

Algoritmo matemático para la calibración y cálculo de incertidumbre en tanques horizontales de cabezas planas, inclinados y con centros de medición desplazados (THCPICD)

Vladimir Pacheco González,
Universidad de Cienfuegos.
(vpacheco@ucf.edu.cu)

RESUMEN. En el siguiente trabajo se presenta un algoritmo matemático en etapas, para el cálculo del volumen parcial de llenado de tanques horizontales de cabezas planas, inclinados y con su centro de medición separado del centro geométrico del recipiente y tiene la finalidad de dar respuesta a la carencia de este procedimiento en las normas cubanas.

En el artículo se muestra además los pasos generales para la obtención de el valor de la incertidumbre de la calibración con un factor de cobertura 2, y así el resultado poderlo insertar en la cadena nacional de trazabilidad de la magnitud Volumen y Gasto.

SÍNTESIS. Cuba ha identificado al ahorro y control de los recursos energéticos, como una de las fuentes de ingresos mas alta de que puede disponer. El presente trabajo tiene como propósito, llevar a la práctica los conocimientos mas generales en materia de estimación de Incertidumbre en las calibraciones; para calcular la correspondiente a las calibraciones de THCPICD. Se identifican los pasos de este proceso y las fuentes de incertidumbre. Los resultados obtenidos demuestran la viabilidad del uso del método geométrico de aforo de recipientes para el caso que nos ocupa, cuando no se dispone de los recursos para ser llevado a cabo el aforo por método volumétrico, o simplemente la accesibilidad al recipiente en su lugar de uso solo permite mediciones geométricas del mismo.

DESARROLLO

Procedimiento de calibración de RHCPICD

Para la calibración de RHCPICD se seguirán los pasos de la figura 1, según la norma API (API Standard 255 Standard method for measurement and calibration of horizontal tanks, 1987). En el aforo de recipientes siempre se comprueban antes de la calibración algunas condiciones físicas y de seguridad necesaria, previas a la calibración que pueden invalidar la ejecución del trabajo y que se muestran en el diagrama, a continuación se ejecuta la tarea fundamental de determinación de las capacidades del recipiente. Todas las actividades se re-

gistran en el correspondiente documento, para la posterior emisión de los resultados.

La boca de medición desplazada del centro del tanque puede ocupar diferentes posiciones características, vinculadas con el punto de choque de la varilla con el tanque y la forma de llenado del tanque. La varilla pudiera tocar el fondo del tanque o una cabeza del tanque, y el líquido pudiera llenar primero el largo y después la altura o primero la altura y después el largo. Un estudio realizado (ver 3.2) demuestra que los tanques de medición que se usan en combustibles y que están inclinados con la boca de medición desplazada, la varilla choca el fondo del tanque y el líquido llena primero el largo del

Ecuación del tanque: $(Z - r)^2 + X^2 = r^2$

r -- radio del cilindro

(2.3)

l_m (m)- Largo del volumen muerto h_m – Altura del volumen muerto	$l_{total,parcial}$ (w)- Largo a partir del largo del volumen muerto sin llegar al largo total
V_{muerto} (Vm) – Volumen muerto del tanque h_{total} – altura total del tanque	$h_{total\ varilla}$ (h) – Altura total de la varilla en el tanque
E_p (s)- Espesor de las paredes del cuerpo del tanque (dato de campo)	E_c (s) – Espesor de las paredes de las cabezas del tanque (dato de campo)
P - Perímetro del tanque (dato de campo)	$l_{increment}$ (c)- Longitud de llenado del tanque
l_{total} (l)- Longitud total del tanque (dato de campo)	α - Angulo de inclinación del tanque. $\alpha = \arcsen \frac{d}{l_{total}}$
$h_{increment}$ – Altura incrementada en el llenado del tanque, sin llenar a cubrir el largo del mismo, después de cubierto el largo se convierte en la $h_{total\ parcial(etapa2)}$	l_{tope} (t)- Largo desde el borde del tanque a la boca de medición en el sentido de llenado del tanque l_r – Diferencia entre l_{tope} y l_m
$h_{increment\ (etapa\ 3)}$ – Altura incrementada en el llenado del tanque, después de cubierto el largo del mismo l_{tope} – Longitud del tanque hasta la boca de medición en el sentido de llenado del tanque (dato de campo)	$h_{varilla}$ (v)- Altura de la varilla, marcada por el volumen de líquido incorporado al tanque (dato de campo) d- Cateto que marca la diferencia de planos horizontales de los bordes extremos del tanque para determinar el ángulo de inclinación (dato de campo)

