

**EDITORIAL**

Estimado lector:

En el mes de septiembre de este año sesionó en el Palacio de las Convenciones de La Habana el 10mo. Simposio Internacional Metrología 2017, con el lema: Mediciones para el desarrollo sostenible. Estuvo precedido de dos cursos preevento en el que participaron 60 especialistas nacionales de las esferas priorizadas del país, quienes conocieron las novedades de la norma internacional ISO/IEC 17025, cuya más reciente versión fue aprobada en este mismo año y de la redefinición de las unidades básicas del Sistema Internacional de Unidades.

El Simposio sirvió de marco para la celebración de dos talleres temáticos: sobre Volumen y Flujo y sobre Metrología Legal. El taller de volumen y flujo resultó un espacio importante para el debate sobre las mediciones en este sector, que reviste especial interés para el país. Sirvió para intercambiar sobre el nuevo laboratorio de calibración para productos claros de CUPET y las innovaciones tecnológicas que están introduciendo en sus instrumentos de medición las empresas líderes en el mundo.

Para el número que ponemos a su disposición hemos seleccionado cuatro de las ponencias que se presentaron en el Taller Temático sobre Volumen y Flujo del 10mo. Simposio Internacional Metrología 2017, relacionadas con el control metrológico legal a las mediciones en la industria petrolera. Tres de ellas se refieren a los trabajos realizados por especialistas del INIMET y la empresa CubaPetróleo para la puesta en marcha del Laboratorio de Calibración de flujómetros para productos claros de CUPET, que incluyeron el método para la estimación de la incertidumbre de calibración del sistema gravimétrico y la calibración de los flujómetros patrones del laboratorio. La cuarta ponencia, en idioma inglés, presenta las mejoras que se han incluido en las nuevas generaciones de flujómetros de tipo Coriolis de la empresa Endress+Hauser.

Con este número despedimos al Ing. Eduardo Pérez González, quien durante todo este año fungió como Director Editorial de nuestro Boletín, pero se acogerá a su jubilación, después de más de cincuenta años dedicados a la Metrología Cubana. Damos la bienvenida a la MCs. Alejandra Hernández Leonard, nueva Subdirectora de Ciencias e Innovación Tecnológica del INIMET, quien asumirá a partir del próximo año la Dirección Editorial del Boletín Científico Técnico del INIMET.

Esperamos que nuestras propuestas le sean de utilidad y en nombre del colectivo de trabajadores del INIMET le deseo un próspero año 2018, que estará dedicado al nuevo Sistema Internacional de Unidades.

MCs. Nelson Julián Villalobos Hevia  
Director  
Instituto Nacional de  
Investigaciones en Metrología

**Feliz 2018**



**Boletín Científico -Técnico INIMET**

**Título abreviado: BCT INIMET**

**No. 2 2017**

**Cubre:** julio – diciembre 2017

ISSN versión impresa: 0138-8576  
ISSN versión electrónica: 2070-8505

**EQUIPO EDITORIAL**

**Director editorial**

Ing. Eduardo Guillermo Pérez González

**Coordinación, diseño, producción y distribución**

Lic. Herminia E. Díaz Terry

**Traducción**

Jesús Bran Suárez

**Impresión**

Editorial IDICT

**Redacción, administración e impresión**

INIMET. Consulado 206 e/ Animas y  
Trocadero. Centro Habana, La Habana, Cuba.

**Teléfonos**

(537) (07) 8623041-44 ext. 116  
(537) (07) 8643365-68 ext. 116

**Correo-e:** [normateca@inimet.cu](mailto:normateca@inimet.cu)

**Sitio Web**

<http://www.inimet.cubaindustria.cu>

**Acabado del Boletín**

Editorial IDICT. Industria esquina  
San José No. 452  
Centro Habana, La Habana, Cuba.

**CONSEJO EDITORIAL**

MCs. Nelson Julián Villalobos Hevia<sup>1</sup>

Dr. C. José Ignacio Franco Fernández<sup>2</sup>

Lic. Nuris Eriótida Valdés Pereira<sup>1</sup>

Ing. Fernando Antonio Arruza Rodríguez<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Instituto Nacional de Investigaciones en Metrología (INIMET), Cuba.

<sup>2</sup> Empresa Tecnomática, Cuba.

<sup>3</sup> Oficina Nacional de Normalización (ONN), Cuba.

Los autores son los únicos responsables del contenido de los artículos y de los criterios por ellos emitidos.

Los artículos están protegidos mediante una licencia Creative Commons que funciona bajo las siguientes condiciones:



Nuestra publicación está:

- Certificada por el Sistema de Certificación de Publicaciones Seriadas Científico-Tecnológicas del CITMA.
- Indizada en el Sistema de información Científica Redalyc.



Pueden enviarnos sus opiniones y sugerencias sobre nuestro Boletín o solicitar información por la dirección de correo:

[normateca@inimet.cu](mailto:normateca@inimet.cu)

Si usted desea suscribirse al BCT INIMET (impreso y/o electrónico) envíe los siguientes datos a nuestra dirección:

**Nombre y apellidos, Organismo, Dirección, Teléfono, e-mail.**

**TABLA DE CONTENIDO / TABLE OF CONTENTS**

**CIENCIA Y TÉCNICA / SCIENCE AND TECHNIQUE**

**Estimación de la incertidumbre del Sistema Gravimétrico del Laboratorio para Productos Claros /**

Estimation of the uncertainty of the Gravimetric System of the Laboratory for Clear Products /

Lic. Yan Carlos Leyva Labrador; Ing. Maritza Hernández Apaceiro; Ing. Regla Inchaurtieta Ramos

**Calibración de los flujómetros patrones del Laboratorio de Calibración de Fluómetros para Combustibles Claros de CUPET/ Calibration of the standard flowmeters of the Flowmeter Calibration Laboratory for CUPET Light Fuels /**

Ing. Maritza Hernández Apaceiro; Lic. Yan Carlos Leyva Labrador; Ing. Regla Inchaurtieta Ramos

**Puesta en Marcha del Laboratorio de Calibración de Fluómetros para Productos Claros de CUPET, (LCPC)/ Start-up of the Flowmeter Calibration Laboratory for CUPET Clear Products, (LCPC)/**

Dr. C José Franco Fernández, Ing. Eddy Turiño Echevarría, Ing. Ramón Mendoza Sánchez, Ing. Francisco Pérez Bell, Ing. Analia Hugues Muñoz, Ing. José E. Tamayo Lestón, Ing. Armando Estévez Alonso; Ing. Maritza Hernández Apaceiro, Ing. José A. León, Ing. José Hernández, Ing. José I. Romero, Ing. Pablo Pascual Hueso, Ing. Jesús M. Hernández Rodríguez.

**Improvements in Coriolis flow measurement technology / Mejoras en la tecnología de medición de flujo de Coriolis /**

Dr.C. Osmel. Reyes Vaillant; Ing.Edwin H. Doorenspleet

**NOTICIAS / NEWS**

**Servicios que presta el INIMET /47**

Services available at INIMET / 47

**Instrucciones a los autores /48**

Instructions to authors / 48

**Ponencia aprobada para su presentación en el 10mo. Simposio Internacional Metrología 2017**

**Estimación de la incertidumbre del Sistema Gravimétrico del Laboratorio para Productos Claros**

**Autores:** Lic. Yan Carlos Leyva Labrador<sup>1</sup> [yancarlos@inimet.cu](mailto:yancarlos@inimet.cu)  
Ing. Maritza Hernández Apaceiro<sup>2</sup> [maritzah@inimet.cu](mailto:maritzah@inimet.cu)  
Ing. Regla Inchaurtieta Ramos<sup>3</sup> [regla@inimet.cu](mailto:regla@inimet.cu)

<sup>1</sup> Licenciado en Matemática, Especialista en Metrología, Aspirante a Investigador, Laboratorio de Volumen INIMET;

<sup>2</sup> Ingeniera Mecánica, Jefe del Laboratorio de Volumen INIMET

<sup>3</sup> Ingeniera Mecánica, Especialista en Metrología, INIMET

**Resumen**

Este trabajo describe la obtención de un método para estimar la incertidumbre del Sistema Gravimétrico del Laboratorio para Productos Claros diferentes del agua. En particular se realiza un análisis del procedimiento de medida para desarrollar un método que estime la mayor incertidumbre que se pueda obtener durante la realización de una medición en el sistema gravimétrico, haciendo una diferenciación entre el régimen *start-stop* estático y el régimen *start-stop* dinámico. Se estimó la incertidumbre del régimen *start-stop* dinámico a partir de la obtenida en el régimen *start-stop* estático y la introducida por la válvula desviadora. La estimación de la incertidumbre de medida se desarrolla siguiendo la "Guía para la Expresión de la Incertidumbre de Medición".

**Palabras claves:** Estimación de la incertidumbre, sistema gravimétrico, régimen *start-stop* estático, válvula desviadora, régimen *start-stop* dinámico.

**Uncertainty estimation of the Gravimetric System of the Facility for Clear Products  
Abstract**

This work describes the obtaining of a method to estimate the uncertainty of the Gravimetric System of the Laboratory for Clear Products different from water. In particular, an analysis of the measurement procedure is performed to develop a method that estimates the greatest uncertainty that can be obtained during the measurement in the gravimetric system, differentiating between the static *start-stop* and the dynamic *start-stop* regimes. The uncertainty of the dynamic *start-stop* regime was estimated from that obtained in the static *start-stop* regime and that introduced by the diverter valve. The measurement uncertainty estimation is developed following the "Guide to the Expression of Uncertainty of Measurement".

**Keywords:** Uncertainty estimate, gravimetric system, static start-stop regime, diverter valve, dynamic start-stop regime.

### **Introducción**

Con el objetivo de poseer mayor control sobre los líquidos comercializados, diferentes del agua, Cuba ha realizado importantes inversiones en el campo de la flujometría. Debido a ello, se han introducido flujómetros con un nivel de exactitud más elevado y con disímiles principios de funcionamiento, esto unido a los altos gastos en que se incurre al calibrar estos flujómetros en el extranjero, ha conllevado a la creación de un laboratorio del primer mundo, con ostentosas tecnologías, equiparado, a la vez, con patrones de alta precisión para poder realizar las correspondientes calibraciones en el país; el Laboratorio para Productos Claros Diferentes del Agua. Este laboratorio cuenta con una amplia gama de tecnologías modernas para la estabilización y el control del flujo; además en las líneas se encuentran insertados:

1. tres flujómetros que pueden alcanzar un elevado rango de flujo y tienen como principio de funcionamiento la fuerza de Coriolis. Estos miden el flujo másico y la masa instantánea, además de calcular el volumen y la densidad del líquido, sin embargo, estos últimos son calculados con menor exactitud;
2. un tanque gravimétrico que mide la masa del fluido que cae en él después de pasar por los flujómetros;
3. una válvula desviadora que permite dirigir el fluido entre el tanque gravimétrico y el tanque nodriza, o de almacenamiento;
4. un densímetro de alta exactitud;
5. una serie de transmisores de temperatura y presión que posibilitan realizar las correcciones correspondientes a la densidad medida, además de controlar las variaciones de estas magnitudes.

El sistema gravimétrico del Laboratorio de Calibración para flujómetros para productos claros de CUPET es clasificado como sistema primario y se utiliza para dar trazabilidad a los flujómetros de la línea, y a su vez, es trazable al Instituto Nacional de Investigaciones en Metrología. Además de calibrar los flujómetros de la línea, también se pueden calibrar otros metros contadores para los que se requieran elevadas exactitudes.

Toda medición está acompañada por su incertidumbre, ya que esta caracteriza la dispersión de los valores atribuidos al mensurado e indica cuantitativamente la calidad del resultado, de forma que quienes utilizan dicho resultado puedan evaluar su idoneidad. Por la importancia que posee el sistema gravimétrico del laboratorio, este trabajo está orientado a estimar su incertidumbre.

## **Materiales y métodos**

La estimación de la incertidumbre del sistema gravimétrico se realizó siguiendo los pasos expuestos en la “Guía para la Expresión de la Incertidumbre de Medición” (GUM), ya que esta es una guía de carácter internacional que ha sido aprobada conjuntamente por los organismos más importantes en el mundo de la metrología y brinda información detallada de cómo obtener y expresar la incertidumbre.

Por las características del sistema gravimétrico y por el alto nivel de exactitud y precisión requerido, influyen en la medición diferentes magnitudes (densidad, temperatura, presión, flujo, masa, humedad relativa y tiempo), lo cual ocasiona que intervengan en la medición un gran número de instrumentos. Por lo tanto, para estimar la incertidumbre del sistema es necesario apoyarse en los certificados de calibración de los mismos, en los cuales vienen reflejados los errores de los instrumentos en los diferentes puntos de la escala y la incertidumbre asociada a la aplicación de dichos errores.

Se utiliza el “Vocabulario Internacional de Metrología” (VIM) con el objetivo de utilizar los términos más aceptados internacionalmente de la metrología y lograr un mejor entendimiento.

Para la estimación de algunas componentes de incertidumbre fue necesario realizar una serie de experimentos *in situ*.

En la actualidad existen normas internacionales que tratan temas de esta índole, como son las normas ISO y las API, o recomendaciones como las de la OIML, las cuales son fundamentales para comprender con más claridad el procedimiento de medida que se utiliza, aspecto fundamental para poder realizar una correcta estimación de la incertidumbre. En estas normas se puede encontrar de manera detallada cuales son las fuentes que afectan significativamente la medición y a su vez los factores de corrección, dependiendo del tipo de medición que se realice y de la exactitud requerida, por lo tanto antes de estimar cualquier incertidumbre es importante conocer cómo se realiza el procedimiento de medida.

## **Resultados y discusión**

### **Incertidumbre del sistema gravimétrico**

La incertidumbre del sistema gravimétrico consiste en determinar una incertidumbre expandida para un nivel de confianza determinado en ambos regímenes. En la determinación de la misma, es necesario estimar la mayor incertidumbre pues esta va a ser utilizada en todas las mediciones que se realicen en el sistema gravimétrico.

La estimación de la incertidumbre del sistema gravimétrico es importante ya que al realizar la calibración de un metro contador solo es necesario sumar cuadráticamente la incertidumbre

combinada del sistema gravimétrico con la incertidumbre combinada aportada por el metro contador a calibrar, lo cual facilita los cálculos de incertidumbre de las calibraciones.

La incertidumbre del sistema gravimétrico en el régimen de *start-stop* estático es menor que la que se produce en el régimen *start-stop* dinámico pues en este último interviene la válvula desviadora, la cual tiene asociada una incertidumbre significativa.

### **Estimación de la incertidumbre del régimen *start-stop* estático**

#### **Modelo matemático**

En el sistema gravimétrico la magnitud primaria es la masa y las restantes magnitudes se consideran como magnitudes influyentes. Debido a los altos niveles de exactitud exigidos a la medición de la masa, es necesario realizar la corrección correspondiente a la fuerza de empuje del aire ya que esta contribuye significativamente a la incertidumbre del resultado de medición, por lo que el modelo matemático se puede escribir como:

$$m = m_f \left[ 1 + \frac{0.34848P_{af} - 0.009e^{(0.061T_{af})} Hr_f \left( \frac{1}{\rho_{lf}} - \frac{1}{\rho_p} \right)}{273.15 + T_{af}} \right] -$$

$$- m_0 \left[ 1 + \frac{0.34848P_{a0} - 0.009e^{(0.061T_{a0})} Hr_0 \left( \frac{1}{\rho_{l0}} - \frac{1}{\rho_p} \right)}{273.15 + T_{a0}} \right] + \partial m_v + \partial m_r$$

Además:

$$\rho_{l0} = \rho_l CTPL_0(\rho_l, T_\rho, P_\rho, T_{l0}, P_{it0}); \quad T_{lf} = T_{l0} = \frac{T_1 + T_2}{2}; \quad P_{if} = \frac{\frac{gm_f}{S} + 100P_{af}}{1000} + \frac{P_{af}}{10}$$

$$\rho_{lf} = \rho_l CTPL_f(\rho_l, T_\rho, P_\rho, T_{lf}, P_{if}); \quad P_{it0} = \frac{P_{a0}}{10}$$

Donde:

$m$  : Masa medida (kg);

$m_f$  : Masa final en el tanque gravimétrico (kg);

$m_0$  : Masa inicial en el tanque gravimétrico (kg);

$\rho_{l0}$  : Densidad del líquido en el tanque gravimétrico al inicio (kg/m<sup>3</sup>);

$\rho_{lf}$  : Densidad del líquido en el tanque gravimétrico al final (kg/m<sup>3</sup>);

$\rho_p$  : Densidad de las pesas con que fue calibrado el tanque gravimétrico (kg/m<sup>3</sup>);

$\partial m_v$  : Evaporación del líquido durante el llenado del tanque gravimétrico (kg);

$\partial m_r$  : Retención de líquido en las paredes de la tubería (kg);

$P_a$  : Presión atmosférica (mbar);

$T_a$  : Temperatura ambiente (°C);

$Hr$  : Humedad relativa (%);

$\rho_l$  : Densidad indicada por el densímetro (kg/m<sup>3</sup>);

$CTPL_0$  : Corrección por efectos de temperatura y presión para corregir la densidad indicada por el densímetro a la temperatura y presión existente en el tanque gravimétrico al inicio;

$CTPL_f$  : Corrección por efectos de temperatura y presión para corregir la densidad indicada por el densímetro a la temperatura y presión existente en el tanque gravimétrico al concluir.

Las correcciones a su vez dependen, además de la densidad indicada por el densímetro, de:

$T_\rho$  : Temperatura del líquido, al medir la densidad (°C),

$P_\rho$  : Presión en la línea, al medir la densidad (bar),

$T_{i0}$  : Temperatura del líquido que se encuentra en el tanque gravimétrico al inicio (°C),

$P_{i0}$  : Presión del líquido que se encuentra en el tanque gravimétrico al inicio (kPa),

$T_{if}$  : Temperatura del líquido que se encuentra en el tanque gravimétrico al finalizar (°C),

$P_{if}$  : Presión del líquido que se encuentra en el tanque gravimétrico al finalizar (kPa).

La temperatura del líquido que se encuentra en el tanque es medida por dos transmisores de temperatura, por lo que la expresión para su cálculo quedaría:

$$T_{if} = T_{i0} = \frac{T_1 + T_2}{2}$$

Donde:

$T_1$  : Temperatura del transductor que se encuentra situado en la posición 1/4 del tanque gravimétrico (°C),

$T_2$  : Temperatura del transductor que se encuentra situado en la posición 2/4 del tanque gravimétrico (°C),

Además las magnitudes  $P_{if}$  y  $P_{i0}$  dependen de la presión atmosférica  $P_{af}$  y  $P_{a0}$  respectivamente. O sea, estas se pueden escribir como:



$$P_{itf} = \frac{\frac{gm_f}{S} + 100P_{af}}{1000} + \frac{P_{af}}{10}$$

$$P_{it0} = \frac{P_{a0}}{10}$$

$P_{a0}$  : Presión atmosférica al inicio (mbar)

$P_{af}$  : Presión atmosférica al concluir (mbar)

$S$  : Área del cilindro del tanque gravimétrico (3,463 605 9 m<sup>2</sup>)

$g$  : Aceleración de la gravedad (9,806 65 m/s<sup>2</sup>)

Notar que  $P_{itf}$  no es más que el punto medio del gradiente de presión que se forma en el tanque

gravimétrico, por lo tanto varía entre  $\frac{gm_f + 100P_{af}}{1000}$  y  $\frac{P_{af}}{10}$ .

#### Valor estimado de las magnitudes de entrada

En este trabajo se estima la mayor incertidumbre que puede surgir a la hora de realizar una medición en el sistema gravimétrico pues esta incertidumbre es la que va a ser utilizada en todos los posibles casos que se presenten, los cuales pueden ser muy variados por las propias características del laboratorio y también, debido a que no se controlan las condiciones ambientales.

Por tal motivo se escogieron los valores estimados de las magnitudes de entrada atendiendo a la experiencia en el laboratorio y a una serie de observaciones, con el objetivo de que estos se acerquen lo más posible a la realidad.

En la siguiente tabla se muestran los valores esperados de cada magnitud de entrada acompañado de su unidad de medida:

Tabla 1: Magnitudes de entrada y valor esperado

Magnitud de entrada	Valor esperado	Unidad de medida	Magnitud de entrada	Valor esperado	Unidad de medida
$m_f$	8000	kg	$\rho_l$	782	kg/m <sup>3</sup>
$P_{af}$	1017	mbar	$\rho_p$	7100	kg/m <sup>3</sup>
$T_{af}$	30	°C	$\partial m_v$	0	kg
$Hr_f$	80	%	$\partial m_r$	0	kg

$m_0$	1	kg	$T_\rho$	30	°C
$P_{a0}$	1016	mbar	$P_\rho$	1,5	bar
$T_{a0}$	28	°C	$T_1$	31	°C
$Hr_0$	78	%	$T_2$	32	°C

También es necesario estimar el valor esperado de otras variables que dependen de las magnitudes de entrada e intervienen en el modelo matemático, estas son:

Tabla 2: Valor esperado de las magnitudes dependientes de las magnitudes de entrada.

