiere por parte del laboratorio para poder garantizar el cumplimiento de ese porcentaje de error. La Recomendación citada indica que esta incertidumbre no debe ser superior a la quinta parte del error tolerado, es decir 0,2% para los caudales indicados.

Estos niveles de incertidumbre solamente son alcanzables con sistemas de definición primaria de la magnitud o a través de sistemas de transferencia vinculados en primer orden con el patrón primario (campanas de medición o sistemas de toberas críticas).

Ubicándonos en los caudales mas elevados a altas presiones están los sistemas de medición de velocidad de flujo (turbinas) o medidores de tiempo de tránsito de señales eléctricas (medidores ultrasónicos), donde se requiere garantizar incertidumbres de medición mejores al 0,3%.

Para alcanzar estos caudales a condiciones de presiones superiores a los 50 bar, es necesario atravesar una cadena de transferencias de mediciones cuyo aporte en la incertidumbre de medición no resulten altamente significativas.

Es decir que para transferir a bajos y altos caudales necesitamos vincular todo el sistema a patrones primarios cuya incertidumbre estándar relativa en su realización no sea superior a $8E-4$.

4 MÉTODO

El sistema adoptado es el indicado en la Figura 1 donde un fluido se encuentra dentro de una cuba estanca y se desplaza hacia abajo a través de una tubería para caer dentro de un recipiente depositado sobre una balanza analítica.

El fluido, en su desplazamiento, va generando espacio dentro de la cuba que es ocupado por aire que previamente pasó por el medidor bajo ensayo, conectado en serie con ella.

Si aplicamos la ecuación de estado de un gas ideal correspondiente al patrón

$$P_p \cdot V_p = m \cdot R \cdot T_p \quad \text{donde } V_p \text{ es el volumen de aire en el patrón en m}^3$$

y para el medidor bajo ensayo:

$$P_T \cdot V_T = m \cdot R \cdot T_T \quad \text{donde } V_T \text{ es el volumen de aire en el medidor bajo ensayo en m}^3,$$

al efectuar la conversión del volumen real V_p del estado correspondiente al patrón, al estado correspondiente al medidor bajo ensayo, no solo la constante individual del gas permanece invariable sino también la masa. La presión y la temperatura pueden variar.

A partir de ambas ecuaciones de estado se obtiene que el volumen de gas a las condiciones del medidor bajo ensayo es:

$$V_T = V_p \cdot \frac{P_p \cdot T_T}{P_T \cdot T_p} \quad (2)$$

siendo: P_p la presión absoluta en kPa del aire en la cuba superior.

P_T la presión absoluta en kPa medida a la entrada del medidor bajo ensayo.

T_p la temperatura termodinámica en °K del aire en la cuba.

T_T la temperatura termodinámica en °K del aire a la entrada del medidor bajo ensayo.

Para el caso del patrón, el volumen desplazado V_p surge de la siguiente relación:

$$V_p = \frac{m \cdot (1 - \frac{r_a}{r_f})}{r_f} \quad (3)$$

donde m es la masa de fluido de densidad ρ_f desplazado desde la cuba superior hacia el recipiente de pesaje. El término entre paréntesis corresponde a la corrección por empuje del aire sobre el fluido a pesar.

Debido a que el elemento de transferencia en cuestión requiere de un tiempo de puesta en régimen, se instala un sistema bifurcador que permite derivar el fluido de puesta en régimen hacia otro recipiente que no será pesado. En el momento de inicio de la medición, un sensor óptico instalado en el medidor bajo ensayo envía una señal a un sistema de contactores que habilita el pasaje de fluido al recipiente de pesaje.

Una vez desplazado un volumen de aproximadamente $0,05 \text{ m}^3$, según la capacidad de la cámara del medidor, se bifurca el chorro de aceite al recipiente auxiliar.

De esta forma la balanza indicará la masa m de aceite que se desplazó de la cuba superior, equivalente al volumen teórico de aire que ocupó ese espacio y que, previamente paso por el medidor bajo ensayo entre dos señales consecutivas del sensor óptico acoplado a él.

Con el empleo de un densímetro patrón y una termorresistencia a 4 hilos se determina la densidad ρ_f del aceite del recipiente de pesaje y a través de una curva de interpolación se la relaciona con la densidad a la temperatura del aceite de la cuba superior, si dicha temperatura resultase distinta.