DETERMINACIÓN DE LAS CAPACIDADES DEL RECIPIENTE

La determinación de las capacidades del recipiente se realiza en cuatro etapas

- *Primera etapa:* Determinación del volumen muerto: Consiste en la determinación de aquella cantidad de contenido de líquido que no se registra en la varilla o cinta de medición de la altura del contenido del líquido.
- *Segunda etapa:* Determinación del volumen del líquido hasta la altura de la varilla o cinta de medición de la altura del contenido del líquido, que determina el alcance de la longitud total del tanque por el líquido.

- *Tercera etapa:* Determinación del volumen del líquido hasta la altura de la varilla o cinta de medición de la altura del contenido del líquido, que determina el alcance de la altura total del tanque por el líquido.
- *Cuarta etapa:* Determinación del volumen del líquido hasta la altura de la varilla o cinta de medición de la altura del contenido del líquido, que determina el alcance de la longitud del tanque por el líquido por la parte superior del mismo hasta la boca o lugar de medición, final del aforo.

Primera Etapa: El volumen muerto se determina por medio de la integral triple (2.4)

$$Vm = 2 \int_0^m dy \int_0^{a+by} dz \int_0^{\sqrt{r^2 - (z-r)^2}} dx = V_{registro} \quad (2.4)$$

$Z = a + by \quad a, b \in R \quad (2.5)$ es la ecuación de la recta que representa la proyección del plano del líquido, donde las constantes a y b se buscan mediante los puntos $P_1(l_m, 0)$ y $P_2(0, h_m)$	$a = h_m \quad (2.6)$ $h_m = m \tan \alpha \quad (2.7)$ $m = t - l_r \quad (2.8)$ $I_r = h \sin \alpha \quad (2.9)$
$m = t - h \sin \alpha \quad (2.10)$	$a = (t - h \sin \alpha) \tan \alpha \quad (2.11)$
$h = \frac{h_{total}}{\cos \alpha} = \frac{2r}{\cos \alpha} \quad (2.11a)$	
de (2.1), (2.2), (2.10), (2.11), (2.11a) $a = \left((t-s) - \frac{P-2ps}{p \cos \arcsen \frac{d}{l-2s}} \frac{d}{l-2s} \right) \tan \arcsen \frac{d}{l-2s} \quad (2.11b)$	$m = \left((t-s) - \frac{P-2ps}{p \cos \arcsen \frac{d}{l-2s}} \frac{d}{l-2s} \right) \quad (2.11c)$
$b = -h_m/m \quad (2.12)$	$\tan \alpha = \frac{h_m}{m} \quad (2.13)$
$b = -\tan \alpha \quad (2.14)$	de (2.2) y (2.14) $b = -\tan \arcsen \frac{d}{l-2s} \quad (2.14a)$

Segunda Etapa: El volumen del líquido hasta la altura de la varilla o cinta de medición de la altura del contenido del líquido, que determina el alcance de la longitud total del tanque por el líquido y se calcula por:

$$V = 2 \int_0^w \int_0^{a+by} \int_0^{\sqrt{r^2-(z-r)^2}} dx = V_{registro} \quad (2.15)$$

Nota: El volumen calculado por esta fórmula ya tiene incorporado el volumen muerto de la primera etapa.