VARIABLES	Valor esperado	Unidad de medida	VARIABLES	Valor esperado	Unidad de medida
$T_{if}$	31,5	°C	$P_{if}$	113,0	kPa
$T_{i0}$	31,5	°C	$P_{i0}$	101,6	kPa
$CTPL_0$	0,999 045 603	adimensional	$CTPL_f$	0,998 165 781	adimensional
$\rho_{i0}$	781,2537	kg/m <sup>3</sup>	$\rho_{if}$	780,5656	kg/m <sup>3</sup>

### **Evaluación de la incertidumbre típica de cada estimación de entrada**

A las indicaciones de algunos instrumentos que intervienen en la medición no se le realizan las correspondientes correcciones que aparecen en sus certificados de calibración, lo que quiere decir que es necesario estimar para cada instrumento calibrado la incertidumbre de la no realización de la corrección, esto se realiza estimando la incertidumbre asociada a cada medición como si el instrumento fuese un instrumento verificado, o sea, según su clase se toma el error máximo permitido y puede suponerse que existe una probabilidad igual de que el error tome cualquier valor dentro de los límites permitidos; es decir, una distribución de probabilidad rectangular.

Para la medición de las condiciones ambientales, o sea, temperatura ambiente, humedad relativa y presión atmosférica se utilizan instrumentos que nunca han sido verificados ni calibrados, por lo tanto, debido a la falta de información que se tiene respecto a ellos se asume que existe una probabilidad igual de que el error tome cualquier valor dentro de los límites del error máximo permitido; es decir, una distribución de probabilidad rectangular.

Para evaluar la incertidumbre típica de cada estimación de entrada es necesario identificar en primera instancia cuales son las fuentes de incertidumbre que afectan a cada una de ellas.

En la siguiente tabla se han sombreado las fuentes de incertidumbre que afectan a cada magnitud de entrada:

Tabla 3: Fuentes de incertidumbre que afectan a las magnitudes de entrada

Magnitud de entrada	Fuentes de incertidumbre				
	Resolución	Certificado	Dato de P	EMP	AE
$m_f, m_0, T_\rho$ $P_\rho, T_1, T_2$					
$P_{af}, T_{af},$ $Hr_f, P_{a0},$ $T_{a0}, Hr_0$					
$\rho_l$					
$\rho_p$					
$\partial m_v$					
$\partial m_r$					

Leyenda:

Resolución: Incertidumbre estimada por la resolución del instrumento.

Certificado: incertidumbre estimada por la incertidumbre que aparece en el certificado de calibración.

Dato de P: incertidumbre estimada a partir de un dato tomado de una publicación.

EMP: incertidumbre estimada a partir del error máximo permisible del instrumento, atendiendo a su clase.

AE: incertidumbre estimada a partir de análisis estadístico.

El punto medio del gradiente de presión que existe en el tanque ( $P_{if}$ ) depende del radio del tanque y a su vez este depende de la temperatura de la chapa del tanque, esto va a proporcionar algunas fuentes de incertidumbre extra las cuales son despreciables ya que estas afectan en muy poca medida a la corrección  $CTPL_f$  y por ende al resultado de la medición de masa.

### Evaluación de las covarianzas

En la medición de la masa intervienen un gran número de magnitudes que pueden estar correlacionadas como son:

- $m_f, P_{af}, T_{af}, Hr_f$  ;
- $m_0, P_{a0}, T_{a0}, Hr_0$  ;
- $\rho_I, T_\rho, P_\rho$  ;
- $\rho_{I0}, \rho_{If}$

Debido a la falta de información sobre las observaciones de estas magnitudes, no es posible analizar la correlación existente entre ellas pues para esto sería necesario realizar una serie de observaciones repetidas en las mismas condiciones para poder analizar las correlaciones, datos que no se poseen. Es importante realizar estos experimentos pues los grados de correlación que pueden existir entre estas magnitudes pueden ser significativos.

Por otra parte sí es posible estimar la correlación existente entre  $(P_{a0}, P_{af}, m_f)$  con  $(\rho_{I0}, \rho_{If})$  y  $\rho_{I0}$  con  $\rho_{If}$  ya que ellos comparten variables en común . Entonces:

$$u(P_{a0}, \rho_{I0}) = \frac{\partial P_{a0}}{\partial P_{a0}} \frac{\partial \rho_{I0}}{\partial P_{a0}} u_c^2(P_{a0})$$

$$u(P_{af}, \rho_{If}) = \frac{\partial P_{af}}{\partial P_{af}} \frac{\partial \rho_{If}}{\partial P_{af}} u_c^2(P_{af})$$

$$u(m_f, \rho_{If}) = \frac{\partial m_f}{\partial m_f} \frac{\partial \rho_{If}}{\partial m_f} u_c^2(m_f)$$

$$u(\rho_{I0}, \rho_{If}) = \frac{\partial \rho_{I0}}{\partial \rho_I} \frac{\partial \rho_{If}}{\partial \rho_I} u_c^2(\rho_I) + \frac{\partial \rho_{I0}}{\partial T_\rho} \frac{\partial \rho_{If}}{\partial T_\rho} u_c^2(T_\rho) + \frac{\partial \rho_{I0}}{\partial P_\rho} \frac{\partial \rho_{If}}{\partial P_\rho} u_c^2(P_\rho)$$

Pero esto se puede escribir como:

$$u(P_{a0}, \rho_{I0}) = \frac{\partial P_{a0}}{\partial P_{a0}} \frac{\partial \rho_{I0}}{\partial P_{a0}} u_c^2(P_{a0}) = \left[ \frac{\partial \rho_{I0}}{\partial P_{a0}} u_c(P_{a0}) \right] u_c(P_{a0})$$

$$u(P_{af}, \rho_{If}) = \frac{\partial P_{af}}{\partial P_{af}} \frac{\partial \rho_{If}}{\partial P_{af}} u_c^2(P_{af}) = \left[ \frac{\partial \rho_{If}}{\partial P_{af}} u_c(P_{af}) \right] u_c(P_{af})$$

$$u(m_f, \rho_{If}) = \frac{\partial m_f}{\partial m_f} \frac{\partial \rho_{If}}{\partial m_f} u_c^2(m_f) = \left[ \frac{\partial \rho_{If}}{\partial m_f} u_c(m_f) \right] u_c(m_f)$$

$$u(\rho_{10}, \rho_{1f}) = \left[ \frac{\partial \rho_{10}}{\partial \rho_1} u_c(\rho_1) \right] \left[ \frac{\partial \rho_{1f}}{\partial \rho_1} u_c(\rho_1) \right] + \left[ \frac{\partial \rho_{10}}{\partial T_\rho} u_c(T_\rho) \right] \left[ \frac{\partial \rho_{1f}}{\partial T_\rho} u_c(T_\rho) \right] + \left[ \frac{\partial \rho_{10}}{\partial P_\rho} u_c(P_\rho) \right] \left[ \frac{\partial \rho_{1f}}{\partial P_\rho} u_c(P_\rho) \right]$$

Donde los coeficientes:

$$\frac{\partial \rho_{10}}{\partial P_{a0}} u_c(P_{a0}) \quad \frac{\partial \rho_{10}}{\partial \rho_1} u_c(\rho_1) \quad \frac{\partial \rho_{1f}}{\partial T_\rho} u_c(T_\rho)$$

$$\frac{\partial \rho_{1f}}{\partial P_{af}} u_c(P_{af}) \quad \frac{\partial \rho_{1f}}{\partial \rho_1} u_c(\rho_1) \quad \frac{\partial \rho_{10}}{\partial P_\rho} u_c(P_\rho)$$

$$\frac{\partial \rho_{1f}}{\partial m_f} u_c(m_f) \quad \frac{\partial \rho_{10}}{\partial T_\rho} u_c(T_\rho) \quad \frac{\partial \rho_{1f}}{\partial P_\rho} u_c(P_\rho)$$

se pueden obtener por métodos numéricos, ya que las funciones  $\rho_{10}$  y  $\rho_{1f}$  son algoritmos numéricos.

Entonces

$$u(P_{a0}, \rho_{10}) = 2,009\,429\,500\,571\,278 \times 10^{-8} \times 0,209\,841 = 4,2 \times 10^{-9} \text{ kPa}$$

$$u(P_{af}, \rho_{1f}) = 2,042\,760\,000\,042\,776 \times 10^{-8} \times 0,209\,841 = 4,3 \times 10^{-9} \text{ kPa}$$

$$u(m_f, \rho_{1f}) = 3,138\,689\,863\,568\,800 \times 10^{-10} \times 0,227\,745\,43 = 7,1 \times 10^{-11} \text{ kg}$$

$$\begin{aligned} u(\rho_{10}, \rho_{1f}) &= 5,1252 \times 10^{-5} \times 3,8503 \times 10^{-5} + 1,9471 \times 10^{-1} \times 1,9470 \times 10^{-1} + 2,6430 \times 10^{-3} \\ &\quad \times 2,6429 \times 10^{-3} \\ &= 1,9734 \times 10^{-9} + 3,7910 \times 10^{-2} + 6,9852 \times 10^{-6} \\ &= 0,037\,926\,987\,173\,4 \text{ kg/cm}^3 \approx 3,8 \times 10^{-2} \text{ kg/cm}^3 \end{aligned}$$

### **Incertidumbre combinada del resultado de la medición**

La siguiente tabla muestra el resultado de evaluar en los coeficientes de sensibilidad el valor esperado de cada magnitud de entrada, la incertidumbre combinada de cada magnitud de entrada, el producto del valor del coeficiente de sensibilidad con la incertidumbre combinada de cada estimación de entrada y en la última fila se muestra la incertidumbre combinada de la medición.

Tabla 4: Cálculo de la incertidumbre combinada.

Mediciones en kilogramos

Coeficiente de sensibilidad	Resultado de la evaluación	Incertidumbre combinada	$\frac{\partial f}{\partial x_i} u_c(x_i)$
$\frac{\partial m}{\partial m_f}$	1,001 316 183 330 616 $\approx 1,0$	0,227 745 43 $\approx 0,23$	0,228 045 184 738 590 $\approx 0,23$
$\frac{\partial m}{\partial m_0}$	-1,001 324 620 777 484 $\approx -1,0$	0,227 745 43 $\approx 0,23$	-0,228 047 106 328 555 $\approx -0,23$
$\frac{\partial m}{\partial T_{af}}$	-0,042 972 322 860 630 $\approx -0,043$	0,209 841 $\approx 0,21$	-0,009 017 355 201 397 $\approx -1,0 \times 10^{-2}$
$\frac{\partial m}{\partial T_{a0}}$	5,292 339 842 908 513 $\times 10^{-6}$ $\approx 5,3 \times 10^{-6}$	0,209 841 $\approx 0,21$	1,110 549 884 975 765 $\times 10^{-6}$ $\approx 1,1 \times 10^{-6}$
$\frac{\partial m}{\partial P_{af}}$	0,010 486 262 520 967 $\approx 0,010$	0,209 841 $\approx 0,21$	0,002 200 447 813 662 $\approx 2,2 \times 10^{-3}$
$\frac{\partial m}{\partial P_{a0}}$	1,318 182 292 397 547 $\times 10^{-6}$ $\approx 1,3 \times 10^{-6}$	0,209 841 $\approx 0,21$	2,766 086 904 189 936 $\times 10^{-7}$ $\approx 2,8 \times 10^{-7}$
$\frac{\partial m}{\partial Hr_f}$	0,001 688 279 236 241 $\approx 0,002$	0,209 841 $\approx 0,21$	-3,542 702 032 120 022 $\times 10^{-4}$ $\approx -3,5 \times 10^{-4}$
$\frac{\partial m}{\partial Hr_0}$	1,878 516 870 756 030 $\times 10^{-7}$ $\approx 1,9 \times 10^{-7}$	0,209 841 $\approx 0,21$	3,941 898 586 763 161 $\times 10^{-8}$ $\approx 3,9 \times 10^{-8}$
$\frac{\partial m}{\partial \rho_{lf}}$	-0,015 155 738 533 040 $\approx -0,015$	0,600 582 944 198 521 $\approx 0,60$	-0,009 102 278 069 676 $\approx -9,1 \times 10^{-3}$
$\frac{\partial m}{\partial \rho_{l0}}$	1,905 140 045 478 505 $\times 10^{-6}$ $\approx 1,9 \times 10^{-6}$	0,433 386 931 386 407 $\approx 0,43$	8,256 627 981 712 890 $\times 10^{-7}$ $\approx 8,3 \times 10^{-7}$
$\frac{\partial m}{\partial \rho_p}$	1,831 574 252 999 405 $\times 10^{-4}$ $\approx 1,8 \times 10^{-4}$	300	0,054 947 227 589 982 $\approx 5,4 \times 10^{-2}$
$\frac{\partial m}{\partial m_v}$	1	0,031 996 $\approx 0,032$	0,031 996 $\approx 3,1 \times 10^{-2}$

Mediciones en kilogramos

Coeficiente de sensibilidad	Resultado de la evaluación	Incertidumbre combinada	$\frac{\partial f}{\partial x_i} u_c(x_i)$
$\frac{\partial m}{\partial m_r}$	1	0,4	0,4
$u_c(m) =$			0,517 901 69 2 $\approx 0,52$

### Régimen *start-stop* dinámico

En el régimen *start-stop* dinámico la incertidumbre se estima mediante el mismo modelo matemático que el del régimen *start-stop* estático, la única diferencia es que se hace necesario incluir una nueva fuente de incertidumbre que influye significativamente en la medición, esta nueva fuente se refiere a la válvula desviadora.

### Incertidumbre de la válvula desviadora

#### Modelo matemático

Al plantear el modelo matemático nos centraremos en medir la masa a adicionar al tanque gravimétrico, dicha variación de masa es provocada por los efectos de la válvula desviadora; esto puede ser analizado en dos pasos:

Paso 1: Durante la activación de la válvula desviadora la mitad del fluido que pasa por ella debe ser agregado a la masa total que mide el tanque gravimétrico, pues el metro contador bajo prueba va a contar ese fluido,

Paso 2: Durante la desactivación de la válvula desviadora, la mitad del fluido que pasa por ella cae en el tanque gravimétrico y el metro bajo prueba no lo cuenta, por lo tanto, esa masa hay que restársela a la masa total que se mide en el tanque gravimétrico,

Según lo expuesto antes el modelo matemático queda:

$$m_{adicionar} = \frac{Q(t_{af} - t_{a0})}{2} - \frac{Q(t_{df} - t_{d0})}{2} = \frac{Q}{2} [(t_{af} - t_{a0}) - (t_{df} - t_{d0})]$$

Dónde:

$m_{adicionar}$  : masa a adicionar al tanque gravimétrico (kg)

$Q$  : flujo (kg/s)

$t_{af}$  : tiempo final de la activación (s)

$t_{a0}$  : tiempo inicial de la activación (s)

$t_{df}$  : tiempo final de la desactivación (s)

$t_{d0}$  : tiempo inicial de la desactivación (s)

Si el tiempo en activación es menor que el tiempo en desactivación entonces la masa quedaría con signo negativo, o sea se le restaría esa masa a la masa total medida,

Una vez planteado el modelo matemático es necesario estimar las magnitudes de entrada.

### **Magnitud de entrada**

Las magnitudes de entrada que se presentan, para los tiempos, están basadas en datos reales que se han ido recopilando, la única suposición es que como se está estimando la mayor incertidumbre entonces se toma como flujo, el máximo flujo que se puede pasar por las líneas en la instalación el cual es de 400 000 kg/h que al transformarlo a kg/s es aproximadamente 112 kg/s

Entonces las magnitudes de entrada son:

$$Q = 112 \text{ kg/s}$$

$$t_{a0} = 120 \text{ s}$$

$$t_{d0} = 600 \text{ s}$$

$$t_{af} = 120,105\ 429\ 696 \text{ s}$$

$$t_{df} = 600,086\ 757\ 952 \text{ s}$$

### **Incertidumbre típica de las magnitudes de entrada**

Se conoce que la variación de flujo puede ser hasta un cinco por ciento, por tanto, se asume que el flujo se encuentre con igual probabilidad en ese intervalo, o sea una distribución rectangular.

$$u(Q) = \frac{5\%Q}{\sqrt{3}} = \frac{5,6}{\sqrt{3}} = 3,2332 \text{ kg/s}$$

Además, el instrumento de medir el tiempo no se encuentra calibrado ni verificado, por lo que se asume que el valor de la indicación se encuentre con la misma probabilidad dentro de los límites de su error máximo permitido.

$$u(t_{a0}) = u(t_{d0}) = u(t_{af}) = u(t_{df}) = \frac{EMP}{\sqrt{3}} = \frac{0,001}{\sqrt{3}} = 0,000\ 577\ 350\ 269\ 189\ 625\ 8 \text{ s} \approx 0,58 \text{ ms}$$

### **Resultado de la medición**

$$m_{adicionar} = \frac{1,045\ 617\ 664\ 001\ 725 + 0,071\ 361\ 27}{\sqrt{3}} = 0,644\ 888\ 088\ 225\ 037 \text{ kg} \approx 0,64 \text{ kg}$$



### Estimación de la incertidumbre típica combinada

La siguiente tabla muestra el resultado de evaluar en los coeficientes de sensibilidad el valor esperado de cada magnitud de entrada, la incertidumbre combinada de cada magnitud de entrada, el producto del valor del coeficiente de sensibilidad con la incertidumbre combinada de cada estimación de entrada y en la última fila se muestra la incertidumbre combinada de la medición.

Tabla 5: Cálculo de la incertidumbre combinada.

Mediciones en kilogramos

Coeficiente de sensibilidad	Resultado de la evaluación	Incertidumbre combinada	$\frac{\partial f}{\partial x_i} u_c(x_i)$
$\frac{\partial m_{adicionar}}{\partial Q}$	0,009 335 872 000 01 5 $\approx 9,3 \times 10^{-3}$	3,233 161 507 461 904 $\approx 3,2$	0,030 184 381 989 04 0 $\approx 3,0 \times 10^{-2}$
$\frac{\partial m_{adicionar}}{\partial t_{df}}$	56	0,000 577 350 269 189 62 6 $\approx 5,7 \times 10^{-4}$	0,032 331 615 074 61 9 $\approx 3,2 \times 10^{-2}$
$\frac{\partial m_{adicionar}}{\partial t_{a0}}$	-56	0,000 577 350 269 189 62 6 $\approx 5,7 \times 10^{-4}$	- 0,032 331 615 074 61 9 $\approx -3,2 \times 10^{-2}$
$\frac{\partial m_{adicionar}}{\partial t_{df}}$	-56	0,000 577 350 269 189 62 6 $\approx 5,7 \times 10^{-4}$	- 0,032 331 615 074 61 9 $\approx -3,2 \times 10^{-2}$
$\frac{\partial m_{adicionar}}{\partial t_{a0}}$	56	0,000 577 350 269 189 62 6 $\approx 5,7 \times 10^{-4}$	0,032 331 615 074 61 9 $\approx 3,2 \times 10^{-2}$
$u_c(m_{adicionar}) =$			0,071 361 27 $\approx 7,1 \times 10^{-2}$

Una vez obtenido el valor del mensurando y el valor de su incertidumbre combinada asociada, entonces se procede a estimar la mayor incertidumbre que puede ser causada por los efectos de la válvula desviadora sobre la medición:

Entonces se suma al valor del mensurando a su incertidumbre combinada y se asume que existe una probabilidad igual de que el error tome cualquier valor dentro de estos límites; es decir, una distribución de probabilidad rectangular.

Por lo que:

$$u_c(m_{válvula}) = \frac{m_{adicionar} + u_c(m_{adicionar})}{\sqrt{3}} = \frac{1,045\ 617\ 664\ 001\ 725 + 0,071\ 361\ 27}{\sqrt{3}} =$$
$$0,644\ 888\ 088\ 225\ 037\ kg \approx 0,64\ kg$$

Este procedimiento se realiza de esta manera ya que a la medición de masa del tanque gravimétrico no se le realiza la corrección de la masa a adicionar por los efectos de la válvula desviadora.

Con la estimación de la incertidumbre del régimen *start-stop* estático y la introducida por la válvula desviadora es posible estimar entonces la incertidumbre del régimen *start-stop* dinámico.

### **Incertidumbre combinada del régimen *start-stop* dinámico**

La estimación de la incertidumbre del régimen *start-stop* dinámico se realiza a partir de la incertidumbre del régimen *start-stop* estático y la introducida por la válvula desviadora. Esto se debe a que las fuentes que intervienen en el régimen dinámico son las mismas que las del régimen estático con la única diferencia que en el dinámico entra en juego una nueva fuente que es la introducida por la válvula desviadora. Por lo tanto, para estimar la incertidumbre de este régimen se suman cuadráticamente estas incertidumbres.

No es necesario estimar las correlaciones entre el modelo del régimen *start-stop* estático y el modelo de la válvula desviadora pues estos no tienen variables en común. Entonces:

$$u_c(m_{dinámico}) = \sqrt{u_c^2(m_{estacionario}) + u_c^2(m_{válvula})} = \sqrt{u_c^2(m) + u_c^2(m_{válvula})}$$

$$u_c(m_{dinámico}) = \sqrt{(0,517\ 901\ 692)^2 + (0,644\ 888\ 088\ 225\ 037)^2}$$

$$u_c(m_{dinámico}) = 0,827\ 105\ 077\ 309\ 411\ kg \approx 0,83\ kg$$

### **Conclusiones**

- 1) Se estimó la mayor incertidumbre que puede reflejar una medición realizada en el sistema gravimétrico por el régimen *start-stop* estático.
- 2) Se estimó la mayor incertidumbre que puede ser provocada por la influencia de la válvula desviadora sobre la medición en el sistema gravimétrico.
- 3) Se estimó la mayor incertidumbre que puede reflejar una medición realizada en el sistema gravimétrico por el régimen *start-stop* dinámico a partir de la incertidumbre del régimen *start-stop* estático y la introducida por la influencia de la válvula desviadora en la medición.
- 4) Se documentaron los resultados de incertidumbres combinadas en ambos regímenes.