Con la utilización de un barómetro, una RTD y un medidor de humedad se determina la densidad del aire ambiente.

Luego el volumen obtenido de esta forma de la ecuación (3) es reemplazado en la ecuación (2) para obtener el volumen de aire que ingresa al medidor bajo ensayo.

A partir de esta determinación se obtiene la constante del medidor bajo ensayo que en el caso que se expone fueron una campana de inmersión de $0,5 \text{ m}^3$ de volumen y un contador volumétrico de cámaras húmedas de $0,025 \text{ m}^3$ por revolución del tambor.

Para el caso de la campana se determinó la constante en todo el volumen operativo en tramos de $0,050 \text{ m}^3$. Como elemento de indicación se utilizó un sensor tipo encoder de 1000 divisiones por vuelta.

En el contador de cámaras húmedas se determinó un desvío relativo para el caudal de ensayo que surge de:

$$e = \frac{V_T - V_P}{V_P} \cdot 100\% \quad (4)$$

El caudal seleccionado para la determinación fue de $1 \text{ m}^3/\text{h}$ ya que permitía, en el caso del contador de cámaras húmedas, trabajar en una zona de errores constante y, en el

caso del sistema de divergencia para el recipiente de pesaje, trabajar con un caudal cuyo aporte en la incertidumbre de medición no fuera altamente significativo.

Los gradientes de las temperaturas puestas en juego para el cálculo de las constantes durante los ensayos debían ser inferiores a $\pm 0,2$ °C. Estas condiciones se alcanzaron por encontrarse el sistema primario en un subsuelo, donde la temperatura en la zona de trabajo permanece muy estable.

No obstante, para lograr la mayor uniformidad posible de temperatura, especialmente a que los gradientes entre temperaturas de aceite, aire de campana, aire de entrada al medidor y temperatura ambiente estuvieran garantizados por debajo de este valor, los ensayos fueron efectuados en diferentes días, asumiendo la totalidad de la prueba para determinar las constantes un tiempo de 3 meses.

5 INSTRUMENTAL UTILIZADO

Balanza analítica:	capacidad 60 kg - resolución: 0,002 kg
Densímetro de vidrio:	capacidad de 0,810 a 0,850 kg/m ³ – resolución: 0,000 5 kg/m ³
Termorresistencias:	rango de calibración 18 a 23 °C asociado con multímetro de 4 dígitos – resolución 0,01 °C.
Sensores de presión absoluta:	capacidad hasta 200 kPa – resolución: 0,001 kPa
Sensor óptico:	infrarojo
Emisor de pulsos:	capacidad 1 000 divisiones por vuelta
Sensor de presión diferencial:	capacidad 0 a 2 kPa resolución: 0,2 Pa
Contador cámaras húmedas:	capacidad 8 m ³ /h – 0,025 m ³ /vuelta – resolución: 0,02 dm ³
Campana de medición:	capacidad 0,5 m ³
Dispositivo divergente:	resolución mejor que 5 ms

6 RESULTADOS

Los ensayos se llevaron a cabo en un entorno de temperatura entre 20 y 21 °C, con una estabilización térmica del sistema mejor que $\pm 0,2$ °C.

La presión atmosférica tuvo un entorno de 1 010 a 1 020 hPa.

La medición de presión se efectuó en todos los casos en forma absoluta.

Bajo estas condiciones el desvío estándar relativo de las mediciones fue de 2 E-4.

En la siguiente tabla se indican las constantes obtenidas gravimétricamente para la campana de medición en bandas de 0,050 m³ y los valores obtenidos por comparación con el medidor de cámaras húmedas en los mismos tramos de medición.

TRAMO	CONSTANTE POR COMPARACION	CONSTANTE POR METODO GRAVIMETRICO	DIFERENCIA
dm ³	dm ³ /pulso	dm ³ /pulso	%
400-0	0,0385567	0,0385385	0,05
300-0	0,0385321	0,0385433	-0,03
200-0	0,0385035	0,0385383	-0,09
100-0	0,0385846	0,0385710	0,04

Tabla 1. Valores determinados para las constantes de la campana patrón.