$Z = a + by \quad a, b \in R \quad (2.16)$ es la ecuación de la recta que representa la proyección del plano del líquido, donde las constantes a y b se buscan mediante los puntos $P_1(l_{total,parcial}, 0)$ y $P_2(0, h_{total,parcial})$	$l_{total,parcial}(w) = l_{incrm} + l_m(m) \quad (2.17)$ $l_{incrm} = \frac{h_{varilla}(v)}{\sin \alpha} \quad (2.18)$
$w = \left(\frac{v}{\sin \alpha} + m \right) m \quad (\text{ver } 2.11c) \quad (2.19)$	$a = h_{total,parcial} \quad (2.20)$ $h_{total,parcial} = w \tan \alpha \quad (2.21)$
de (2.17), (2.18) y (2.19) $a = \tan \alpha \left(\frac{v}{\sin \alpha} + m \right) \quad (2.22)$	a (ver 2.2), b (ver 2.14), r (ver 2.1)

Tercera Etapa: Cubierta la longitud total, el nivel de líquido aumenta parejo en ambas caras del tanque. El volumen del líquido hasta la altura de la varilla o cinta de medición de la altura del contenido del líquido, que determina el alcance de la altura total del tanque por el líquido, se determina por medio de la integral triple.

$$V = 2 \int_0^{l-2s} dy \int_0^{k+by} dz \int_0^{\sqrt{r^2-(z-r)^2}} dx + 2 \int_0^{l-2s} dy \int_{k+by}^{a+by} dz \int_0^{\sqrt{r^2-(z-r)^2}} dx \quad (2.30)$$

Nota: El volumen calculado por esta fórmula ya tiene incorporado el volumen de las dos etapas anteriores.

$Z = a + by \quad a, b \in R \quad (2.31)$ es la ecuación de la recta que representa la proyección del plano del líquido, donde las constantes a y b se buscan mediante los puntos $P_1(0; a)$ $P_2(l_{total}; h_{increm.etapa3}^*)$	$a = h_{increm.etapa3}^* + h_{total\ parcial.etapa2} \quad (2.32)$ $h_{increm(etapa3)}^*$ – se ha resaltado con el asterisco para simbolizar la altura acumulada en la etapa 3
El valor de “ a ” es el elemento que en esta etapa depende de la altura de la varilla ($h_{varilla}$) y cuya representación se puede ver en la figura 2.7	
$p = h_{varilla(v)} - h_{varilla.etapa2\ final} \quad (2.33)$	$h_{varilla.etapa2\ final} = (l-2s - l_m) \sen \alpha \quad (2.34)$
$\cos \alpha = p/q \quad (2.35)$	$q = \frac{h_{varilla} - \sen \alpha (l-2s - l_m)}{\cos \alpha} \quad (2.36)$
$h_{etapa2\ final} = (l-2s) \tan \alpha \quad (2.37)$	$a = h_{etapa2\ final} + q \quad (2.38)$
de 2.2, 2.36, 2.37, 2.38 $a = \frac{h_{varilla} - \sen \alpha (l-2s - l_m)}{\cos \alpha} + (l-2s) \tan \alpha \quad (2.39)$	$\alpha = \frac{h_{varilla} + (d / (l-2s)) l_{m(m)}}{\cos (\arcsin (d / (l-2s)))} \quad (2.40)$
a (ver 2.2) b (ver 2.14) r (ver 2.1)	