### **Recomendaciones**

- 1) Realizar varias mediciones en condiciones de repetibilidad para estimar la incertidumbre Tipo A de todas las magnitudes de entrada y la correlación existente entre ellas.
- 2) Realizar observaciones repetidas en el flujo de 112 kg/s para estimar la incertidumbre Tipo A de las magnitudes de entrada que intervienen en el modelo matemático de la masa a adicionar al tanque gravimétrico debido a las variaciones de esta ocasionadas por la válvula desviadora.
- 3) Estudiar el comportamiento de la acumulación de líquido en la válvula desviadora para poder evaluar la incertidumbre ocasionada por esta fuente.
- 4) Investigar las propiedades físicas del líquido que se utiliza en la calibración para poder estimar correctamente la incertidumbre por evaporación de este.

### **Bibliografía utilizada:**

1. Buoyancy Correction and Air Density Measurement, National Physical Laboratory (NPL) Good Practice Guidance.
2. NC OIML R 76-1:1999. Instrumentos de pesar no automáticos. Parte 1: Requerimientos metrológicos y técnicos. Ensayo.
3. Flow Measurement Uncertainty and Data Reconciliation. Good practice guide.
4. The calibration of flow meters. Good practice guide.
5. Operativa en Laboratorio de LCPC, 10 de Febrero del 2014.
6. NC OIML R 76-2: 2000. Instrumentos de pesar no automáticos. Parte 2: Informe de evaluación de modelo, 2000.
7. OIML R 111-1:2004. Weights of classes E1, E2, F1, F2, M1, M1-2, M2, M2-3 and M3. Part 1: Metrological and technical requirements, 2004.
8. OIML R 111-2:2004. Weights of classes E1, E2, F1, F2, M1, M1-2, M2, M2-3 and M3. Part 2: Test Report Format, 2004.
9. OIML R 117-1:2007. Dynamic measuring systems for liquids other than water. Part 1: Metrological and technical requirements, 2007.
10. NC OIML R 111-1: 2007. Pesas de clases E1, E2, F1, F2, M1, M1-2, M2, M2-3, Y M3 — Parte 1: Requisitos metrológicos y técnicos (OIML R 111-1:2004, IDT), 2007.
11. Guidelines on the determination of uncertainty in gravimetric volume calibration, 2012-3.
12. ISO 10790:2015. Measurement of fluid flow in closed conduits — Guidance to the selection, installation and use of Coriolis flowmeters (mass flow, density and volume flow measurements), 2015-04-01.

13. Manual of Petroleum Measurement Standards. Chapter 11—Physical Properties Data. Section 1—Temperature and Pressure Volume Correction Factors for Generalized Crude Oils, Refined Products, and Lubricating Oils. MAY 2004.
14. Engel WPaR, The Concept of a New Primary Standard for Liquid Flow Measurement at PTB Braunschweig, 1998-06-17.
15. Environ TJE, Estimation of Uncertainty of Air Buoyancy Correction for Establishment of Primary Mass Standards, 2000.
16. Josef I, Shinder IVM, NIST Calibration Services for Water Flowmeters Water Flow Calibration Facility, 2006-08.
17. J, W, Chung MB, M, Firlus, W, G, Lee, R, Schwartz, Bilateral comparison of buoyancy artefacts between PTB and KRIS. S.
18. Karina Chacur Schraml VR, Uncertainty and error evaluation of a flow diverter valve actuated by a pneumatic piston, 2006-09-22
19. Mena JJA, Dynamic weighing calibration method for liquid flowmeters – A new approach, 2011-12-13
20. Mena JJA, Dynamic weighing calibration method for liquid flowmeters – A new approach, 2011-12-13
21. R. Engel UK, A Novel Approach to Improve Diverter Performance in Liquid Flow Calibration Facilities.
22. Rainer Engel, Performance improvement of liquid flow calibrators by applying special measurement and control strategies, 2003
23. Rainer Engel, New-design dual-balance gravimetric reference system with PTB's new 'hydrodynamic test field', 2003-14-12
24. Randall M, Schoonover FEJ, Air Buoyancy Correction in High-Accuracy Weighing on Analytical Balances, 1981.
25. VABSON V, Measurement uncertainty in Estonian Standard Laboratory for Mass, 2013.
26. W, Poeschel RE, D, Dopheide, A unique fluid diverter design for water flow calibration facilities. Inédito
27. Yi-Lin Ho W-TL, I-Cheng Chen, Measurement System Validation Procedure for Low Viscosity Oil Flow System-Weighing Method, 1996-05-25
28. ISO/IEC Guide 98-3:2008, Guide to the expression of uncertainty in measurement.
29. JCGM 200: 2012 International vocabulary of metrology -Basic and general concepts and associated terms (VIM).
30. NC/JCGM 2008:2012 Evaluación de datos de medición. Guía para la Expresión de la Incertidumbre de Medida.

31. NC/OIML V2:2012 Vocabulario Internacional de Metrología- Conceptos fundamentales y generales, y términos asociados (VIM).

**Fecha de recepción del artículo: 2017-07-24**

**Fecha de aceptación del artículo: 2017-08-24**

**Ponencia aprobada para su presentación en el 10mo. Simposio Internacional Metrología 2017**

**Calibración de los flujómetros patrones del Laboratorio de Calibración de Fluómetros para Combustibles Claros de CUPET**

**Autores:** Ing. Maritza Hernández Apaceiro<sup>1</sup> [maritzah@inimet.cu](mailto:maritzah@inimet.cu)

Lic. Yan Carlos Leyva Labrador<sup>2</sup> [yancarlos@inimet.cu](mailto:yancarlos@inimet.cu)

Ing. Regla Inchaurtieta Ramos<sup>3</sup> [regla@inimet.cu](mailto:regla@inimet.cu)

<sup>1</sup>Ingeniera Mecánica, Jefe del Laboratorio de Volumen INIMET

<sup>2</sup> Licenciado en Matemática, Especialista en Metrología, Aspirante a Investigador, Laboratorio de Volumen INIMET;

<sup>3</sup> Ingeniera Mecánica, Especialista en Metrología, INIMET

**Resumen**

El objetivo del presente trabajo es exponer el procedimiento desarrollado por el Laboratorio de Volumen del INIMET para calibrar los flujómetros másicos patrones instalados en el Laboratorio de Calibración de Fluómetros para Combustibles Claros, perteneciente a la Empresa Cubana del Petróleo (CUPET). Esta calibración se realiza por primera vez en Cuba por ser una instalación adquirida como parte del plan de inversiones de flujometría desarrollado por CUPET para elevar los niveles de exactitud en el campo de las mediciones de combustible.

Los flujómetros patrones son del tipo Coriolis, tecnología de amplia utilización en el mundo para la medición exacta tanto de flujo como de cantidades de líquidos y de gases, pero su empleo en el país es relativamente nuevo. El Laboratorio de Calibración de flujómetros es el primero y único de su tipo en el país por lo que no se disponía de experiencia en la utilización de una instalación de este tipo, con elevados parámetros metrológicos y tecnología de punta.

Los flujómetros se calibraron por el método gravimétrico, con un instrumento de pesar clase II constituido por tres celdas de carga y el dispositivo de indicación. Se requirió más de una calibración a cada flujómetro, ejecutadas antes y después de su ajuste respectivamente.

Se comprobaron seis puntos del rango de medición de los flujómetros, en alguno de los cuales, en las condiciones de operación de la instalación, no se cumple el error requerido igual a  $\pm 0,05$  %. Se constató que la incertidumbre asociada a la indicación del volumen es mayor que la esperada, por lo que se debe realizar el estudio que permita caracterizar la instalación a fin de mejorar los parámetros metrológicos de los flujómetros y disminuir la incertidumbre de la calibración.

## **Introducción**

El Laboratorio de Calibración de Fluómetros para Combustibles Claros de CUPET (en lo adelante "LCPC") posee tres flujómetros tipo Coriolis (en lo adelante "*master meter*") de 3", 6" y 10" respectivamente, los cuales son patrones de trabajo destinados a la calibración/verificación de los metro contadores ubicados en las terminales de carga y descarga de combustible y en la industria en general. Los flujómetros forman parte de la inversión y habían sido calibrados en las instalaciones del fabricante.

En cumplimiento de las regulaciones vigentes en el país para los patrones que se utilizan en el campo de la metrología legal y con vista al aprovechamiento máximo de la capacidad técnica de la inversión, el INIMET realizó la calibración en la propia instalación, en el régimen normal de trabajo de los *master meter*. Además, se consideró el elevado encarecimiento que representaba una calibración realizada por un Instituto Nacional de Metrología (NMI) en el extranjero.

La calibración se realizó por el método gravimétrico según la metodología planteada en la ISO 10790:2015 *Measurement of fluid flow in closed conduits — Guidance to the selection, installation and use of Coriolis flowmeters (mass flow, density and volume flow measurements)* y de acuerdo con la OIML R 117:2007 *Dynamic measuring systems for liquids other than water Part 1: Metrological and technical requirements*.

Los *master meter* se ubican en el segundo nivel de la cadena de trazabilidad metrológica para la medición de flujo y esta primera calibración permitió estimar la incertidumbre asociada a sus resultados y evaluar la exactitud de los flujómetros en las condiciones reales de explotación.

## **Desarrollo**

### **1. Objetivo y alcance de la instalación**

Calibración de flujómetros utilizados para combustibles claros en el intervalo de medición desde 10 m<sup>3</sup>/h hasta 500 m<sup>3</sup>/h con diámetros nominales desde 1" hasta 10", con error mayor o igual que 0,05 %

### **2. Instrumentos de medición patrones y auxiliares empleados durante la calibración**

Para la calibración de los flujómetros se utilizó el sistema de medición gravimétrico que constituye el patrón de más elevada jerarquía del laboratorio y establece la trazabilidad metrológica para la calibración de los *master meter* del LCPC.

El sistema de medición gravimétrico con Certificado de Calibración No. CU01-14851-1-C está constituido por los siguientes elementos:

<b><u>Instrumento de medición y No. de serie</u></b>	<b><u>Certificado de Calibración</u></b>
Transductor de presión No. 91P516626	CU01-59549-1-C
Transductor de presión No. 91P516625	CU01-59549-2-C
Transductor de presión No. 91P516627	CU01-59549-3-C
Transductor de presión No. 91P516350	CU01-59549-4-C
Transductor de presión No. 91P516361	CU01-59549-5-C
Transductor de presión No. 91P516360	CU01-59549-6-C
Transductor Termorresistivo No. 075 14004800/02	CU01-59550-1-C
Transductor Termorresistivo No. 075 14004800/01	CU01-59550-2-C
Transductor Termorresistivo No. 075 14004800/03	CU01-59550-3-C
Transductor Termorresistivo No. 075 14004803/01	CU01-59550-4-C
Transductor Termorresistivo No. 075 14004801/01	CU01-59550-5-C
Transductor Termorresistivo No. 075 14004802/01	CU01-59550-6-C
Transductor Termorresistivo No. 075 14015690/01	CU01-59550-7-C
Instrumento de pesar No. 3031600100	CU01-14852-1-C
Densímetro oscilatorio No. 10033320	*

Se midió una muestra de turbo combustible. Reporte de Medición No. 14854-01

También es parte del sistema de medición gravimétrico, una válvula *diverter* con un tiempo de cambio (*on-off*) menor que 130 ms .

### **3. Preparación para la calibración**

- a) Condiciones ambientales:  $(25 \pm 10)$  °C y humedad relativa  $(60 \pm 20)$  %
- b) El flujómetro instalado de acuerdo con las recomendaciones del fabricante.
- c) Los instrumentos de medición del sistema de medición gravimétrico se correspondan con los descritos en el Certificado de Calibración de dicho sistema.

### **4. Ejecución de la calibración**

#### **4.1 Examen exterior**

Se realiza un examen visual del *master meter* y se revisa que no presente daños visibles.



#### 4.2 Comprobación preliminar

- a) Se realiza una corrida durante diez minutos para la estabilización de la temperatura y el llenado completo de las tuberías para prevenir cualquier efecto por la presencia de aire en el sistema.
- b) Ajuste del cero: Se establece (y se comprueba) una condición de cero flujo en el banco de calibración, De ser necesario el ajuste del cero, se realizará de acuerdo con las instrucciones del fabricante y solamente al comienzo de la calibración, no entre corridas.
- c) Se confecciona la “receta” de la prueba, que consiste en introducir los parámetros de entrada: la cantidad a medir, el tiempo de la corrida en el caso de *start/stop* estática, los flujos, la bomba de impulsión a utilizar, la identificación del máster meter y de la línea de calibración.

#### 4.3 Determinación de los parámetros metrologicos

##### 4.3.1 Consideraciones generales:

- a) La calibración se realiza por el método gravimétrico con la correspondiente corrección por la fuerza de empuje del aire, Se utilizan dos técnicas:
  - *Start/stop* dinámica, en la cual la colección de datos comienza y termina mientras el fluido se mantiene en movimiento a un flujo estable. La válvula *diverter* dirige el fluido hacia el interior del tanque pesa y hacia el tanque nodriza (de almacenamiento del líquido de prueba),
  - *Start/stop* estática: La colección de datos comienza y termina a condiciones de cero flujo. En este caso, el tiempo de la corrida es suficiente para considerar los errores provocados por las variaciones en el flujo al comienzo y al final de la corrida.
- b) De acuerdo con la OIML R 117-1:2007, la calibración se realiza en seis flujos uniformemente distribuidos en el intervalo de medición del flujómetro, con tres repeticiones en cada flujo.
- c) El flujo se mantendrá estable dentro del  $\pm 5\%$  durante la calibración al flujo seleccionado.
- d) Durante el proceso de calibración las variaciones de presión y temperatura en el fluido serán mínimas. Para una misma corrida la temperatura no variará más de  $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

##### 4.3.2 Descripción del método gravimétrico.

- a) El líquido de prueba se colecta en el tanque pesa, cuya masa se determina antes del comienzo de la corrida y después de finalizada la misma. La diferencia entre ambas lecturas es la masa de líquido colectado en el tanque pesa.
- b) Durante la ejecución del ciclo de la corrida, los datos se registran y procesan automáticamente mediante el software instalado.
- c) El resultado de la calibración se obtiene comparando la masa medida por el flujómetro con la colectada en el tanque pesa.

## Resultados

- Para una mayor seguridad en los cálculos y para corroborar los resultados obtenidos con el software del LCPC, el Laboratorio de Volumen elaboró una hoja de cálculo en Excel y realizó el procesamiento de los datos auxiliándose del programa Matlab, lo cual permitió detectar errores en el software que fueron analizados con el cliente para su posterior subsanación.
- Se registró un total de 214 mediciones para la calibración de los tres *master meter*, La primera de las cuales se realizó acabados de instalar. Después del proceso de ajuste se llevó a cabo la segunda calibración y el flujómetro de 3 pulgadas requirió una tercera calibración.
- Los flujómetros se calibraron en seis flujos dentro de su rango de medición y cada calibración se ejecutó en dos regímenes de trabajo diferentes: *start/stop* estático y *start/stop* dinámico respectivamente.
- En las Tablas 1 a 3 aparecen resumidos:
  - Régimen de trabajo en el cual se calibró,
  - Intervalo de valores:
    - Por el cual transitó durante las corridas de prueba, tanto la densidad a la temperatura de referencia de 15 °C como el flujo (másico y volumétrico).
    - En el cual se encuentran los errores de medición en los seis flujos comprobados.
    - En el cual se encuentran las incertidumbres expandidas en masa y en volumen con un factor de cobertura  $k = 2$  para un nivel de confianza de 95 % .

Tabla 1. Resumen de los resultados de las calibraciones del flujómetro de 3 pulgadas número de serie G140000004702234

Régimen	Densidad a 15 °C, kg/m <sup>3</sup>	Flujo en que se calibra		Error, %	U en masa %	U en volumen %
		kg/h	L/h			
Estático	782,6 a 794,9	31 098 a 76 828	39 693 a 97 999	-0,02 a 0,06	0,03 a 0,04	0,15 a 0,23
Dinámico	783,1 a 794,9	31 236 a 77 738	39 868 a 99 206	0,00 a 0,07	0,04 a 2,15	0,15 a 2,16

En la tabla 1 se observa que los rangos de la densidad muestran variaciones significativas cuyo análisis determinó que se deben a errores en la programación del software de la instalación.

Tabla 2- Resumen de los resultados de las calibraciones del flujómetro de 6 pulgadas número de serie G14000008802628

Régimen	Densidad a 15 °C, kg/m <sup>3</sup>	Flujo en que se calibra		Error, %	U en masa %	U en volumen %
		kg/h	L/h			
Estático	794,8 a 795,0	26 348 a 277 987	33 625 a 354 757	-0,07 a 0,00	0,04 a 0,07	0,15 a 0,17
Dinámico	794,6 a 794,8	26 395 a 322 824	33 585 a 412 081	0,00 a 0,16	0,05 a 0,62	0,16 a 0,65

Tabla 3- Resumen de los resultados de las calibraciones del flujómetro de 10 pulgadas número de serie G14000008902352

Régimen	Densidad a 15 °C, kg/m <sup>3</sup>	Flujo en que se calibra		Error, %	U en masa %	U en volumen %
		kg/h	L/h			
Estático	794,3 a 794,6	69 941 a 348 029	89 358 a 445 069	-0,01 a 0,40	0,05 a 0,11	0,16 a 0,18
Dinámico	794,4 a 794,7	69 474 a 389 708	88 819 a 499 092	-0,08 a -0,01	0,09 a 0,38	0,19 a 0,41

En las Tablas 1 a 3 se observa:

- Que para un mismo flujómetro existe diferencia en los flujos máximos de los dos regímenes (estático y dinámico) atribuida a errores de programación.
- Una diferencia significativa entre la incertidumbre en masa y en volumen debido a la incertidumbre reportada en el Reporte de Mediciones Especiales del densímetro de la instalación.
- Que los flujómetros no cumplen con el error igual a  $\pm 0,05$  % en todo su rango de medición.

Para la estimación de la incertidumbre de la calibración se incluye como principal fuente, aquella asociada al sistema de medición gravimétrico (SG)  $U = 1,65$  kg con un factor de cobertura  $k=2$ , en cuya evaluación se consideraron todas las fuentes que intervienen en la medición gravimétrica, excepto la incertidumbre asociada a la repetibilidad de las mediciones.

Por lo anterior, para las magnitudes de entrada que aparecen en el modelo matemático (1) solamente se estimó la incertidumbre asociada a la repetibilidad.

Modelo matemático:

$$e = m_m - \left\{ m_f \left[ 1 + \rho_{af} \left( \frac{1}{\rho_{lf}} - \frac{1}{\rho_p} \right) \right] - m_0 \left[ 1 + \rho_{a0} \left( \frac{1}{\rho_{l0}} - \frac{1}{\rho_p} \right) \right] \right\} + SG \quad (1)$$

Donde:

$e$  : error de medida

$m_m$  : Masa indicada por el flujómetro, kg

$m_f$  : Masa final en el tanque pesa, kg

$m_0$  : Masa inicial en el tanque pesa, kg

$\rho_{a0}$  : Densidad inicial del aire, kg/m<sup>3</sup>

$\rho_{l0}$  : Densidad inicial del líquido en el tanque pesa, kg/m<sup>3</sup>

$\rho_{af}$  : Densidad final del aire, kg/m<sup>3</sup>

$\rho_{lf}$  : Densidad final del líquido en el tanque pesa, kg/m<sup>3</sup>

$\rho_p$  : Densidad de las pesas con que fue calibrado el tanque pesa, kg/m<sup>3</sup>

$SG$ : Sistema de medición gravimétrico

La calibración de los flujómetros en el país representó un considerable ahorro de divisas.

En el análisis del costo de una calibración en el extranjero se requiere evaluar, además de la tarifa establecida por el laboratorio que la ejecute, los gastos de desmontaje, transportación y posterior reinstalación del flujómetro en su posición de trabajo, así como la afectación económica por el tiempo que permanece fuera de servicio,

El cobro del servicio depende fundamentalmente del principio de funcionamiento del instrumento, de su exactitud, diámetro nominal y de la cantidad de puntos a calibrar, así como de los ajustes que se requieran según las necesidades del cliente. Adicionalmente, en cumplimiento de las regulaciones vigentes en Cuba, se establecen requisitos adicionales para el laboratorio que ejecute la calibración de los instrumentos que se utilicen para ejercer la metrología legal. En el caso de los flujómetros patrones del LCPC, la calibración en el extranjero tendría un costo de 12 000 USD aproximadamente, por cada uno.