Se observa que la diferencia de determinación de constantes por dos métodos diferentes en cada tramo es inferior a 0,1 %. No obstante es importante destacar que existe una correlación de valores debido a que en ambos casos el sistema de referencia utilizado es el método gravimétrico.

A partir de la instrumentación utilizada, las incertidumbres de sus calibraciones, magnitudes de influencia y desvío estándar de la medición se propone un análisis de fuentes de incertidumbre con el propósito de cuantificar la incertidumbre final de determinación del volumen por el método gravimétrico.

Este valor de incertidumbre pasa a ser la mejor capacidad de medición a nivel nacional.

El modelo matemático propuesto es:

$$D = I - \left[\frac{(m_f - m_i) \cdot \left(1 - \frac{r_a}{r_m}\right)}{r_m \cdot (1 - \Delta t \cdot a_d)} \cdot \frac{P_p \cdot T_T}{P_T \cdot T_p} \right] + r_e + r_r + r_i \quad (5)$$

Fuente de incertidumbre	Símbolo	Valor estimado	Tipo	Distrib	Intervalo (±)		Factor	u _i		n _i	C _i		% contrib	
masa de aceite inicial	m _i	10,000	kg	BN	N	0,004	kg	2,0	2,0E-03	kg	50	1,2E-03	m3/kg	0,5%
masa de aceite final	m _f	52,000	kg	BN	N	0,004	kg	2,0	2,0E-03	kg	50	-1,2E-03	m3/kg	0,5%
densidad del aire	r _a	1,2	kg/m3	BN	N	0,060	kg/m3	2,0	3,0E-02	kg/m3	50	6,0E-05	m6/kg	0,3%
temperatura aire cuba	T _p	22,1	div	BN	N	0,15	°C	2,0	7,5E-02	°C	50	1,7E-04	dm3/p	15,4%
temperatura aire medidor	T _T	22	div	BN	N	0,15	°C	2,0	7,5E-02	°C	50	1,7E-04	dm3/div	15,4%
presión aire cuba	P _p	1013	mbar	BN	N	0,1	mbar	2,0	5,0E-02	mbar	50	4,9E-05	m3/mba	0,6%
presión medidor	T _p	1012	mbar	BN	N	0,100	mbar	2,0	5,0E-02	mbar	50	4,9E-05	m3/mbar	0,6%
enrase medidor	r _e	0	m3	BR	R	0,07	%	1,7	4,0E-02	%	50	5,0E-04	m3	39,0%
instalación	r _i	0	m3	BR	R	0,00002	m3	1,7	1,2E-05	m3	50	1,0E+00	m3	12,7%
resolución medidor (óptica)	r _r	0	m3	BR	R	0,0200	s	1,7	1,2E-02	s	50	5,6E-04	m3/s	3,9%
densidad del aceite cuba	r _m	840,19	m3	BN	N	0,126	kg/m3	2,0	6,3E-02	kg/m3	50	5,9E-05	m6/kg	1,3%
Indicación	I	0,05	m3	A2	N	0,126	kg/m5	4,0	2,0E-02	%	4	5,0E-04	m3	9,6%
Volumen patrón	D	0,0001	m3		N	6,4E-05	m3	2,0	3,2E-05	m3	151			100%

$$D = 0,10 \% \pm 0,0001 \text{ m3 } 0,13 \%$$

Tabla 2: Análisis de incertidumbre.

El valor de incertidumbre estimada para un volumen de ensayo de 50 dm^3 es de 0,0001 dm^3 para un nivel de confianza del 95%.

En la primera columna de la tabla se describen las componentes que entran en juego en el modelo matemático propuesto.

En la quinta columna se detalla el tipo de distribución estadística seguida por cada componente.

En la última columna se estima el porcentaje de distribución en el aporte total de incertidumbre.

Es de destacar que la incertidumbre en el nivel de enrase del medidor aporta un valor significativo a la estimación de la incertidumbre final. Por tal motivo se debe redoblar esfuerzos en mejorar esta condición.

Otra componente a destacar es la medición de temperatura. Si bien la incertidumbre de calibración de los sensores puede ser baja, los gradientes a encontrar durante la medición contribuyen en mayor medida en el aporte de esta magnitud.

El sistema divergente tiene la característica de ser un elemento cuya incertidumbre de medición esta asociada directamente al caudal de ensayo.