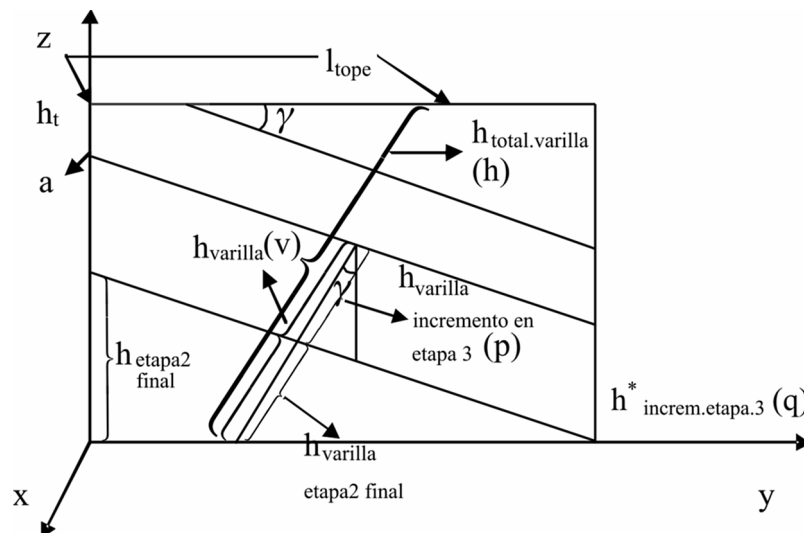


Fig. 5 Esquema para la cuarta etapa de medición.

Cuarta Etapa: (etapa final del aforo). Cubierta la altura total, el líquido comienza a cubrir la longitud superior del tanque. El volumen del

líquido hasta la altura de la varilla o cinta de medición de la altura del contenido del líquido, que determina el alcance de la longitud del

tanque por el líquido, por la parte superior del mismo hasta la boca o lugar de medición (longi-

tud tope), se determina por medio de la integral triple (2.44)

$$V = 2 \int_0^{l_{\text{incrementetapa.4}}} dy \int_{a+by}^a dz \int_0^{\sqrt{r^2-(z-r)^2}} dx + 2 \int_{l_{\text{incrementetapa.4}}}^{l-2s} dy \int_{a+by}^{q+by} dz \int_0^{\sqrt{r^2-(z-r)^2}} dx \quad (2.44)$$

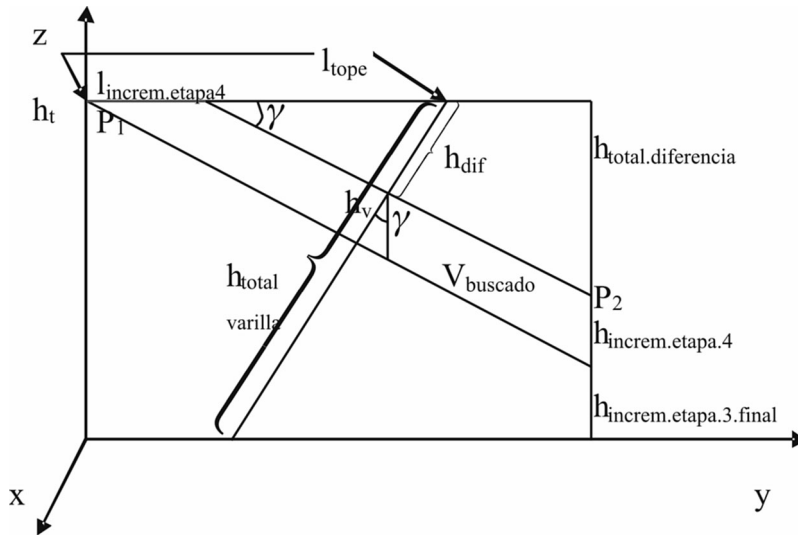


Fig. 6 Esquema para la cuarta etapa de medición.

$$Z = a + by \quad a, b \in R \quad (2.45)$$

es la ecuación de la recta que representa la proyección del plano del líquido cuando este ha concluido la tercera etapa; a representa la altura total del tanque y b la pendiente del nivel del líquido, al igual que en las etapas anteriores.