El procedimiento descrito se aplica a todos los *master meter*, tanto del Servicio Nacional de Metrología como de la Empresa de Mantenimiento del Petróleo (EMPET) incluidos los laboratorios móviles (patines de calibración) de los cuales en la actualidad hay tres en el país: uno de la EMPET, uno de CUVENPETROL y otro de la Unión Eléctrica, lo cual, sin incluir las inversiones previstas, hace un total de quince flujómetros patrones, por lo que la cifra asciende a 180 000 USD.

El trabajo realizado contribuye a un mejor control de los combustibles claros en toda la red de distribución del producto, tanto de CUPET como de otros organismos de la economía nacional.

### **Conclusiones**

1. Se elaboró un procedimiento para la calibración de los flujómetros patrones del LCPC.
2. Se comprobó que con la incertidumbre asociada a la medición de la densidad no se garantiza la trazabilidad metrológica de la magnitud de volumen en la instalación.
3. Se evidenció que los errores de los flujómetros en sus condiciones de instalación en el LCPC no cumplen en todo el rango de medición con el valor especificado por el fabricante igual a  $\pm 0,05 \%$
4. Los resultados obtenidos están afectados por los siguientes aspectos:
  - El comportamiento no lineal de los *master meter*.
  - El LCPC transita por un período de acondicionamiento a sus condiciones reales de explotación, lo cual incluye a su *master meter*, en cuyo funcionamiento y parámetros metrológicos inciden las condiciones de operación.
  - La inexperiencia en el uso de la tecnología instalada en el LCPC.
5. La calibración de los *master meter* constituyó un ejercicio científico técnico importante para el conocimiento de nuevas técnicas que cada día ganan más espacio en la industria cubana.

### **Recomendaciones**

1. Realizar un estudio para la caracterización del LCPC, a partir del cual, se podrán determinar y corregir los factores que afectan la exactitud de los flujómetros y permitirá la disminución de su incertidumbre de calibración.
2. Calibrar el densímetro preferiblemente en sus condiciones reales de operación, tal como se recomienda en la ISO 10790:2015
3. Recalibrar el sistema de medición gravimétrico y los *master meter* en un período de seis meses.
4. Corregir los procedimientos internos del software para obtener los resultados correctos.

### **Agradecimientos**

Agradecemos al Dr.C. José Ignacio Franco y al Ing. Eddy Turiño Echevarría por su contribución al desarrollo de este trabajo.

**Bibliografía**

- ANSI/API MPMS Chapter 5,6 Measurement of Liquid Hydrocarbons by Coriolis Meters (2002)
- OIML R 117 Partes 1 y 2 Dynamic measuring systems for liquids other than water
- ISO 4185:1980, Measurement of liquid flow in closed conduits --Weighing method
- Traducción al español del VIM-3ª, 2008
- ISO 10790:2015 Measurement of fluid flow in closed conduits — Guidance to the selection, installation and use of Coriolis flowmeters (mass flow, density and volume flow measurements)
- Stacy, Philip S., Water on line. Best Practices For Flow Meter Calibration, Alden Research Laboratory, Abril 2016

**Fecha de recepción del artículo: 2017-07-24**

**Fecha de aceptación del artículo: 2017-09-04**

**Ponencia aprobada para su presentación en el 10mo. Simposio Internacional Metrología 2017**

**Puesta en Marcha del Laboratorio de Calibración de Fluómetros para Productos Claros de CUPET (LCPC).**

**Autores:**

Dr. C. José Franco Fernández<sup>1</sup>, Ing. Eddy Turiño Echevarría<sup>2</sup>, Ing. Ramón Mendoza Sánchez<sup>2</sup>, Ing. Francisco Pérez Bell<sup>1</sup>, Ing. Analía Hugues Muñoz<sup>1</sup>, Ing. José E. Tamayo Lestón<sup>1</sup>, Ing. Armando Estévez Alonso<sup>1</sup>; Ing. Maritza Hernández Apaceiro<sup>3</sup>, Ing. José A. León<sup>4</sup>, Ing. José Hernández<sup>4</sup>, Ing. José I. Romero<sup>5</sup>, Ing. Pablo Pascual Hueso<sup>5</sup>, Ing. Jesus M. Hernández Rodríguez<sup>6</sup>

<sup>1</sup>Empresa de Informática, Automática y Comunicaciones CUPET, TECNOMÁTICA

<sup>2</sup>Empresa de Mantenimiento del Petróleo, CUPET, EMPET

<sup>3</sup>Instituto Nacional de Investigaciones en Metrología, INIMET

<sup>4</sup>Krohne Iberia, Krohne, España

<sup>5</sup>Guadarrama Flow, G –Flow, España

<sup>6</sup>Fondon Redes y Fluidos, FRF, España-Cuba

E-mail: <sup>1</sup>[aestevez@tm.cupet.cu](mailto:aestevez@tm.cupet.cu); <sup>2</sup>[rmendoza@empet.cupet.cu](mailto:rmendoza@empet.cupet.cu); <sup>3</sup>[maritza@inimet.cu](mailto:maritza@inimet.cu); <sup>4</sup>[j.hernandez@krohne.com](mailto:j.hernandez@krohne.com); <sup>5</sup>[j.leon@krohne.com](mailto:j.leon@krohne.com); <sup>5</sup>[ingenieria@q-flow.com](mailto:ingenieria@q-flow.com); <sup>6</sup>[comercialhabana@fondon.co.cu](mailto:comercialhabana@fondon.co.cu).

**Resumen**

En el presente trabajo se exponen los resultados del trabajo desarrollado para la puesta en marcha del Laboratorio de Calibración de Fluómetros para Productos Claros de Cupet, el cual forma parte de la Inversión de flujometría que tiene como objetivos aumentar la exactitud de las transferencias de combustibles en el país. El mismo permite garantizar la trazabilidad de los flujómetros que intervienen en la transferencia fiscal y consolidar el Aseguramiento Metrológico en este sector, disminuyendo las causas y condiciones que propician pérdidas, mejorando sustancialmente el control de portadores energéticos en las comercializadoras de CUPET y en otros sectores de la economía nacional.

**PALABRAS CLAVES:** Medición de masa y volumen de fluidos, calibración de flujómetros, aseguramiento metrológico, transferencia fiscal y de custodia de combustibles

**Abstract**

The present work shows the results of the works to starting in service the facility: Calibration Laboratory for flow meters for light oils, owned by Cuba Petroleum Enterprise (Cupet), which form part of an investment for implementation the best measurement practice using flow meters for oils, that aims to increase the accuracy of the custody transfers in the country. To ensure the traceability of the equipment involved in custody transfer and establish the metrological assurance in this sector for decreasing the causes and conditions that are conducive to the loss of products, substantially improving the control of energy carriers in the traders of CUPET and in other sectors of the national economy.

**KEY WORDS** Measurement mass and volume of fluids, flow meters calibration, metrological assurance, fiscal and custody transfer of oils

## **INTRODUCCIÓN**

Debido a una necesidad imperiosa de cumplir con las requisitos de la norma NC 994: 2013 [1] para la transferencia fiscal y de custodia de combustibles y además, aplicar un mejor control en la comercialización de los combustibles, se tomó la decisión de ejecutar una inversión para instalar flujómetros en los cargaderos y desarrollar también una cadena de trazabilidad que incluye la creación de un laboratorio de calibración de flujómetros para combustibles y de esta forma resolver nacionalmente el problema del aseguramiento metrológico con el nivel de exactitud que exige la norma, alineada con documentos internacionales como la Recomendación de la OIML R 117-1:2007 [2]. En una etapa anterior se exploraron soluciones como, por ejemplo, la aplicada por la compañía CUVENPETROL, que fue la adquisición de flujómetros patrones móviles, la cual tiene el inconveniente de que para garantizar la trazabilidad es necesario llevar los flujómetros patrones a calibrar en instalaciones competentes extranjeras, lo que implica un enorme costo. El laboratorio está concebido para su uso por Cupet y para prestar servicios en coordinación con la ONN a otros organismos de la economía nacional que lo requieran. El laboratorio tiene trazabilidad al INIMET, fundamentalmente en la magnitud masa, lo que es totalmente factible y garantiza la trazabilidad de sus flujómetros patrones de forma autónoma con su instalación gravimétrica.

## **DESARROLLO**

Como se planteó anteriormente, el problema de la trazabilidad constituye el elemento decisivo desde el punto de vista conceptual, por lo que se discutió y aprobó a los más



altos niveles de la organización y del organismo rector de la actividad ONN (Oficina Nacional de Normalización) quedando como se presenta a continuación ver Fig. 1.



Fig. 1 Esquema de trazabilidad

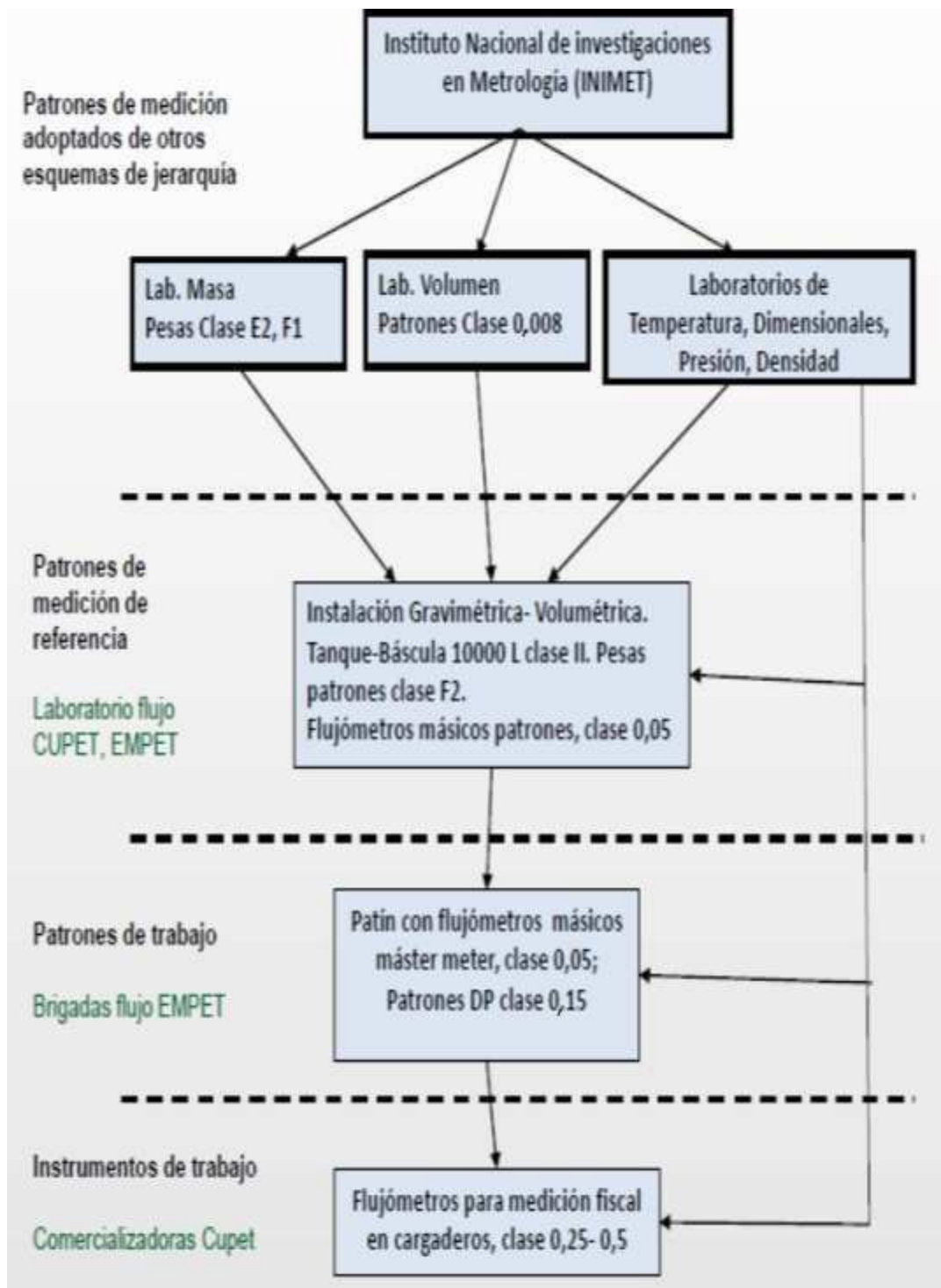


Fig. 2 Esquema detallado de Trazabilidad Metrológica de la magnitud Flujo en Cupet,

### 1. LABORATORIO DE CALIBRACIÓN

- El laboratorio se destina para la Calibración de flujómetros utilizados en

combustibles claros de los siguientes tipos: desplazamiento positivo, área variable, coriolis, ultrasónicos y otros, en el rango de (10 a 500) m<sup>3</sup>/h, con diámetros nominales de 1" a 10" con una incertidumbre expandida total de 0,05 % .

- En el mismo se podrán calibrar los patines *master meter* con clase de exactitud 0,05 así como el resto de los *master meter* de Cupet con clase de exactitud 0,10 . Ej. Smith meter "Prime 4", ó T20 , así como todos los flujómetros de proceso de refinerías, depósitos y otras instalaciones que demanden este servicio durante su mantenimiento, reparación, ajuste, puesta en marcha etc.
- Permite la calibración de flujómetros que se sometan a reparación y ajustes, (después del cambio de circuitos electrónicos y otros recambios por reparación es necesaria la determinación del "K" o constante del flujómetro, que se expresa en pulsos por kilogramo por litro). Posteriormente, durante la calibración de rutina, sólo se determina el factor del metro.

Las características más importantes del Laboratorio LCPC son:

- ✚ Diseño según especificaciones de la recomendación internacional OIML R- 117
- ✚ Línea de calibración 500 m<sup>3</sup>/h, contador patrón 10", clase 0,05
- ✚ Línea de calibración 230 m<sup>3</sup>/h, contador patrón 6", clase 0,05
- ✚ Línea de calibración 100 m<sup>3</sup>/h, contador patrón 3", clase 0,05
- ✚ Tanque de almacenamiento mayor que 20 000 L
- ✚ Tanque gravimétrico de 10 000 L, clase II, según OIML R76 [3]
- ✚ Celdas de carga del tanque gravimétrico según OILM R60: 2000 [4] clase C5
- ✚ Válvula desviadora 6" con resolución en desplazamiento de 0,2 mm , tiempo *on-off* menor que 120 ms, exactitud del cronómetro mejor que 0,001 s
- ✚ Medición de la densidad: Error medición: ±0,2 kg/m<sup>3</sup>, Repetibilidad: 0,05 kg/m<sup>3</sup>,
- ✚ Los resultados de las mediciones de volumen a temperatura de referencia de 15 °C
- ✚ Controlador de la electricidad estática.

Como se puede apreciar, el laboratorio cuenta con un tanque de almacenamiento de 20 000 L de *jet fuel*, tres líneas de calibración de diferentes dimensiones 3", 6" y 10" con tres flujómetros patrones respectivamente, e instrumentación para la medición de la densidad, temperatura y presión del medio de medición, así como para el control de las condiciones ambientales.

El esquema general del laboratorio se muestra en la Fig. 3:



Fig. 3 PID del laboratorio LCPC

El laboratorio fue diseñado por un equipo de ingenieros de las empresas cubanas Tecnomática y EMPET de Cupet y la española Fondón Redes y Fluidos con sus pares Krohne Iberia y Guadarrama Flow (G-Flow), con la participación del INIMET, de la ONN. La parte española posteriormente se ocupó de la ingeniería básica y de detalles en estrecha conjunción con Tecnomática, EMPET e INIMET. La fabricación del equipamiento del laboratorio corrió por la industria española. La EMPET, en conjunto con otras empresas como LANCOMET, SIME, EMCOR, UNE, SEPSA y fuerzas de una Cooperativa de Construcción realizaron la obra civil. El montaje y puesta en marcha del equipamiento se realizó por G Flow, EMPET, Tecnomática y Fondón Redes y Fluidos. El laboratorio está ubicado en un área con elevados requisitos de seguridad industrial. Todo el equipamiento e instrumentación cumple con requisitos de clasificación para trabajo en áreas con peligro de explosión. El equipamiento de automática y de control se encuentra en un local seguro, con un sistema especial de detección y extinción de incendios por gas NOVEC que permite la inmediata extinción con preservación del equipamiento y no afecta a los operadores. Toda el área del laboratorio cuenta con un Sistema Automático de Detección de Incendios, proyectado y ejecutado por

Tecnomática, que permite la inmediata acción de los operadores con la utilización de los medios de extinción resolver cualquier situación de este tipo.

A continuación en las Fig.4 a la 8 se muestran algunas imágenes del equipamiento del laboratorio.



Fig. 4 Tanque báscula, válvula diverter



Fig. 5 Bancos de calibración



Fig. 6 Medición de densidad en línea

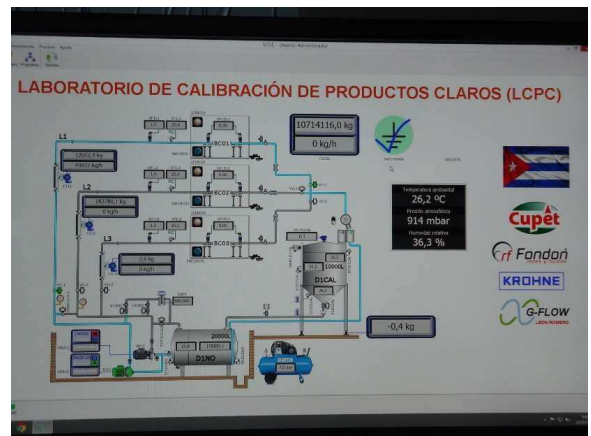


Fig. 7 Pantalla de la aplicación de control



Fig. 8 Vista de la construcción del LCPC

### **Sistema de Control Automático**

El sistema de control automático tiene una estructura modular. Uno de los módulos se ocupa del control de las válvulas, los variadores de frecuencia, las bombas, la seta de emergencia, los detectores de posición de la válvula desviadora y otros elementos. Otro de los módulos está dedicado a la instrumentación de medición. Estos módulos se comunican a través del protocolo *CANopen* con la PC de control. Otros elementos como la báscula se comunican por Ethernet.

El software utiliza las recetas elaboradas para cada procedimiento de calibración, ya sea gravimétrico o volumétrico, lo que garantiza el funcionamiento en secuencias programadas para cada línea de calibración. En cada receta es posible variar los parámetros fundamentales de la calibración como son: flujo, tiempo de realización, cantidad de fluido a utilizar, etc. Posteriormente se generan certificados e informes de calibración. Toda esta información se almacena en una base de datos debidamente protegida.

### **1. PUESTA EN MARCHA DEL LCPC**

La conclusión de los trabajos de puesta en marcha del LCPC se realizó a finales del 2015 pero se confrontaron problemas para obtener la exactitud programada. El equipo del proyecto trabajó fuertemente en la caracterización del laboratorio y en la modelación y creación de una válvula *diverter* de área variable, pues podía ser una de las causas fundamentales de los citados resultados. A continuación se muestran imágenes del flujo en la válvula *diverter* o derivadora y se muestran además los trabajos realizados de modelación de velocidades del fluido en la válvula.

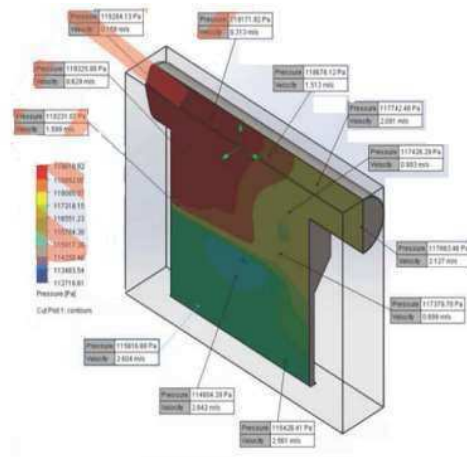


Fig. 9 Evidencia de ruptura de la columna de fluido Fig. 10 Simulación válvula *diverter*

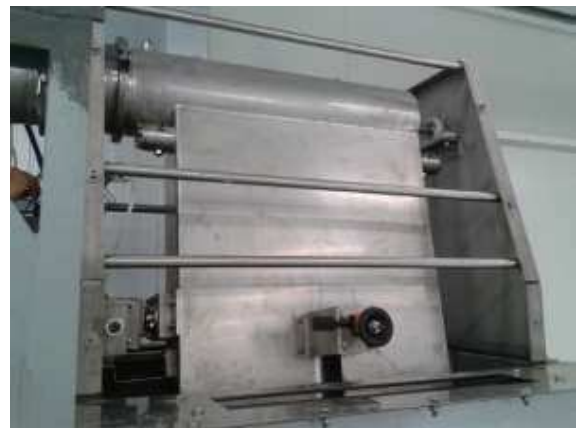
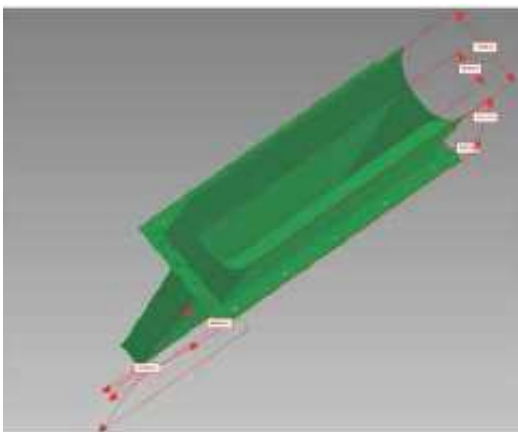


Fig. 11 Modelo tridimensional Fig. 12 Nueva válvula *diverter* de geometría variable

Se realizaron trabajos relacionados con la instalación y prueba de la misma. Los resultados no fueron los esperados. Como se muestra en la Fig. 13 el flujo se acumuló hacia un extremo, provocando limitación en el límite del flujo de trabajo de la instalación por la formación de salpicaduras y vertimiento de fluido de una tolva a otra de la válvula *diverter*.