Esto es debido al tiempo de conmutación del flujo de aceite en las cubas. Asumiendo el tiempo de conmutación constante (es decir que la contribución por inercia mecánica del mayor volumen de fluido en el dispositivo es nula) nos estaría dando un mayor volumen de transición que puede no ser medido.

A partir de la determinación de las constantes definida en la Tabla 1 y, considerando el promedio de todas los tramos para cada método, vemos en el gráfico siguiente la correlación de la caracterización.

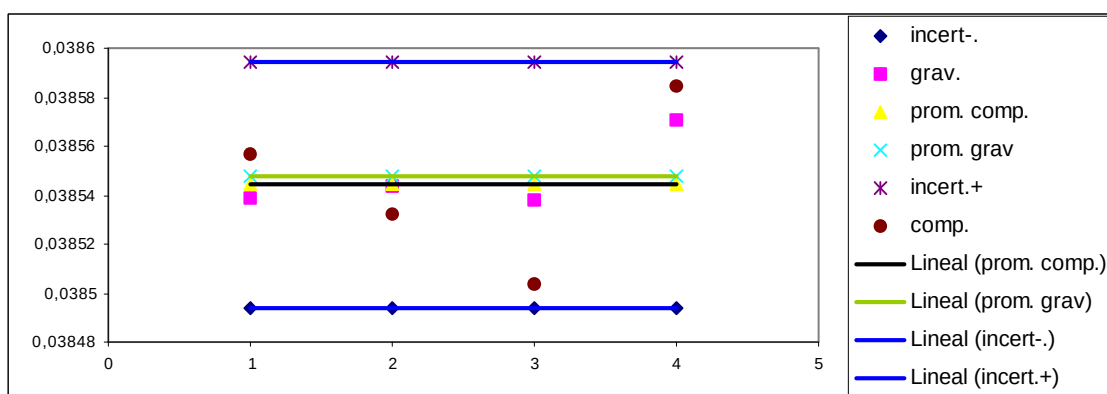


Figura 2. Evaluación del grado de concordancia en la determinación de las constantes y la mejor capacidad de medición obtenida.

Se observa que el promedio de las constantes determinadas por ambos métodos presentan un desvío aproximado del 0,01% y que a partir de estos valores estimando la incertidumbre detallada en la Tabla 2, todas las constantes obtenidas para cada uno de los tramos se ubican dentro de la banda de incertidumbre expandida.

7 CONCLUSIONES

- El método utilizado permite obtener niveles de incertidumbre aplicables a una cadena de trazabilidad para cumplir con los requerimientos técnicos y normativos legales en la verificación metrológica y calibración de contadores domiciliarios e industriales.
- La transferencia del método a una campana de volumen garantiza una muy buena estabilidad en el tiempo.
- La comparación de los dos métodos de transferencia graficados indican que los patrones rotativos de cámara húmeda presentan muy buena repetibilidad y que su limitación está dada por el sistema de enrase del sello hidráulico.
- La determinación de la constante de un medidor patrón de cámaras húmedas o secas a través de este método, permite vincular instalaciones de calibración fijas al patrón primario.

8 PERSPECTIVA

Esta determinación de la unidad de volumen en gases y en función de las instalaciones existentes en Argentina abre la posibilidad de generar una escala nacional hasta un caudal de aproximadamente de 2 400 m³/h a presión atmosférica.