$$Z = q + by \quad a, b \in R \quad (2.46)$$

es la ecuación de la recta que representa la proyección del plano del líquido cuando el líquido comienza a llenar el tanque en la cuarta etapa, hasta que el extremo izquierdo del mismo alcance la boca de medición

$$a = \text{altura.total} = \frac{p - 2\pi s}{\pi} \quad (2.47)$$

$$q = a + h_{\text{increm.etapa 4}} \quad (2.48)$$

$$q = -\tan \alpha \quad (\text{ver 2.14})$$

En el caso de q, matemáticamente es un intercepto con el eje "z" que se va fuera de los límites del tanque, pero que es muy útil en los cálculos y se obtiene mediante la siguiente secuencia.

$$h_{\text{increm.etapa 4}} = \frac{h_v}{\cos \alpha} \quad (2.49)$$

$$h_v = h_{\text{varilla (v)}} - h_{\text{varilla.etapa3}} \quad (2.50)$$

$$\sin \alpha = \frac{h_{\text{varilla.total(h)}} - h_{\text{varilla.etapa3}}}{l_{\text{tope (t)}}} \quad (2.51)$$

$$h_{\text{varilla.etapa3}} = h - (t - s) \sin \alpha \quad (2.52) \text{ y}$$

$$h_{\text{varilla.etapa3}} = h - (t - s)d/(1 - 2s) \quad (2.53)$$

$h_v = v - h + (t - s)d/(l - 2s)$ (2.54)	$h_{\text{increm. etapa4}} = \frac{v - h + (t - s)d/(l - 2s)}{\cos \alpha}$ (2.55)
de 2.47; 2.55 $q = \frac{p - 2\pi s}{\pi} + \frac{v - h + (t - s)d/(l - 2s)}{\cos \alpha}$ (2.56)	$\text{sen } \alpha = \frac{h_{\text{varilla, total}(h)} - h_{\text{varilla}(v)}}{l_{\text{tope}(t)} - l_{\text{increm. etapa4}}}$ (2.57)
$l_{\text{increm. etapa4}} = t - \frac{l(h - v)}{d}$ (2.58)	

Esta etapa se ejecutará hasta que se cumpla que

$$l_{\text{increm. etapa4}} \leq l_{\text{tope}(t)} \quad (2.59)$$

(esta última es una medición de campo) que se corresponde con la altura total de la varilla $h_{\text{total varilla}(h)}$, la cual es una medición de campo.

EVALUACIÓN Y EXPRESIÓN DE LA INCERTIDUMBRE DEL RESULTADO DE LA MEDICIÓN

La incertidumbre de las mediciones es un parámetro de competencia técnica de un laboratorio y de competencia comercial entre laboratorios, por lo que cada procedimiento que se establezca y la forma de cálculo de los valores, resultan elementos totalmente novedosos

En la figura se detallan los pasos generales para la evaluación y expresión de la incertidumbre.

CONCLUSIONES

El reconocimiento tácito de que:

- En Cuba los tanques horizontales se montan con un grado de inclinación determinado.
- El control de combustibles y líquidos precitados es de vital importancia para el país.
- Los medios técnicos para el aforo volumétrico de los recipientes son costosos de adquirir y mantenerlo que ha permitido el desarrollo del presente trabajo.

Para esto se han tenido en cuenta todos los requisitos establecidos en la NC-ISO/IEC 17025:2006, los establecidos por la ONARC y otras normas y documentos tanto nacionales como internacionales. Como parte de este trabajo se realizó un profundo estudio de la guía de incertidumbre ISO y se ha elaborado un procedimiento general para la estimación de la incertidumbre de las calibraciones y se cuenta con un procedimiento para realizar el aforo de