- Cortina deformada e irregular
- Imposibilidad de trabajo en flujos superiores a 200 m<sup>3</sup>/h por desborde y salpicaduras

Fig. 13 Válvula *diverter* de geometría variable

La solución a los problemas de exactitud se logró primero con la modificación de la válvula *diverter* original, con un perfilador de flujo que mejoró considerablemente su funcionamiento.

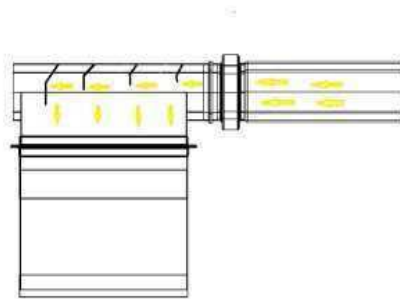


Fig. 14 Modificaciones al acondicionador de flujo de la *diverter*: esquema y realización práctica





Fig. 15 Vista de la cortina de flujo a 250 t/h

Como segunda acción se encontraron en la literatura especializada ejemplos de calibración de diferentes tipos de fluidos con un mismo flujómetro de coriolis [5], en los que hay diferencias en función de la variación de la densidad de los mismos. Este resultado apunta a que era absolutamente lógico que si los certificados de calibración se referían a una calibración que se habían realizado con agua, la instalación de *jet fuel* arrojara una diferencia en los valores (ver Fig. 16)

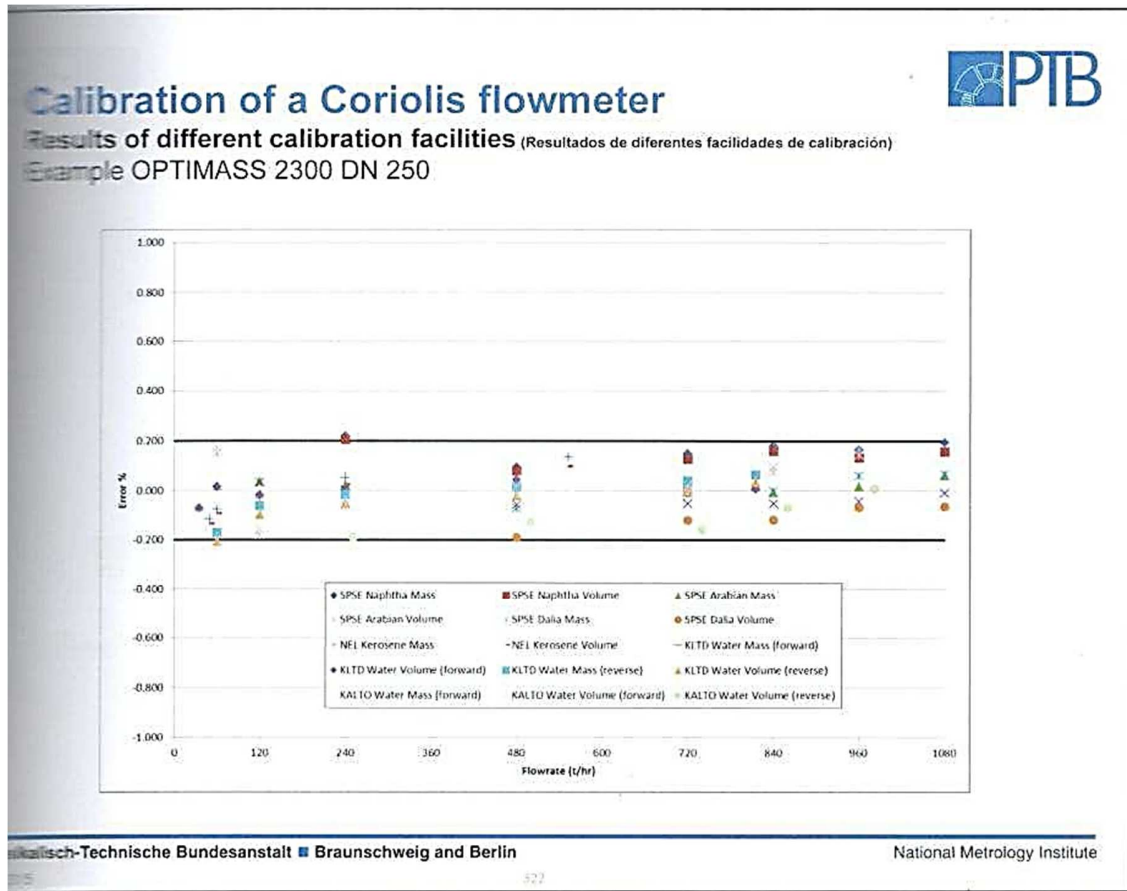


Fig.16 Ejemplo de calibraciones con un coriolis con diferentes fluidos.

Se trabajó también en la revisión y cambio del sistema de adquisición de datos de los flujómetros patrones de frecuencia a pulsos, eliminándose la posibilidad de pérdidas de los mismos.

Posteriormente se ajustaron los flujómetros obteniéndose resultados compatibles con los certificados de calibración del laboratorio del fabricante [6]. Estos resultados se muestran a continuación, en las Figs. 17 a 19.

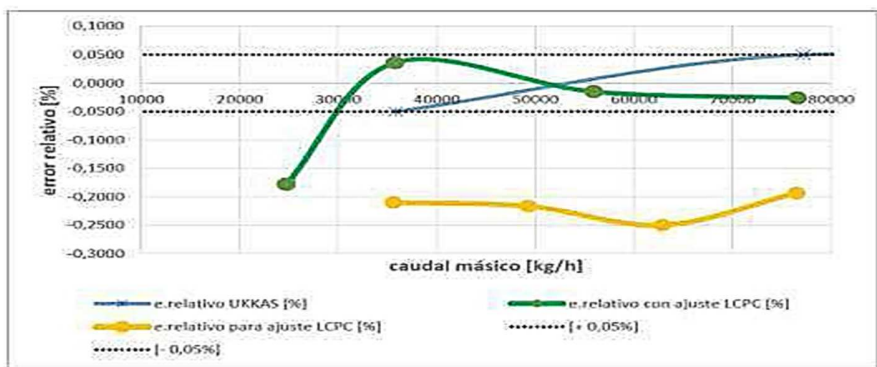


Fig. 17 Línea 1 Flujómetro patrón DN 80

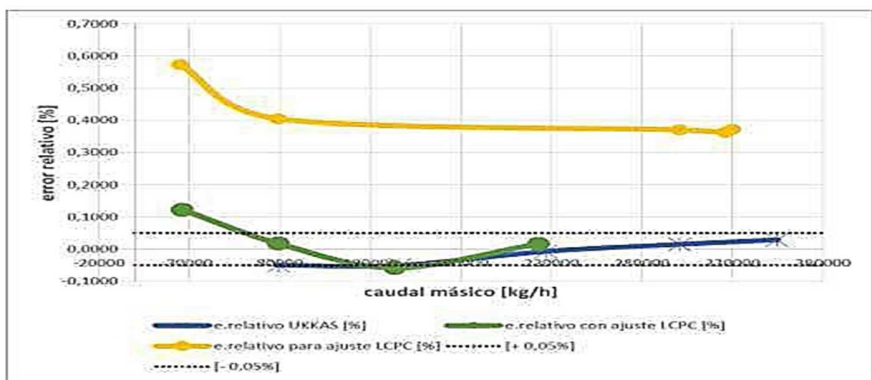


Fig. 18 Línea 3 Flujómetro patrón DN 150

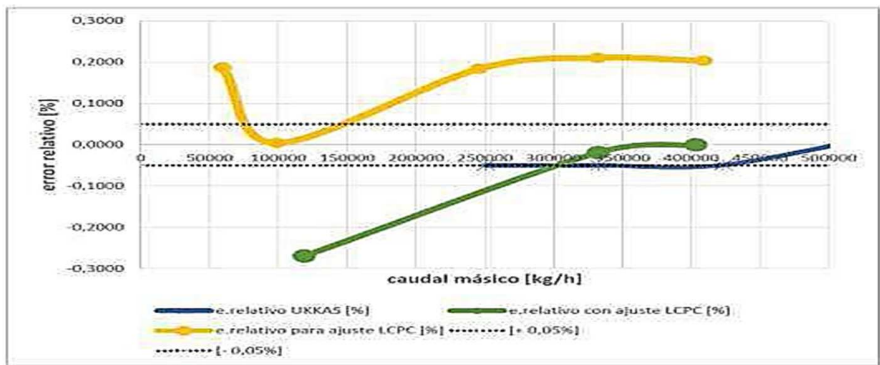


Fig. 19 Línea 2 Flujómetro patrón DN 250

En las gráficas las líneas azules (que pasan entre las líneas de puntos) corresponden a la calibración con agua del laboratorio de Krohne U.K. Como detalle interesante esta calibración está realizada en el segmento de mayor alcance del flujómetro. Por eso se logró coincidir con estos valores en dos o tres puntos; las líneas verdes corresponden a la calibración con *jet fuel*. Como se aprecia, coinciden bastante en la banda de error de

$\pm 0,05\%$  . Las líneas amarillas corresponden a los errores relativos antes del ajuste de los flujómetros.

Posteriormente se realizó la calibración y ajuste de los flujómetros patrones de las tres líneas por el INIMET, con la participación del personal del laboratorio y de Tecnomática. Se detectó que el software tenía una omisión relacionada con la consideración de la corrección por empuje del aire, por lo que se revisaron los resultados incluyendo la citada corrección. La Fig. 20 ilustra que la consideración de la corrección por empuje del aire en las pesadas produce un error sistemático en el orden de 0,1 % por lo que no era posible considerarla como componente de la incertidumbre.



Fig.20 Línea 2 Flujómetro patrón DN 250 corregido por empuje del aire

Se realizó un número elevado de mediciones con sucesivas correcciones del parámetro F5 indicado por el fabricante que permite determinado ajuste del factor del flujómetro, los resultados se muestran a continuación, en las Figs. 21 a 23

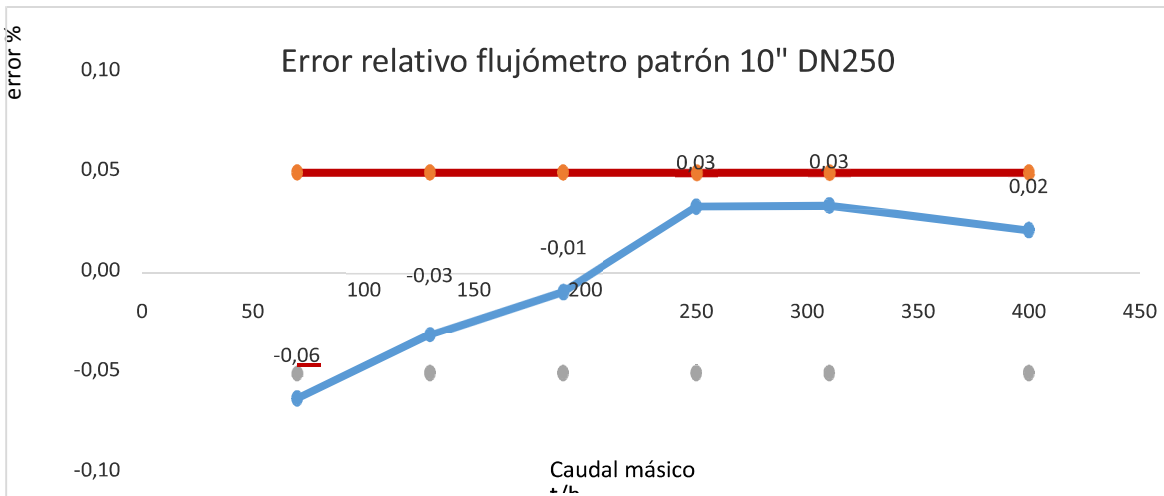


Fig.21 Resultado Calibración Patrón 10" DN 250

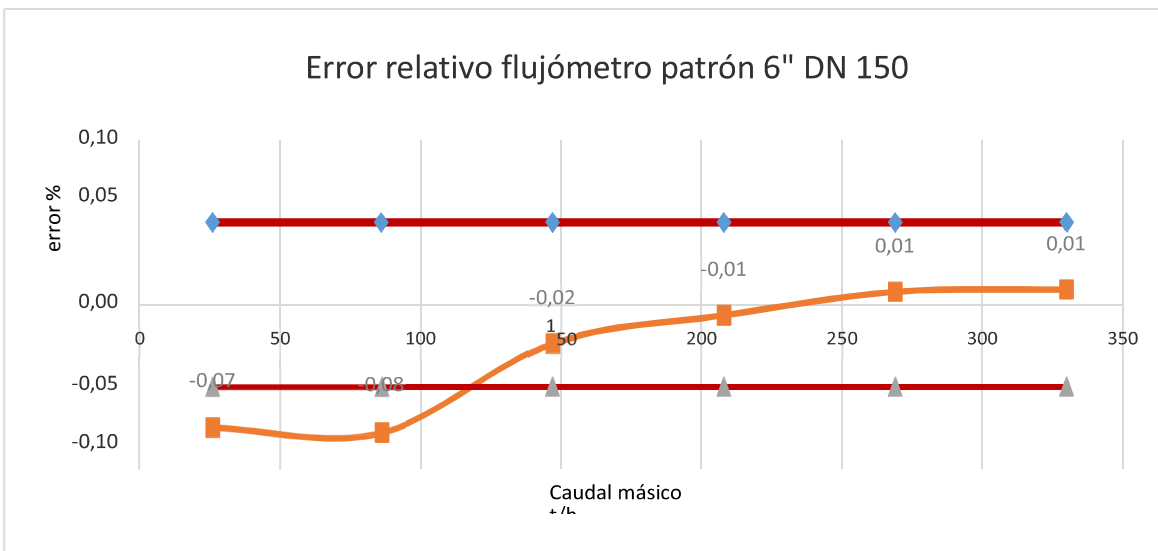


Fig.22 Resultado Calibración Patrón 6" DN 150

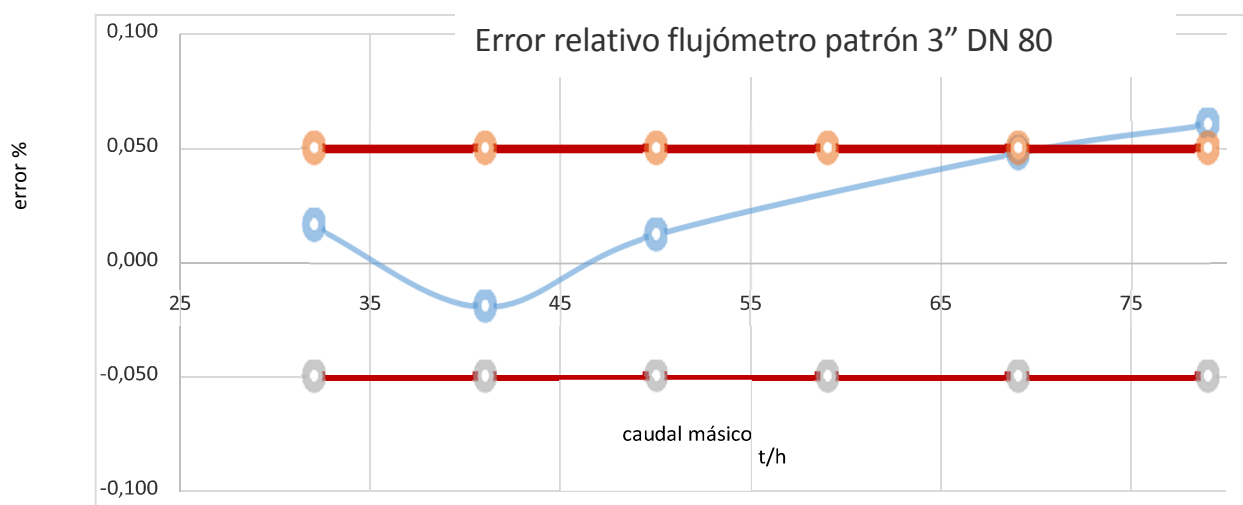


Fig.23 Resultado Calibración Patrón 3" DN 80

Como se puede apreciar de los gráficos los tres tienen resultados coherentes y comparables con los resultados de calibración del fabricante, teniendo la mayoría de los puntos de la curva dentro de la banda de error de  $\pm 0,05\%$ . Es necesario destacar que se han presentado los mejores resultados logrados para cada patrón pero, por cuanto se realizaron pruebas con dos métodos (gravimétrico dinámico y *start-stop*) [7]. Hay otros resultados con mayores variaciones, sobre todo en los bajos flujos. En los altos flujos la tendencia es a estabilizar el error. Dado el nivel de experiencia del personal que realizó las calibraciones con un sistema tan complejo como es el laboratorio ensu conjunto, además de contar con flujómetros de tecnología novedosa, la valoración general es positiva, aunque consideramos estos resultados como el punto de partida de un necesario estudio de la propia instalación, de los flujómetros como tal y de las condiciones de realización de las calibraciones en la misma.

Uno de los más destacados científicos del mundo con resultados importantes en la calibración de flujómetros, Terry Cousins, expresó refiriéndose a la calibración de flujómetros para transferencia de custodia [8]:

“Las conclusiones son simples y cortas:

- Ninguna máquina de fluidos es inmune a variaciones en mayor o menor medida del Número de Reynolds ( $Re$ ).
- 0,1 % es un número difícil de lograr en mediciones de flujo, y todo cuidado debe ser tomado para lograrlo.
- Se requiere una calibración cuidadosa de los flujómetros para lograr esto, debido a

la no linealidad fundamental de los medidores, incluso probados o calibrados.

- Nada sustituye la calibración adecuada de los flujómetros”

Teniendo en cuenta estas utilísimas observaciones se perfila el camino a la consecución de valores de repetibilidad aceptables según referencias  $\geq 0,05\%$  a partir de la revisión de las condiciones de realización de las pruebas, que se realicen en el menor tiempo posible en condiciones de menores variaciones del número de Reynolds, lo que implica menor variación de temperatura y los parámetros que están tan estrechamente ligados a esta como son densidad y viscosidad. Otra vía interesante de desarrollo son los trabajos del propio Cousins y otros pertenecientes a Instituciones como Endress+ Hauser, NMI Certin, NEL UK, Krohne, PTB, etc.) [9-15] relacionados con la corrección o linearización de la curva de calibración en función de la variación de Re.

Posterior a la calibración de los patrones del laboratorio se calibraron los flujómetros del patín de calibración o instalación móvil que se muestra en la Fig. 24. Durante la misma se calibró en la línea de 3” el flujómetro DN 40 con resultados satisfactorios. En la calibración del DN 80 se confrontaron dificultades relacionadas con la instalación temporal creada con mangueras para la realización de la calibración, la que se demostró afectaba la exactitud. Se decidió sacar el flujómetro del patín y se realizó la calibración con el flujómetro en la línea de 6” con la participación de un especialista de Krohne, obteniéndose resultados muy satisfactorios que se muestran más adelante.



Fig. 24 Patín durante la calibración de los flujómetros

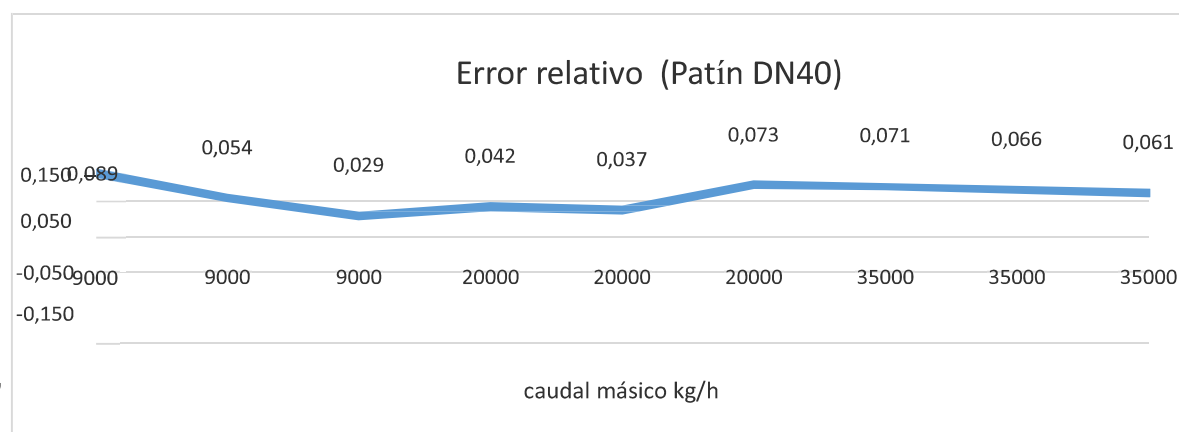


Fig. 25 Resultado de la calibración del flujómetro DN 40 del Patín

Como se puede apreciar de la figura se obtiene un error promedio mayor que 0,05 % y menor que 0,1 %, lo que satisface el error del instrumento patrón para la calibración de instrumentos de trabajo en el campo de clase 0,1.