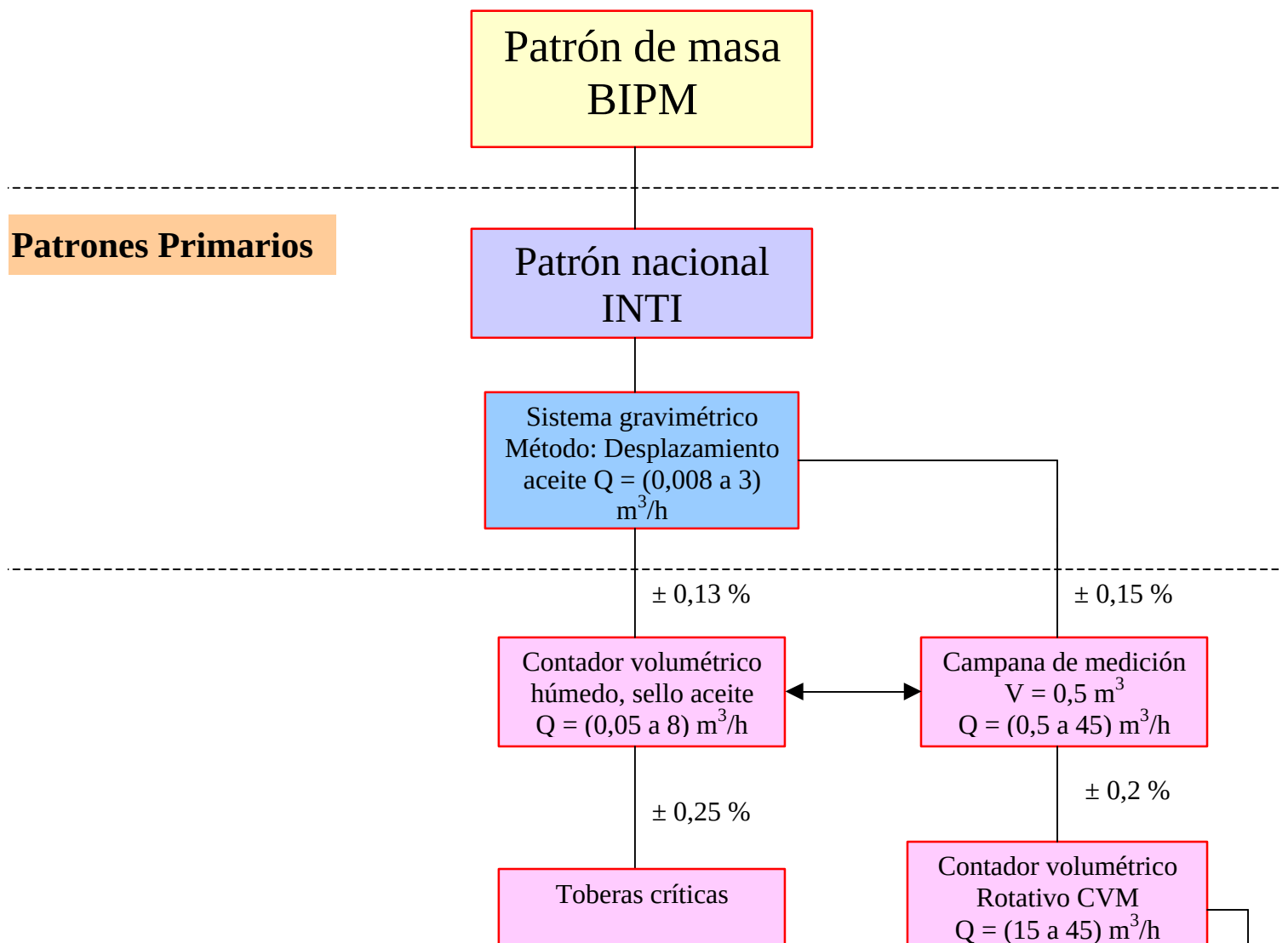
En relación a ampliar la escala para caudales a alta presión, en la actualidad se podría disponer eventualmente de instalaciones para medidores con diámetros no superiores a

los 200 mm y presión de 2,5 MPa con trazabilidad en alta presión a un Laboratorio Nacional de Metrología externo.

REFERENCIAS.