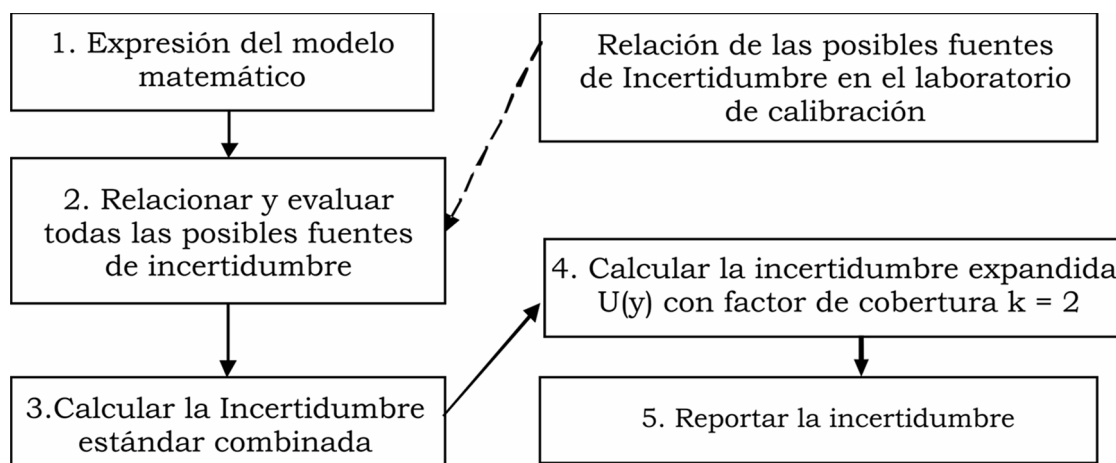


Fig. 7 Procedimiento general para la evaluación, cálculo y expresión de la incertidumbre.

THCPICD y además la estimación de la incertidumbre del mismo permite insertar el resultado de la calibración laboratorio en la cadena de trazabilidad correspondiente.

BIBLIOGRAFÍA

- A2LA Asociación Americana para la Acreditación de Laboratorios. Interim Policy on Measurement Uncertainty for Testing Laboratories. (2000).
- API Standard 2551 Standard method for measurement and calibration of horizontal tanks. (1987)
- BIPM, ISO, OIML(1993). Guía BIPM/ISO (GUM) Para la expresión de la incertidumbre en las mediciones. Colectivo de autores. (2006).
- Trazabilidad e incertidumbre de los resultados experimentales. Retrieved from http://www.ciao.es/Trazabilidad_e_incertidumbre_de_los_resultados_experimentales_54296.
- EAL-R2, European Cooperation for Accreditation (of Laboratories): Expression of the Uncertainty in Calibration, Requirement Document. (1998).
- Gaceta Oficial de la República de Cuba Decreto-Ley No.182 de Normalización y Calidad. (1998).
- ISO 5725-Parte 1 a 6:1999, Exactitud (veracidad y precisión) de los resultados y métodos de medición.
- NC 90-04-13:81 Recipientes Horizontales de Cabezas Planas. Métodos y medios de verificación.(1981)
- NCISO/IEC 17025:2006 Requisitos generales para la competencia de los laboratorios de ensayo y de calibración. Organización Internacional de Normalización. (2006).
- Oficina Nacional de Normalización. (2005). Servicio Nacional de metrología. Retrieved from http://www.nc.cubaindustria.cu/metrologia/servicio_nac.htm.
- ONARC. Órgano Nacional de Acreditación de la República de Cuba. Política de Incertidumbre de las mediciones. (2004).
- Organización Internacional de Normalización. (1999). ISO 3534-1:1993, Estadísticas. Vocabulario y símbolos-Parte I Probabilidad y términos estadísticos generales.

ABSTRACT. In this work it is presented a mathematical algorithm in stages for the calculation of the partial volume for the filling of horizontal tanks with inclined flat heads and with its measuring center separated from the geometrical one of the container. It is also intended to address this lack in the Cuban norms.

This paper also shows the general steps for obtaining the value of uncertainty of the calibration with a coverage factor 2 and then the result could be inserted to the national chain of traceability of the magnitude Volume and Expense.