El resultado de la calibración del flujómetro DN 80 en la línea de 6" del laboratorio se muestra a continuación. La curva de color marrón corresponde al certificado de calibración de fábrica.

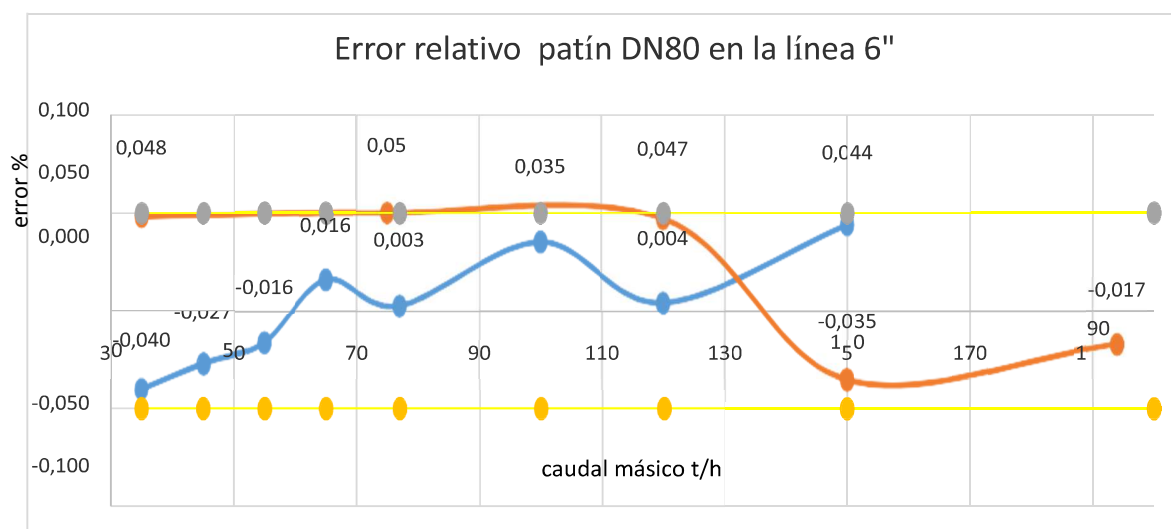


Fig.26 Resultado calibración flujómetro en la línea 6" fija del laboratorio

Se realiza posteriormente la calibración armado con mangueras los resultados se muestran a continuación:



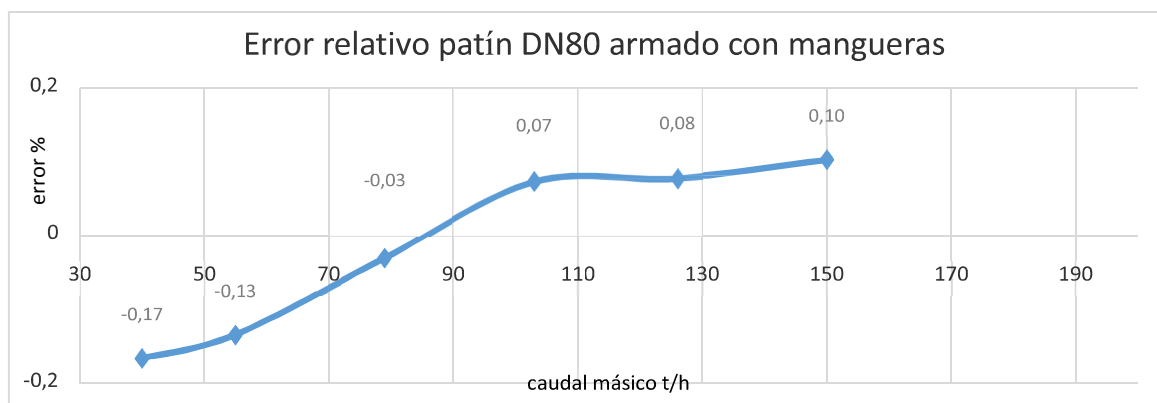


Fig. 27 Resultado de la calibración del flujómetro armado con mangueras.

Como se aprecia, en comparación con la calibración realizada con el flujómetro en la línea, el error crece manteniéndose el promedio menor que 0,1 % por lo que se decidió no realizar más ajustes y utilizarlo como clase 0,1 . El trabajo realizado refirma la estrecha dependencia de los resultados de las condiciones de realización. En este caso el acople con mangueras produce un incremento del error que no sobrepasa los límites permitidos, pero si requiere de un cuidadoso trabajo. De este resultado se derivó una propuesta de mejora que consiste en diseñar y desarrollar la conexión para la calibración del patín con otro tipo de acoples, que pueden ser semirrígidos o extensiones de tuberías que permitan disminuir los tramos de manguera a utilizar y no afectar los parámetros del sistema hidráulico de la instalación.

Otro tema de vital importancia y que tiene una estrecha relación con los resultados expuestos es la forma de realización de las calibraciones. Cuando se fija un valor de masa para la comparación siguiendo determinados criterios como pueden ser establecer una carga constante total o un porcentaje determinado de la carga u otro criterio, esto afecta fundamentalmente el tiempo entre repeticiones de la medición, sobre todo en los flujos bajos, lo que propicia una mayor influencia de la variación de las condiciones, la cual, a su vez, impacta la repetibilidad. En la Fig. 28 se muestran resultados del mismo flujómetro con masa constante o variable. El resultado de la gráfica en azul corresponde a la calibración con masa constante.

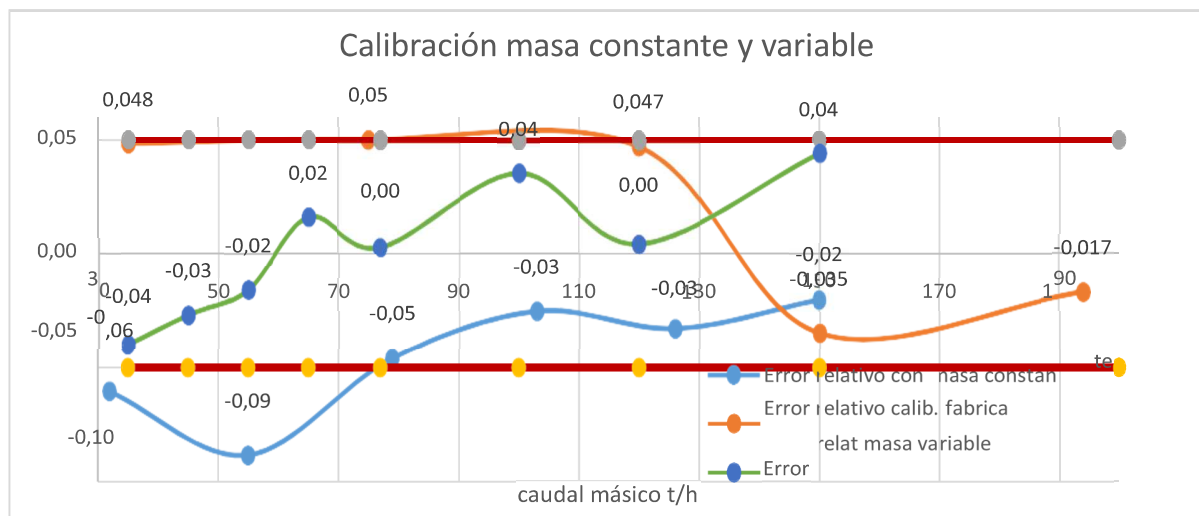


Fig. 28 Comparación de las calibraciones con masa constante y variable.

En la Fig. 29 se aprecian los tiempos de calibración de las calibraciones anteriores.

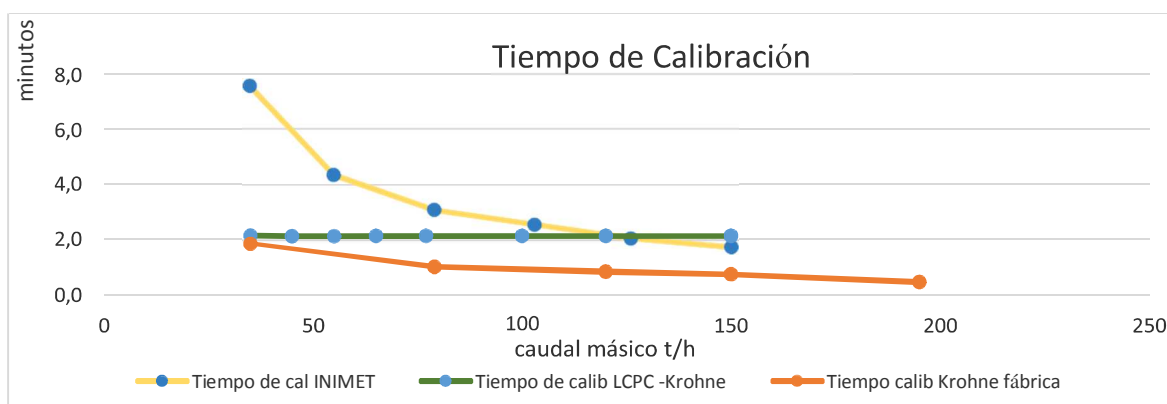


Fig. 29 Tiempos de calibración.

La calibración realizada en el menor tiempo posible impone requisitos adicionales al mantenimiento metrológico y cuidado del instrumento de pesar que deben ser evaluados, como por ejemplo realizar la autocalibración de la balanza con más frecuencia, utilizando sus masas patrones y por otra parte se debe evaluar con los especialistas de masa del INIMET la posibilidad de calibrar el instrumento como multi- rango ya que sus componentes (celdas y dispositivo lector) así lo permiten, según consta en la documentación técnica [6].

Como último resultado de interés se presenta la posibilidad que brinda el software del Laboratorio relacionada con el trabajo de las líneas de calibración: cuando se calibra un flujómetro gravimétricamente los datos del flujómetro patrón se reciben y almacenan en la base de datos, independientemente de que no participe en la calibración de forma directa. Pero es totalmente posible utilizar estos datos para revisar u obtener la calibración del mismo. De esta forma aparece la posibilidad de realizar gráficos de control del patrón principal durante la calibración de otros instrumentos en la misma línea. A continuación se muestran las curvas durante la calibración de varios flujómetros.

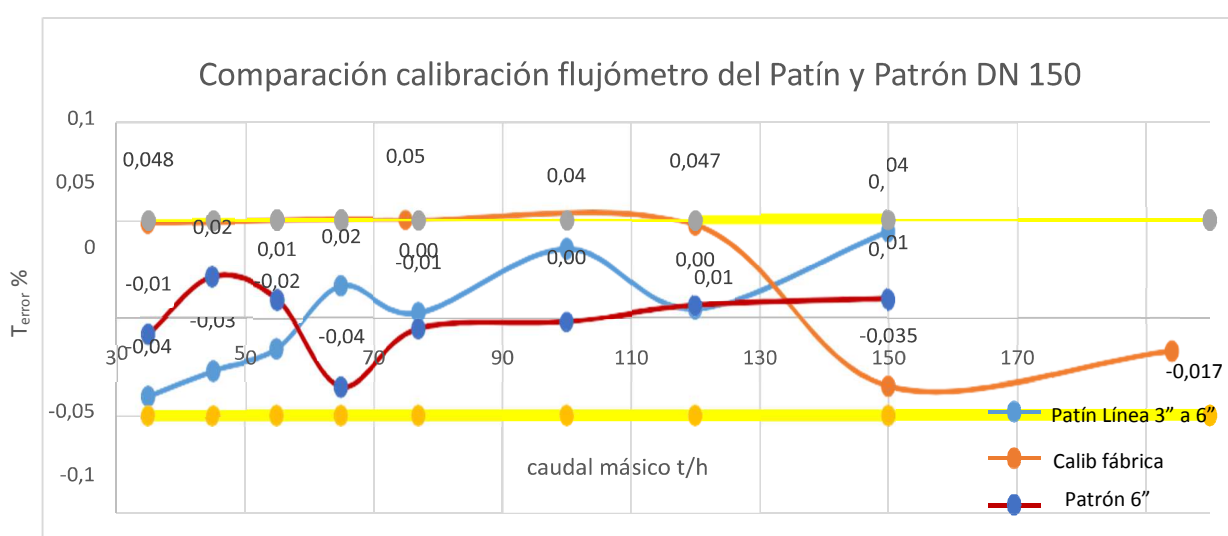


Fig.30 Gráfico de Control flujómetro patrón 6" DN 15

Los resultados que se muestran son excelentes. Por esta razón se recomienda hacer uso de esta herramienta en todas las ocasiones posibles, sobre todo en esta etapa de estudio del Laboratorio haciendo énfasis en la evaluación de la estabilidad y otros criterios como son la repetibilidad y reproducibilidad de la instalación en sí. Estos gráficos de control deben realizarse especialmente cuando el flujómetro a calibrar permita, por el rango de trabajo y características, realizar un ejercicio realmente comparativo. A continuación, se muestran otros gráficos con resultados más dispersos, fundamentalmente las calibraciones no están hechas en los mismos puntos de la escala de flujo. No obstante, pueden ser muy útiles para evaluar la necesidad de realizar una corrección del flujómetro patrón y para el análisis de la efectividad del método y de los procedimientos utilizados en la calibración.

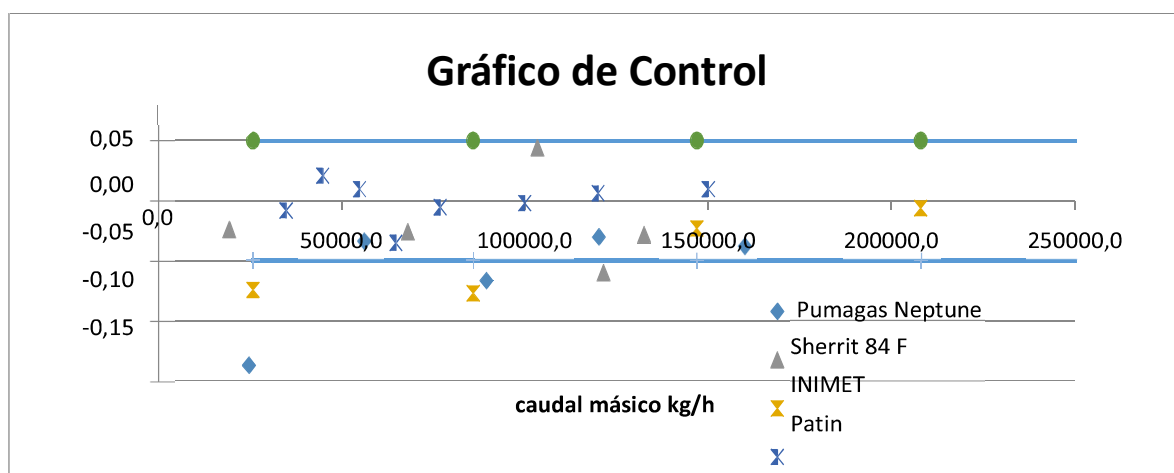
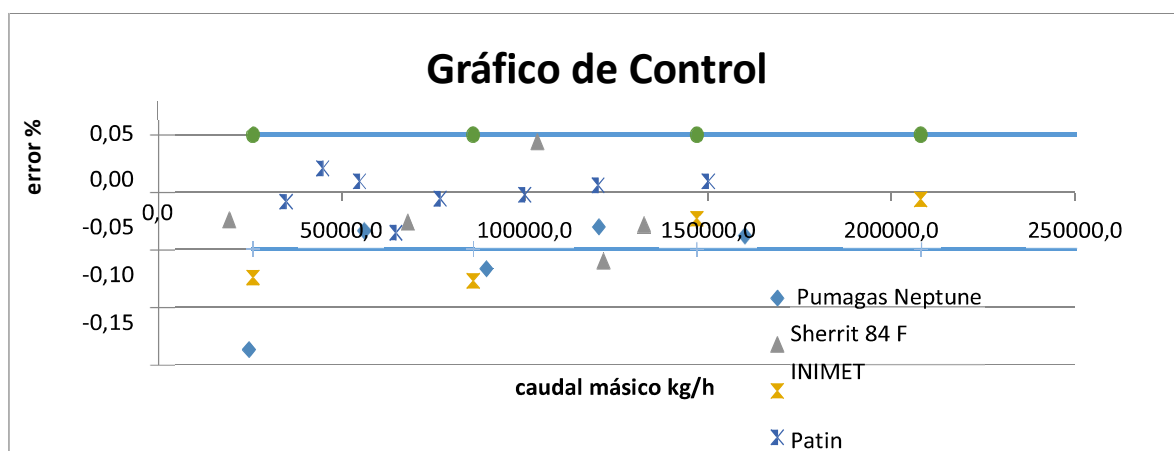


Fig. 31 Otros resultados obtenidos durante el trabajo experimental.

Como se puede observar, la gran mayoría de los resultados están dentro de la banda de error máximo permitido del flujómetro, lo que indica que se puede realizar este tipo de gráfico para evaluar por alguno de los métodos o criterios de evaluación de consistencia de los resultados de la comparación como son el criterio del error normalizado (En), Z- score, Youden Plot, o Método de Cook, etc.

Después de la puesta en marcha y hasta la fecha, el Laboratorio ha calibrado gravimétrica y volumétrica más de 25 flujómetros de diferentes tipos logrando errores máximos de 0,1 % e inferiores para la mayoría de ellos y tiene una programación de trabajo que le permite continuar estudiando sus capacidades de medición e ir implementando mejoras en su desempeño.

## **CONCLUSIONES**

- El Laboratorio permite la solución nacional de la trazabilidad de medición de productos claros que se comercializan y distribuyen en el país, dimensionada para el nivel de actividad, competencia y necesidades de la industria del petróleo.
- El laboratorio LCPC permite la calibración de flujómetros patrones con exactitudes de 0,05 %, lo que permite establecer comparabilidad con laboratorios foráneos.
- Durante la puesta en marcha se resolvieron los problemas de exactitud que se confrontaron y se estableció la trazabilidad del Laboratorio al Instituto Nacional de Investigaciones en Metrología. El nivel de exactitud e incertidumbre alcanzado permiten prestar servicios de calibración y garantizar la trazabilidad de la comercialización de productos claros en el país.
- El trabajo realizado permite comenzar la preparación para prestar servicios a terceros países, por supuesto, después de la acreditación y logro de reconocimiento internacional del LCPC.
- Los servicios del laboratorio no se limitan a Cupet, por cuanto está previsto su trabajo en conjunto con la ONN para la calibración de sus flujómetros Patrones para productos claros y los de otras entidades de la Economía Nacional.

## **2. IMPACTOS**

- El Laboratorio LCPC sustituye importaciones debido a que en él se pueden calibrar flujómetros patrones con trazabilidad al Instituto Nacional de Metrología, por lo que no es necesario enviar estos patrones al extranjero para su calibración, ni importar los flujómetros de trabajo con costosos certificados de calibración de laboratorios extranjeros. Teniendo en cuenta que el costo de la importación de este tipo de servicios es elevado, se producen ahorros sustanciales a la economía nacional que pueden estar en el orden de los cientos de miles de USD.
- El laboratorio LCPC permite la calibración de flujómetros patrones con exactitudes de 0,05 % , que son los mejores que se producen en el mundo en la actualidad, con una incertidumbre que permite establecer comparabilidad con laboratorios foráneos.
- Este nivel de exactitud e incertidumbre citados permitirá prestar servicios de calibración a terceros países después de la acreditación y logro de reconocimiento internacional del LCPC.