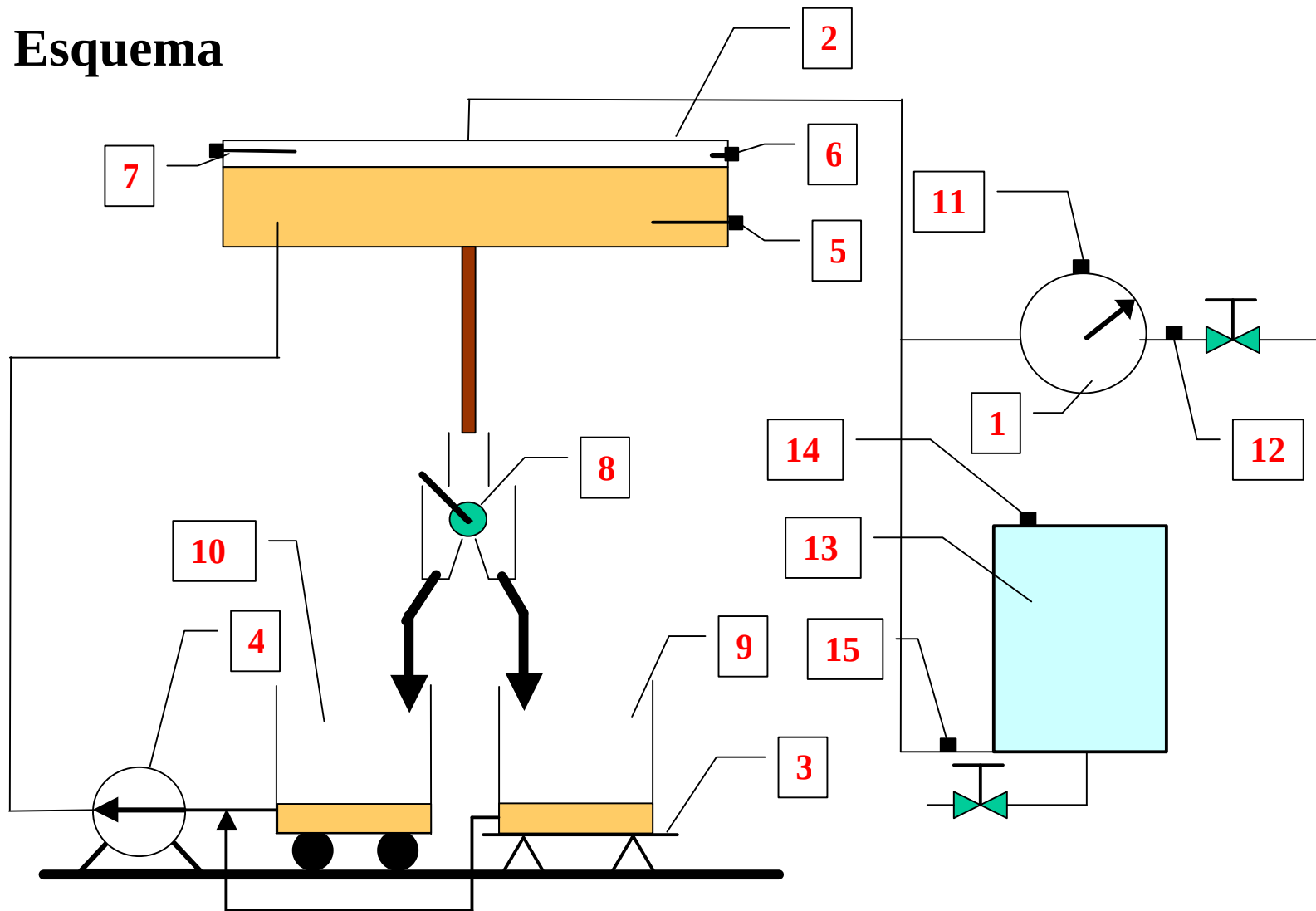
- J. Forastieri – S. Lupo “Desarrollo de un método para la calibración de medidores volumétricos de gas”. Jornadas de Innovación tecnológica INTI - 2000
- J. Forastieri – S. Lupo “ Desarrollo de la escala nacional de volumen en gas” Jornadas Tecnológicas INTI - 2002.
- Guide to Expression of Uncertainty in Measurements BIPM/ISO 1993
- Reglamento de Prueba del PTB “ Contadores Volumétricos de Gas” 1992
- OIML R 31 “ Diaphragm gas meters” edición 1995
- OIML R 32 “Rotary piston gas meters and turbine gas meters”

Trazabilidad de las mediciones en volumen y caudal de gases



Método gravimétrico

Esquema



- 1 Contador
- 2 Cuba de aceite
- 3 Balanza
- 4 Bomba
- 5 Sensor de temperatura del aceite de la cuba
- 6 Sensor de presión del aire en la cuba
- 7 Sensor de temperatura del aire en la cuba
- 8 Válvula derivadora de flujo
- 9 Recipiente para el aceite a pesar
- 10 Recipiente para la entrada en régimen del medidor
- 11 Sensor de presión del medidor
- 12 Sensor de temperatura del medidor
- 13 Campana
- 14 Sensor de presión de la campana
- 15 Sensor de presión de la campana

Figura 1. Sistema de medición gravimétrico