**REFERENCIAS:**

1. NC-994:2013 Condiciones y requisitos técnicos para la medición fiscal y transferencia de custodia o propiedad de petróleo y sus derivados, 1. Edición. Diciembre 2013.
2. OIML R 117-1:2007 Dynamic measuring systems for liquids other than water. Part 1: Metrological and technical requirements. Disponible en: [https://www.oiml.org/en/files/pdf\\_r/r117-p-e07.pdf](https://www.oiml.org/en/files/pdf_r/r117-p-e07.pdf)
3. OIML R 76-1:2006 Non-automatic weighing instruments. Part 1: Metrological and technical requirements – Tests. Disponible en: [https://www.oiml.org/en/files/pdf\\_r/r076-p-e06.pdf](https://www.oiml.org/en/files/pdf_r/r076-p-e06.pdf)
4. OIML R 60:2017 Metrological regulations for load cells. Disponible en: [https://www.oiml.org/en/files/pdf\\_r/r060-p-e17.pdf](https://www.oiml.org/en/files/pdf_r/r060-p-e17.pdf)
5. API Standard. Manual of Petroleum Measurement Standard. Chapter 5 Section 6. Measurement of liquid hydrocarbons by Coriolis meters. Reaffirmed March 2018. Disponible en: [https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=2&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwiM6pP1ntLeAhVQrVvKHSCXDgoQFjABegQIBxAC&url=http%3A%2F%2Fballots.api.org%2Fcopm%2Fcolm%2Fballots%2Fdocs%2F5\\_6\\_WG\\_Mar\\_2018.pdf&usq=AOvVaw1hDTgaRPv1ublfOeWuZzTV](https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=2&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwiM6pP1ntLeAhVQrVvKHSCXDgoQFjABegQIBxAC&url=http%3A%2F%2Fballots.api.org%2Fcopm%2Fcolm%2Fballots%2Fdocs%2F5_6_WG_Mar_2018.pdf&usq=AOvVaw1hDTgaRPv1ublfOeWuZzTV)
6. LCPC. Laboratorio de Calibración de Productos Claros. Documentación Técnica. 2015
7. ISO 10790:2015 Measurement of fluid in closed conduits - Guidance to the selection, installation and use of coriolis flowmeters (mass flow, density and volume flow measurements), ISO/IEC Office Geneva, Switzerland, 2015
8. Cousins, T "Reynolds Number Correction of Liquid Ultrasonic Meters and Coriolis Meters" CEESI USA, March 2014 Disponible en: [https://www.vsl.nl/sites/default/files/rtf/Terry\\_Cousins\\_Reynolds\\_Number\\_Correction\\_of\\_LUSMs\\_and\\_Coriolis.pdf](https://www.vsl.nl/sites/default/files/rtf/Terry_Cousins_Reynolds_Number_Correction_of_LUSMs_and_Coriolis.pdf)
9. Cousins, T. CEESI "Reynolds Number, the Correct Calibration Characterization and Proving of FlowMeters", 34<sup>th</sup> International North Sea Flow Measurement workshop 25-28 October 2016. Disponible en: [https://nfogm.no/wp-content/uploads/2018/04/NSFMW\\_2016\\_-\\_Technical\\_Papers.pdf#%5B%7B%22num%22%3A1088%2C%22gen%22%3A0%7D%2C%7B%22name%22%3A%22FitR%22%7D%2C-197%2C62%2C1386%2C842%5D](https://nfogm.no/wp-content/uploads/2018/04/NSFMW_2016_-_Technical_Papers.pdf#%5B%7B%22num%22%3A1088%2C%22gen%22%3A0%7D%2C%7B%22name%22%3A%22FitR%22%7D%2C-197%2C62%2C1386%2C842%5D)
10. MATHIES, N. Materiales del Curso avanzado de transferencia fiscal y de custodia según OIML R117, impartido en La Habana, 2015. Inéditos.

11. Upp, EL; LaNasa, PJ. "Fluid Flow Measurement A Practical Guide to Accurate Flow Measurement" Second Edition.
12. SHAMES, IH. Mecánica de los fluidos. McGraw-Hill Interamericana SA, Colombia, 1995
13. van der Grinten, Jos GM; van der Stap, B; van Driel, D. "Operational experiences with the EuroLoop Liquid Hydrocarbon Flow Facility", Technical paper. 33rd International North Sea Flow Measurement Workshop 20 - 23 October 2015 Disponible en: <https://nfogm.no/wp-content/uploads/2017/02/09-EuroLoop-Liquid-Hydrocarbon-Flow-Facility-NMI.pdf>
14. Proving Coriolis Flowmeters, Micro Motion. Inc, 1998
15. Thorn, R. Flow measurement, CRS Press LLC, 2000

#### **AGRADECIMIENTOS:**

No sería justo dejar de mencionar a personas que colaboraron con ahínco con esta obra realizada en condiciones difíciles por lo que transmitimos nuestro agradecimiento a:

- Emilio Rodríguez Asesor del Ministro MINEM
- Armando Estévez Director de Tecnomática
- Jesús Díaz Gerente Regional Krohne
- Eduardo Vega Fernández Gerente General Fondón Redes y Fluidos
- Jaime Admiral Sendón Gerente FRF Cuba
- Equipo de ingenieros de G Flow en especial Natalia Poshivak y Rosa Fernandes y los hermanos Romero
- Susana Santos Lezcano, Directora de EMPET
- Deysi Pineda Sánchez Directora Adjunta de EMPET
- Especialistas del INIMET que realizaron las calibraciones de la instrumentación y los que participaron en los trabajos de puesta en marcha

**Fecha de recepción del artículo: 2017-06-06**

**Fecha de aceptación del artículo: 2017-06-28**

## **Ponencia aprobada para su presentación en el 10mo. Simposio Internacional Metrología 2017**

### **Improvements in Coriolis flow measurement technology**

**Autores:** O. Reyes Vaillant<sup>1</sup>; E. H. Doorenspleet<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Endress+Hauser Instrument International AG (LASC, Panama); PhD in Electrical Engineering from CUJAE/IPT SP (Cuba/Brazil); MSc degree in Electrical Engineer from São Paulo University (Brazil); BS in Automation Engineering from CUJAE (Cuba), Regional Industry Manager for Oil and Gas Market in Endress+Hauser Latin America Support Center.

<sup>2</sup> Endress+Hauser Flowtec AG (Reinach); degrees in Electronics, Marketing and Business Administration from Netherland System University, Holland; Business Development Manager Oil and Gas/Coriolis in Endress+Hauser Flowtec AG, Reinach, Switzerland.

### **Abstract**

Mass flow measurement based on Coriolis principle has been expanding its presence in diverse applications throughout several industries. This technology has shown its outstanding performance in terms of low uncertainty, high repeatability and long-term stability. However, new improvements for this technology have upgraded its results under specific process conditions usually considered as limiting. In this paper, a summary of the newest developments for Coriolis flow meters from Endress+Hauser appeared in previous publications are discussed. These improvements include Reynolds number compensation which allows to dynamically compensate the effect of low Reynolds number applications in the measurement results, as well as Multi-Frequency Technology (MFT) intended to compensate the meter errors introduced under entrained gas conditions. Finally, direct viscosity measurement implemented in a straight tube Coriolis meter is also discussed. Fields of application for each new feature are also commented,

**Keywords:** Reynolds number, entrained gas, viscosity measurement, water-cut, gas void fraction

### **Resumen**

La medición de flujo másico basada en el principio de Coriolis ha estado expandiendo su presencia en diversas aplicaciones en varias industrias. Esta tecnología ha demostrado su excelente desempeño en términos de baja incertidumbre, alta repetibilidad y estabilidad a largo plazo. Sin embargo, las nuevas mejoras para esta tecnología han elevado sus resultados bajo condiciones de proceso específicas que generalmente se consideran limitantes. En este artículo se presenta un resumen de los desarrollos más recientes para medidores de flujo de tipo Coriolis de la empresa Endress + Hauser, aparecidos en publicaciones anteriores. Estas mejoras



incluyen la compensación del número de Reynolds, que permite compensar dinámicamente el efecto de la incidencia de un bajo número de Reynolds en los resultados de la medición, así como la Tecnología de multifrecuencia (MFT) destinada a compensar los errores del medidor introducidos en condiciones de gas atrapado. Finalmente, también se discute la medición de viscosidad directa implementada en un medidor Coriolis de tubo recto. También se comentan los campos de aplicación para cada nueva característica.

**Palabras clave:** número de Reynolds, gas arrastrado, medición de viscosidad, corte de agua, fracción de vacío de gas.

## **Introduction**

Coriolis mass flowmeters have been one of the most attractive and consistent flow measurement choices with a gradual but steady increasing of its acceptance during all these years. Now a day there is a consensus about their reliability and superior performance in quite different industrial applications, from crude oil flow measurement after the primary phase separation, up to hygienic food and beverage processes. A summary of this principle of operation will be presented in Section 1.

Probably, the most valuable features of the Coriolis technology are related to its capability to maintain low measurement uncertainty even under changing fluid properties [1]. These property changes include not only fluid density, which is measured by the meter, but also the viscosity.

Further researches on Coriolis principle of operation [2], [3] and [4] have analyzed the real effect of low Reynolds number condition in Coriolis meter. Low Reynolds number in transport applications uses to be related to high viscosity conditions. Compensations to the meter factor shifts occurred under low Reynolds conditions will be discussed in Section 2.

Coriolis flow meters are designed to measure a single-phase fluid. Multi-phase behavior, such as that produced by entrained gas in a liquid stream, clearly affects the meter accuracy. Endress+Hauser has also developed improvements in their Coriolis sensors allowing to compensate errors associated to increased fluid compressibility when an entrained gas is present. This topic will be discussed with more details in Section 3.

Viscosity measurement is also one of the most important contributions of Endress+Hauser to the multivariable nature of Coriolis flow meters. Depending on the way that the driving force is exerted to the oscillating system of the flow meter, consistent information of the fluid viscosity can be obtained. This final topic will be discussed in Section 4.

### **1. Coriolis principle of operation for mass flow measurement**

A Coriolis mass flowmeter is probably one of the most known applications of the Coriolis force (named in honor to its discoverer Gustave Coriolis). These flowmeters are basically conformed by an oscillating system with one, two or four tubes, just like the Promass X shown in Fig. 2. They also contain an array of driver(s) and pick up coils capable to, first, impose a vibrating frequency to the system (point B in Figure 1) close to its natural frequency and after that to detect the phase shift of the anti-symmetric oscillation appeared between A and C when a fluid flows through the oscillating tubes, respectively.

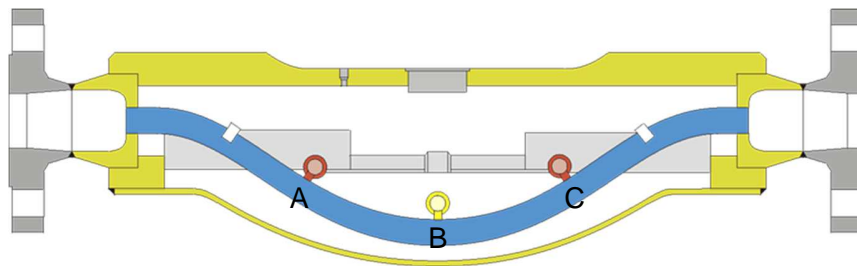


Figure 1. Oscillating tube in a Coriolis flowmeter, A and C pick up coils, B driver.

This phase shift is a direct function of the mass flowing through the oscillating tubes. But in addition to the mass flow, the density is also measured by the relation between this variable and the frequency of the oscillating system.

## 2. Low Reynolds number applications: viscous forces vs. inertial forces

Reynolds number ( $Re$ ) is one of the most important dimensionless numbers of fluid mechanics. Basically, it accounts for the relation between the two major groups of forces acting in a fluid transport application: inertial and viscous forces (1).

(1)

where:  $Re = \frac{Vd\rho}{\mu}$

$V$ : average velocity of the flow stream [L· t<sup>-1</sup>]

$d$ : internal diameter of the pipe (tube) [L]

$\rho$ : mass density of the fluid [m· L<sup>-3</sup>]

$\mu$ : dynamic viscosity @fluid conditions [m· L<sup>-1</sup>· t<sup>-1</sup>]

The effect of the viscosity changes (and consequently  $Re$  changes) in the flowmeter accuracy is a fact recognized by most of the Coriolis meter manufacturers. The knowledge of the Reynolds number of the flow stream inside the meter is relevant to detect and compensate this effect.



Fig. 2. [Promass X](#): four tubes mass Coriolis meter with low uncertainty, extended usable turndown ratio and low pressure drop.

TÜV/NEL laboratories have conducted several independent experiments to analyze this behavior in Coriolis meters [3]. Tests were carried out with fluids of up to 300 cSt (300 mm<sup>2</sup>/s) . The higher the viscosity (and consequently the lower the Reynolds number), the higher the negative

deviations found during these tests. This result was consistent for all the type of meters employed during the tests.

### 2.1 The mechanism

The mechanism acting here, described in [5], is the result of the interaction between a) the oscillatory shear forces and b) the inertial Coriolis force in the measuring tube, leading to a secondary oscillatory force. This secondary force moves in opposite directions in either side of the axial center of the tube but disappears at the center of the tube. The ratio between these two forces a) and b) is proportional to  $Re$ . The lower the  $Re$  (basically due to the higher the viscosity), the higher the influence of this effect.

Fig. 3 shows the alternating secondary force (represented by red arrows) appeared at low  $Re$  and expressed in the outer layer close to the tube wall.

This effect is totally connected with the existence of the thin layer or boundary-layer [6], where the viscous forces are preponderant compared to the inertial forces. In this condition, the Coriolis force (the one who produces the phase shift in the oscillating tube) must overcome the oscillatory shear force and for that reason part of its energy does not contribute to the deflection of the tube and consequently to the phase shift. That is the reason behind the under-reading of the actual mass flow rate at low  $Re$  conditions.

The magnitude of this secondary circulation is proportionally inverse to Reynolds number, thus this effect becomes negligible at high  $Re$ .

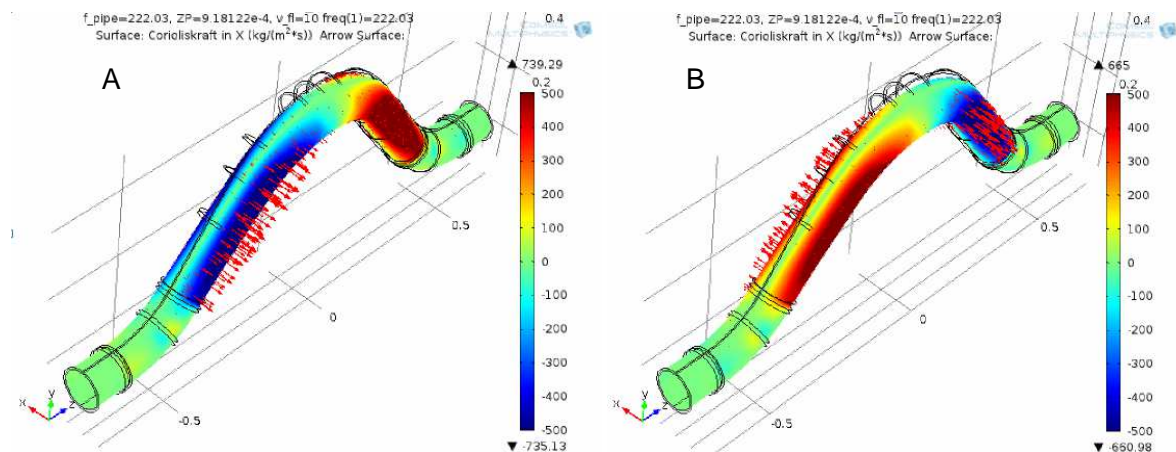


Fig. 3 A secondary force opposed to the tube deflection appears under low Reynolds conditions (where the viscous forces are preponderant) producing readings below the actual mass flow rate.

## 2.2 Real time measurement correction based on $Re$

According to Eq. (1) the only missing parameter to calculate the  $Re$  of the flow stream in a Coriolis flow meter is the fluid viscosity at actual conditions.

Coriolis mass flowmeters from Endress+Hauser are capable also to obtain the fluid viscosity in addition to density and mass flow rate measurements. With this information, a correction algorithm is implemented to compensate the deviations above described. This patented feature allows to obtain the mass flow rate value corrected through a real-time compensation based on the Reynolds number.

Fig. 4 and Fig. 5 show the results obtained with Promass meters in witnessed measurements performed in TÜV/NEL (3" to 6") and SPSE (10" to 14") with totally different fluid viscosities, ranging from (0,7 to 1000) cSt (from (0,7 to 1000) mm<sup>2</sup>/s) . Tests were developed under quite different Reynolds numbers ranging from 100 to  $5 \times 10^6$  . This spread of values was obtained by changing the flow rate and the fluid viscosity.

Both results were consistent with the expected values and no deviations were observed at low Reynolds number.

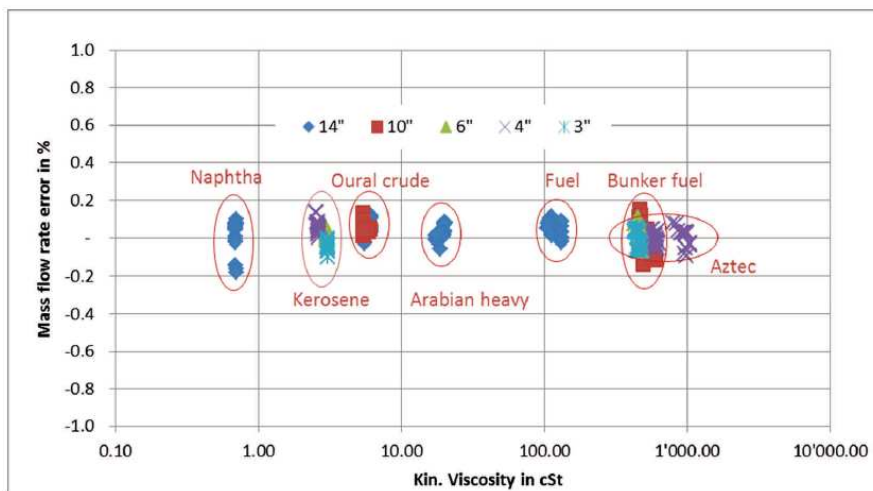


Fig. 4 Error of Promass Coriolis flow meters with Reynolds number compensation algorithm, plotted against viscosity and with different flow meter diameters [5].

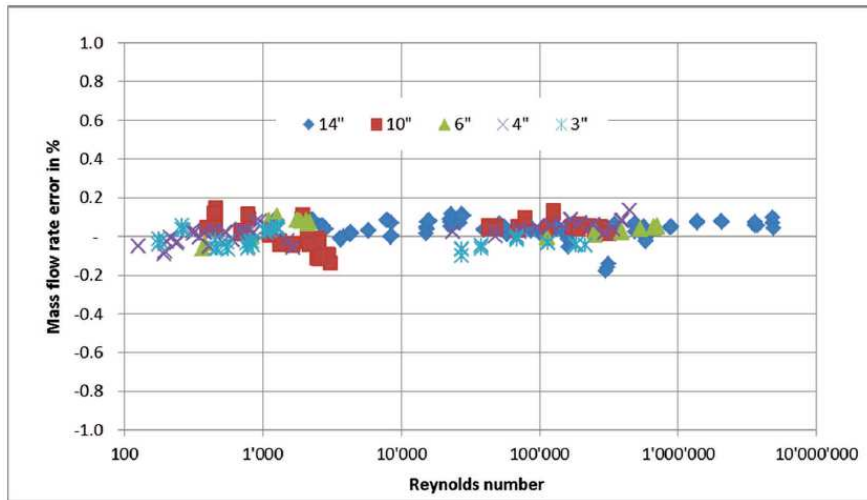


Fig. 5 Error of Promass Coriolis meters with Reynolds number compensation algorithm, plotted against Reynolds number and with different flow meter diameters [5].

The Reynolds number compensation is a standard feature on Promass flow meters. With this characteristic these instruments fulfill the maximum permissible errors established in OIML-117 classes not only for reference conditions, but also for a wide range of real process conditions. This feature also guarantees to maintain the same metrological performance of the meter even under low Reynolds applications and changing flow and fluid properties.

### 3. Improving the Coriolis meter accuracy under entrained gas conditions

The existence of a multiple phases in the fluid to be measured by a Coriolis meter has been a concerning topic for both manufacturers and end users. Mainly, for liquid Custody Transfer applications entrained gas could represent an additional source of errors.

The increased compressibility of the fluid in presence of entrained gas is directly associated to this undesired but real and frequent condition.

Literature reports at least two main sources of error associated to a multi-phase condition in liquid fluid, the bubble effect and the resonator effect, more commonly named as compressibility effect, **Bubble effect** can be summarized as the distortion or deviation from the oscillating system (tube and liquid fluid) generated by the bubbles, which is a portion of fluid (bubbles) hundreds times lighter than the liquid phase. Thus a relative motion between the bubbles and the liquid is generated, since the liquid cannot totally “hold” the bubble. A secondary flow is induced around the bubbles and as result its inertial effect finally affects the phase shift sensed to measure the mass flow rate. The resultant consequence is an underestimation in mass flow rate and density.

In ideal conditions of free bubbles there is no any “holding” effect from the liquid fluid. However, fluid viscosity and the presence of small size bubbles deviate the field conditions from the ideal

free bubble conditions. The contribution of the bubble effect to the measurement error is a function of the ratio of the bubble and liquid oscillation amplitude.

In the **resonator effect**, in addition to free bubbles, there are also suspended bubbles, but they will oscillate together with the liquid fluid (amplitude and phase) so no bubble effect is generated. However, they will radically increase the fluid compressibility leading again to mass and density errors. This mechanism can be briefly described as a radical reduction of the resonance frequency of the fluid in presence of suspended bubble of gas, driving the system out of resonance and leading the flowmeter to again underestimate density and mass flow rate. However, if the acoustic resonance frequency of the system is known then is possible to calculate the magnitude of the resonator effect on the mass Coriolis flowmeter.

### **3.1 Multi Frequency Technology**

Endress+Hauser has developed the Multi Frequency Technology (MFT) to compensate the measurement error caused by the presence of bubbles, as a particular case of multi-phase behavior, on both density and mass flow rate. This technology has been implemented in new Coriolis flow meter Promass Q, see [7].

With this technology the measuring tubes are excited simultaneously in two different oscillation modes using the same driver. In this case the first and the third natural mode frequency were selected. The difference of frequencies between these two modes uses to be typically separated by a factor of 5 or 6.

The meter, now excited at two different frequencies, can process the combined signal and simultaneously obtain the two independent vibrational properties of the two modes.

Since the ratio between the two resonance frequencies is known, there is also a way to calculate the correction factor associated to this change of frequencies. This correction factor compensates the deviation generated by the presence of entrained gas in the liquid stream.

More details about the MFT could be found in [7].

Promass Q has been developed to perform very well in applications such as crude oil or heavy fuel oil where, due to the fluid high viscosity bubbles are held by the liquid and consequently the resonator effect is strongly generated.



Figure 6. [Promass Q](#): improvements to liquid flow measurement under entrained gas using MFT approach.

MFT has recently been tested measuring water cut (WC) and gas void fraction (GVF) in DNV GL, an independent laboratory. In this case entrained gas was introduced as a third phase, in addition to water volume fraction in oil.

DNV GL provided a highly reliable reference for WCs. Several WCs values were generated. A comparison between the WC values obtained with and without MFT is shown in Fig. 7 (right). Drastic deterioration related to the GVF increasing is no longer present when MFT is used. Deviations were kept from 0 to -4 %, which are very consistent values for this type of application.

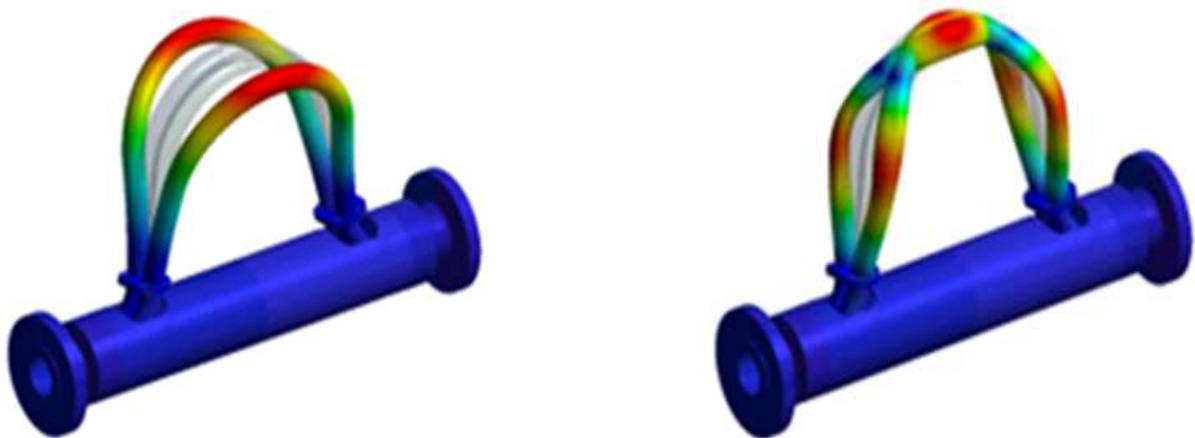


Fig.7 First (left) and third (right) oscillation mode shape of the Promass Q oscillating tube in a numerical simulation [7]



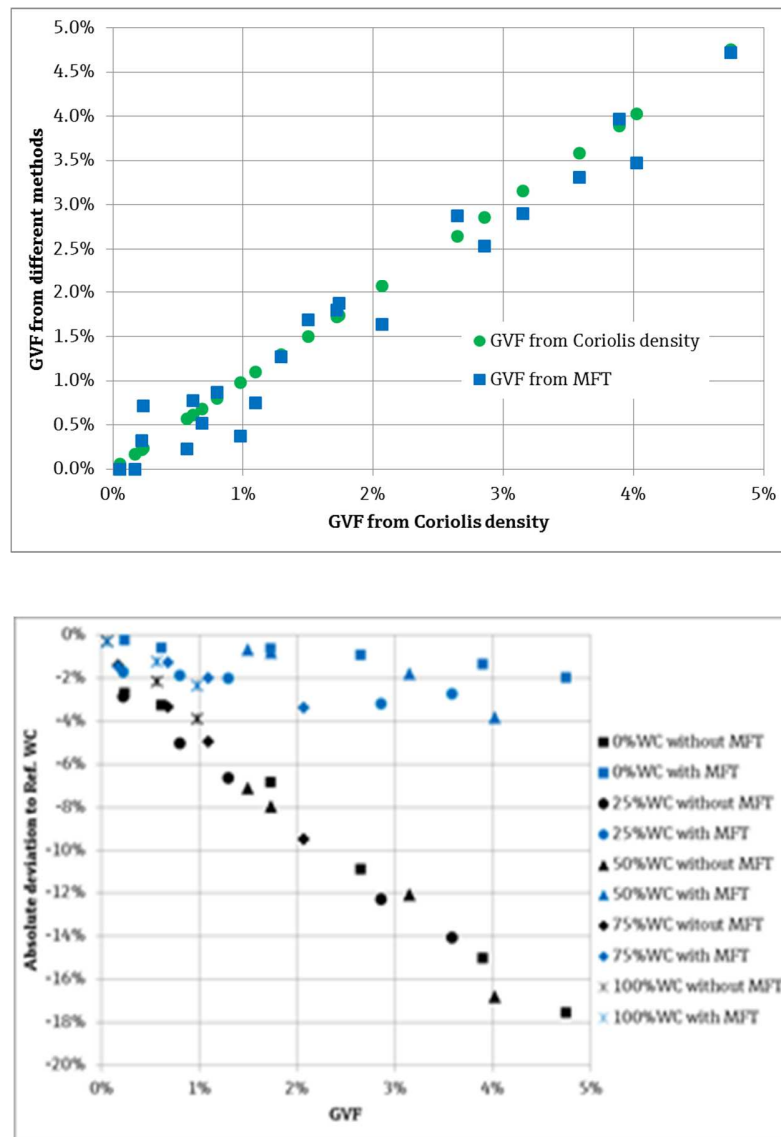


Fig. 8 GVF calculated from Coriolis density measurement vs. MFT (left); WC measurements by MFT corrected with GVF (right) [7].

#### 4. Direct viscosity measurement with Coriolis flow meters

Direct viscosity measurement is a very valuable approach to simplify and more efficient control loops involving this variable, instead of using indirect variables such as temperature.

Online viscosity measurement included as part of the measured variables for a Coriolis meter is available in Promass I.

##### 4.1 The mechanism

Viscosity measurement implemented in a straight pipe oscillating tube design, as shown in Fig. is not exactly a recent development, but worth to mention this capability in this paper, considering that it also represents an important enhancement to the mass Coriolis meters.

The required power to maintain the oscillating tube with a steady torsional oscillation in amplitude and frequency will be affected by the fluid viscosity. The oscillating tube is simultaneously driven by two resonance frequencies, the standard lateral mode at 600-700 Hz and by the new torsional mode at 900 Hz, Fig. . These oscillations are geometrically orthogonal, thus no interference occurs between them.



Fig. 9 [Promass I](#): in-line viscosity and mass flow measurement in a straight tube design.

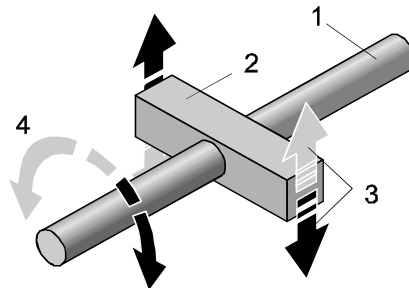


Fig. 10 Torsional vibration model on a straight pipe oscillating tube.

The result of this combination of excitation conditions are two truly independent measurements of viscosity and mass flow, without cross influence.

Measurement performance in mass flow and viscosity, as well as mass density, fulfills the requirements specified in most of the process applications with high repeatability and long-term stability. Viscosity measurement has shown to be consistent with laboratories results, see Figure 11, but differently from a discrete (e.g those made in laboratories) measurement approach the variable is continuously available.

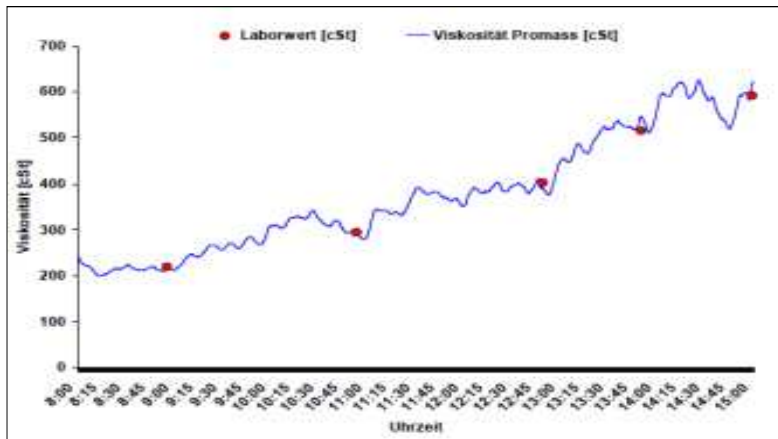


Fig.11 Comparison between laboratory results and Promass I viscosity measurements.

#### 4.2 The benefits

Online viscosity measurement represents a direct way to control blending process, fuel combustion and fuel oil products quality. In this case the benefit is not only the knowledge of the variable, but also to get that information continuously. This continuous approach will also prevent any consequence derived from undesired deviation to occur.

Applications such as heavy fuel oil preparation or combustion control in a burner are two typical examples where direct viscosity measurement represents an important saving and improving in efficiency and safety.

The combination of mass flow, density, temperature and now viscosity results in an effective way to measure with only one instrument basic process variables with low uncertainty and high reliability.

#### Conclusion

Coriolis principle of operation for mass flow measurement has been evolving to improve their primary results.

Current improvements for this technology expand the number and type of applications where these flowmeters could be used totally fulfilling the process requirements.

Online correction of the low Reynolds number effect allows maintaining the meter accuracy under the specified values in the international standards, also under high viscosity fluid conditions (real process conditions). This capability has been tested on international calibration facilities with consistent results.

Multi Frequency Technology application provides a reliable tool to compensate the error associated to the presence of entrained gas in a liquid fluid stream, WC as well as GVF calculations are also improved using this technology.

Direct viscosity measurement extends the multivariable nature of the Coriolis meters family and provides online information of an important process variable. Results obtained for this variable are totally consistent with the laboratory results.

### **References**

- [1] Cheeseright, R; Tombs, MS **Editorial**. Flow Measurement and Instrumentation, Volume 17 (2006) 315- 316.
- [2] Kutin, J; Bobovnik, G; Hemp, J; Bajsić, I, Velocity profile effects in Coriolis mass flowmeters: Recent findings and open questions. **Flow Measurement and Instrumentation**, Volume 17 (6) (2006) 349-358.
- [3] Miller, G; Belshaw, B. An Investigation into the performance of Coriolis and ultrasonic meters at liquid viscosities up to 300 cSt, **28<sup>th</sup> International North Sea Flow Measurement Workshop**, TÜV/NEL, Glasgow, 2008.
- [4] Kumar, V; Tschabold, P; Anklin, M, Fluid Structure Interaction (FSI) simulations on the sensitivity of Coriolis flow meter under low Reynolds flow, **15<sup>th</sup> Flow Measurement Conference (FLOMEKO)**, Taiwan, 2010.
- [5] Huber, C; Nuber, M; Anklin, M, **Effect of Reynolds number in Coriolis flow measurement**, Endress+Hauser Flowtec AG, KägenStr, Reinach, 2013.
- [6] Schlichting, H; Gersten, K, **Boundary-Layer Theory**, Springer ISBN 978-3-662-52919-5.
- [7] Zhu, H; Rieder, A, **An innovative technology for Coriolis metering under entrained gas conditions**, Endress+Hauser Flowtec AG, KägenStr, Reinach, 2016.

**Fecha de recepción del artículo:** 2017-07-24

**Fecha de aceptación del artículo:** 2017-08-16

## **NOTICIAS / NEWS**

### **10mo. Simposio Internacional Metrología 2017.**

El 10mo. Simposio Internacional Metrología 2017 sesionó en septiembre de este año en el Palacio de las Convenciones de La Habana. Contó con un total de 417 participantes, de ellos 29 delegados extranjeros de 11 países y el representante regional de la ONUDI.

Funcionarios de nivel nacional e internacional prestigiaron el evento con conferencias magistrales que brindaron información sobre la situación actual y proyecciones futuras para la Metrología en sus respectivas organizaciones, y propiciaron además el intercambio para el fortalecimiento de las relaciones de colaboración entre especialistas de instituciones homólogas en temas de interés en esta ciencia.

En las presentaciones orales se debatieron diversos temas que pusieron de manifiesto el impacto de las mediciones en diferentes campos de la vida social y económica del país, y abarcaron temáticas tales como el desarrollo de equipos y de métodos de medición, la realización de ensayos de aptitud, la estimación de la incertidumbre de la medición, la validación de técnicas analíticas y el uso de herramientas estadísticas para este objetivo, el control y vigilancia de parámetros ambientales, la actualización de la regulación cubana sobre Metrología, los aspectos del aseguramiento metrológico en la industria farmacéutica, el transporte aéreo y los servicios aeroportuarios, la producción agroalimentaria, la aplicación del sistema de gestión de las mediciones. La formación de recursos humanos en materia de Metrología y algunas reflexiones sobre la complejidad de su enseñanza, estuvieron también presentes.

El Simposio sirvió de marco para la celebración de dos talleres temáticos: sobre Volumen y Flujo y sobre Metrología Legal. El taller de volumen y flujo resultó un espacio importante para el debate sobre las mediciones en este sector, que reviste especial interés para el país. Sirvió para intercambiar sobre el nuevo laboratorio de calibración para productos claros de CUPET y las innovaciones tecnológicas que están introduciendo en sus instrumentos de medición las empresas líderes en el mundo.

El taller de Metrología Legal dedicó sus trabajos a los temas de la utilización de las mediciones en la transferencia fiscal de combustibles y las regulaciones de los productos preempacados en Cuba y el mundo.

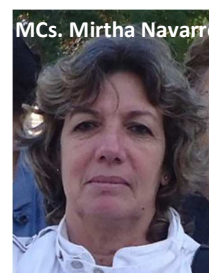
En el marco del Simposio se hicieron contactos con los invitados extranjeros y se constató la intención de los colegas de la región, la OIML, el BIPM y el SIM de continuar y fortalecer la colaboración con Cuba en el campo de la Metrología.

Cubanos y extranjeros han compartido conocimientos, prácticas, experiencias y relaciones, todo lo cual propiciará un trabajo más integral, sólido y consistente para desarrollar con la calidad y el

rigor técnico requeridos la gestión y la función metrológica con vista a la obtención de productos y servicios de calidad competitiva que satisfagan las expectativas para el desarrollo económico de nuestros países y la satisfacción de la población en general. La realización de encuentros como este, es sin dudas una necesidad de la comunidad metrológica.

### **Nuevas maestras en ciencias en el INIMET.**

La Lic. Sandra Pedro Valdés, Jefa del Laboratorio de Físico-Química y la Ing. Mirtha Navarro González, especialista Superior de Metrología del Laboratorio de Electricidad y Electrónica del INIMET defendieron exitosamente sus tesis de Maestría en Metrología, con temas relacionados con el aseguramiento metrológico a



los medios técnicos empleados por la Dirección Nacional de Transporte en la seguridad vial: etilómetros evidenciales e instrumentos de medición de la velocidad de los vehículos en movimiento.

Ambas tesis resumieron varios años de trabajo en estos temas, y fueron reconocidas por el consejo Científico del INIMET como resultados de la Innovación en Metrología, por su alto impacto tecnológico y social.

## **Servicios que presta el INIMET / Services available at INIMET**

El INIMET presta servicios científicos y tecnológicos especializados en la esfera de la Metrología, consistentes en:

Investigaciones en el campo de la Metrología.

- Aforo de tanques horizontales, verticales y soterrados para líquidos.
- Mediciones de alta exactitud.
- Calibración y verificación de instrumentos de medición.

Magnitudes que trabaja el INIMET

- |                  |                 |
|------------------|-----------------|
| - Electricidad   | -Volumen        |
| - Densidad       | - Masa          |
| - Presión        | - Temperatura   |
| - Físico Química | - Dimensionales |

Se brindan servicios de:

- Información Científico – técnica y asistencia bibliográfica
- Cursos y adiestramientos

Para más información contactar a: MCs.Yaima Oliva Llerena.  
Tel: 7863 7023 / Correo-e: [yaimao@inimet.cu](mailto:yaimao@inimet.cu)

## **Instrucciones a los autores**

### **Requisitos técnicos para presentar un artículo para su publicación en el Boletín.**

El Boletín Científico Técnico INIMET se edita desde el año 1982. Es una publicación semestral (junio y diciembre) que surge debido a la necesidad de divulgar los resultados de la investigación y de los trabajos científico técnicos efectuados en el campo de la Metrología y sus aplicaciones. Su objetivo es contribuir al incremento de la visibilidad del impacto de los resultados y tributar a la formación de una cultura general sobre esta ciencia.

### **Datos de los autores:**

Escribir el nombre y los dos apellidos de cada autor, los dos apellidos separados por un guión. Indicar una muy breve reseña curricular de los autores: el grado científico o académico del autor o autores y la categoría científica o docente si se posee. Indicar la Institución a la que pertenecen, el Organismo correspondiente y el país. En caso de ser más de una Institución se utilizará números para su identificación, incluyéndose la leyenda correspondiente. Indicar la

responsabilidad administrativa que ocupa, si procede. Incluir la dirección de correo electrónico de al menos un autor, para su localización.

## **2. Tipos de colaboración aceptadas:**

Los trabajos deben ser originales y no deben estar postulados de forma simultánea en otra publicación. Deben estar enfocados hacia la Metrología, ya sean trabajos de divulgación científica, de presentación de resultados de la actividad de investigación científica o de la actividad laboral. Se aceptarán artículos y otros materiales como comunicaciones, noticias y cartas al editor.

Se requiere adjuntar la carta de originalidad en ocasión de la presentación del artículo y la cesión de derechos para su difusión con la firma de todos los autores cuando les sea comunicada la aprobación para la publicación del trabajo.

## **3. El artículo en su estructura debe incluir:**

Título (en español e inglés); resumen (en español e inglés); palabras clave (en español e inglés); introducción; materiales y métodos o Desarrollo (según el tipo de artículo); resultados; discusión; conclusiones; agradecimientos; referencias bibliográficas; bibliografía.

## **4. Los artículos se presentan con el siguiente formato:**

Los trabajos se envían en soporte informático (Microsoft Word), en español, con título, resumen y palabras clave en español e inglés. La extensión aceptada del trabajo es (de 8 páginas a 15) páginas (incluyendo tablas y gráficos), con una tipografía Arial, tamaño de fuente 11, interlineado de párrafo a un espacio, en formato normal, dejando 2,5 cm de espaciado en los cuatro márgenes y en formato carta 8 ½ " x 11" (216 mm x 279 mm). Las tablas y gráficos deben presentar su correspondiente leyenda, la cual no debe ser mayor que 2 líneas.

## **5. Las ilustraciones:**

Fotografías, diagramas y dibujos: Con formato JPG o TIFF, ancho entre 455 píxeles y 2005 píxeles.

Figuras y gráficos: Se aceptan los gráficos en Excel y Power Point, adjuntando el archivo con las planillas de datos.

En la versión impresa los gráficos se verán en blanco y negro por lo que deben tener cuidado de utilizar tramas claramente definidas para distinguir el contenido.

## **6. Las Referencias Bibliográficas:**

Deben aparecer al final del texto, ordenado numéricamente según el orden en que aparezcan y estructurado siguiendo lo indicado en los requisitos uniformes (Vancouver) en su quinta edición (1997).



### **7. Proceso de arbitraje:**

El BCT INIMET somete los artículos a un proceso de arbitraje, en la modalidad a doble ciego. Una vez que se presenta el artículo y la carta de originalidad se evaluará si cumple con los lineamientos establecidos en la política editorial, de ser así pasa a ser evaluado por los árbitros, que serán especialistas en los temas y pueden dictaminar los siguientes resultados: aprobado sin cambios, aprobado con sugerencias opcionales, condicionados a cambios obligatorios (reenvío), rechazado.

En el caso de que los árbitros no coincidan en la aceptación o rechazo de un artículo se recurrirá a un tercero, en dependencia de los resultados, corresponde al Director Editorial tomar la decisión final.

### **8. Política de propiedad intelectual**

El autor autoriza al INIMET de manera ilimitada en el tiempo para que incluya su trabajo en el BCT INIMET y para reproducirlo, editarlo, distribuirlo, exhibirlo y diseminarlo en el país y en el extranjero ya sea de manera impresa, electrónica o en cualquier otro medio. Todo esto sin perjuicio del respeto a los derechos de autoría moral de los autores. El autor cede derechos no exclusivos al Boletín, por lo que puede utilizarlo siempre que cite el documento original.

Los autores igualmente deben estar conscientes de que el Boletín protege su contenido (los artículos científicos) mediante una licencia CreativeCommons (bienes comunes creativos) que funciona bajo las siguientes condiciones:



Permite copiar, distribuir, mostrar y ejecutar la obra, siempre dando testimonio de la autoría del mismo, pero solo copias literales (sin derivaciones del mismo) y sin propósitos comerciales.

Por problemas de espacio en esta sección no podemos incluir las instrucciones a los autores de manera íntegra. Dicho documento incluye una guía detallada de cómo se deben redactar las diferentes secciones de un artículo científico, así como más información sobre el proceso de arbitraje. También ejemplos concretos del orden y la puntuación que deben seguir al elaborar la bibliografía y las referencias bibliográficas. Si desea esa información escriba a nuestra dirección electrónica solicitando las instrucciones completas.

**Correo-e:** [normateca@inimet.cu](mailto:normateca@inimet.cu)

Los originales pueden remitirse además a: Consulado No. 206 e/ Animas y Trocadero, Centro Habana, La Habana, Cuba. CP 10 200.