

**PROPOSAL FOR THE CALIBRATION OF INCLINED HORIZONTAL TANKS WITH DISPLACED MEASURING CENTRES**

Vladimir Pacheco-González<sup>1</sup>

**E-mail:** [vpacheco@ucf.edu.cu](mailto:vpacheco@ucf.edu.cu)

**ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-8493-0915>

Miguel Santana-Justiz<sup>1</sup>

**E-mail:** [msantana@ucf.edu.cu](mailto:msantana@ucf.edu.cu)

**ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-3586-8515>

Mario J. Aranzola-Rodríguez<sup>1</sup>

**E-mail:** [mjaranzola@ucf.edu.cu](mailto:mjaranzola@ucf.edu.cu)

**ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-5402-0272>

<sup>1</sup> Universidad de Cienfuegos "Carlos Rafael Rodríguez" Cuba.

**Cita sugerida (APA, séptima edición)**

Pacheco-González, V., Santana-Justiz, M., & Aranzola-Rodríguez, M. J. (2023). Propuesta para aforar tanques horizontales inclinados con centros de medición desplazados. *Revista UGC 1(2)*, 13-19.

**RESUMEN**

Muchos procesos vinculados a las actividades de producción y servicio pasan por alguna medición en el decursar de su desarrollo. Estas mediciones llevan a la toma de importantes decisiones. Es una premisa entonces que la calidad de las mediciones sea asegurada. Es importante señalar que el gobierno cubano ha identificado al ahorro y control de los recursos energéticos como una de las fuentes de ingresos más alta de la que puede disponer en la actualidad. El sector agropecuario como alto consumidor de combustibles necesita de este control. Los recipientes por necesidad operativa, muchas veces, no son correctamente horizontales y la mayoría no entran dentro del campo de la metrología legal. Con este objetivo se escribió un procedimiento para la calibración de recipientes horizontales de cabezas planas (RHCP) con grado de inclinación significativo y con el centro de medición desplazado. Se identifican en cada uno de los pasos de este proceso, las fuentes principales de incertidumbre y se analiza si el resultado al cual se arribó permite, a pesar de no aplicar todas las correcciones establecidas para los tanques de operación legal, que la nomenclatura cumpla los requisitos establecidos en la cadena de trazabilidad correspondiente. Los resultados obtenidos demuestran la viabilidad del uso del método geométrico de aforo de recipientes para estos casos, cuando no se dispone de los recursos para ser llevado a cabo de una manera mucho más exacta.

**Palabras clave:**

Calibración, incertidumbre, trazabilidad.

**ABSTRACT**

Many processes linked to production and service activities go through some measurement in the course of their development. These measurements lead to making important decisions. It is a premise then that the quality of the measurements is ensured. It is important to point out that the Cuban government has identified the saving and control of energy resources as one of the highest sources of income that it can currently have. The agricultural sector as a high fuel consumer needs this control. The containers, due to operational necessity, are often not correctly horizontal and most of them do not fall within the field of legal metrology. With this objective, a procedure was written for the calibration of horizontal flat-headed vessels (RHCP) with a significant degree of inclination and with the center of measurement displaced. In each of the steps of this process, the main sources of uncertainty are identified and it is analyzed whether the result reached allows, despite not applying all the corrections established for legally operated tanks, that the nomenclature complies with the requirements established in the corresponding traceability chain. The results obtained demonstrate the feasibility of using the geometric method of gauging containers for these cases, when the resources are not available to be carried out in a much more exact manner.

**Keywords:**

Calibration, uncertainty, traceability

## INTRODUCCION

En Cuba los combustibles y otros líquidos importantes se almacenan muchas veces en tanques horizontales de cabezas planas. Para la calibración (aforo) de estos recipientes existen normas cubanas (Cuba. Oficina Nacional de Normalización, 2012) e internacionales (American Petroleum Institute, 2009). En las mencionadas normas internacionales y otras se recomienda que, si estos tanques están inclinados y la relación altura de inclinación, altura de tanque es menor que 0.012, se puede no tener en cuenta la misma en el proceso de calibración. Para los recipientes que se usan tanto en operaciones de control (procesos), como en operaciones críticas y cuya inclinación exceda el valor referido, y la medición del contenido de líquido se ejecute en el centro del mismo; existen tablas de corrección en las normas. En Cuba los recipientes horizontales por lo general están inclinados mucho más de lo permitido debido a:

- Error en el montaje.
- Facilidades para la limpieza.
- Escurrimiento del contenido por necesidad.

Otra peculiaridad importante para el caso cubano es que el lugar de medición de los recipientes muchas veces está desplazado del centro por diseño constructivo de origen, (los tanques de fabricación soviética, por

ejemplo), también existen modificaciones en los tanques por problemas de seguridad económica.

Todo lo antes expuesto justifica la necesidad de diseñar un algoritmo para la calibración de recipientes horizontales con un grado de inclinación notable, con el centro de medición desplazado y que la incertidumbre cumpla con los requerimientos establecidos.

## MATERIALES Y METODOS

Para la calibración de RHCP se seguirán los pasos en la figura 1, el procedimiento se basa en la norma API correspondiente (American Petroleum Institute, 2009). En el aforo de recipientes (figura 2), siempre se comprueban antes de la calibración algunas condiciones físicas y de seguridad necesarias, 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 registran en el correspondiente documento para la posterior emisión de los resultados y estimación de la incertidumbre (United States Department of Commerce Technology Administration, 1994; International Organization for Standardization-International Electrotechnical Commission, 1995; Cuba. Oficina Nacional de Normalización, 1996; Cuba. Consejo de Estado, 1998; Colectivo de autores, 2004).

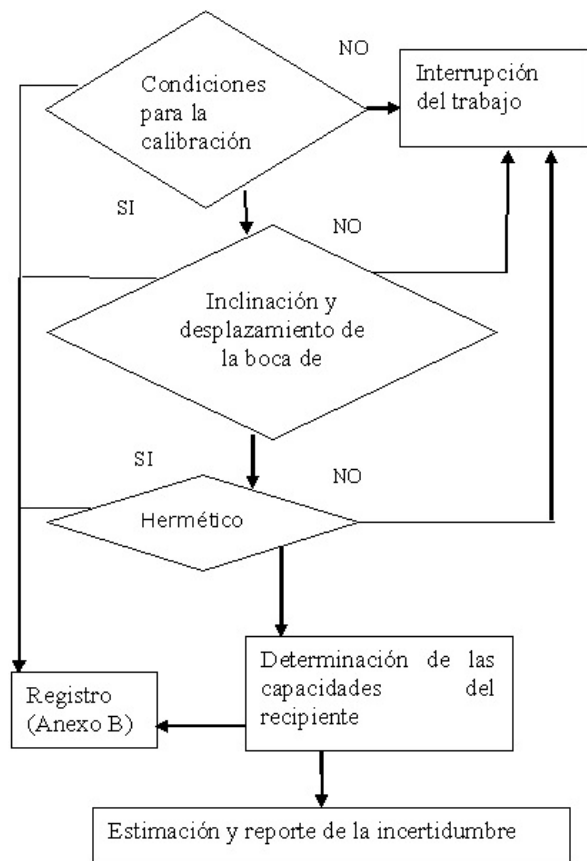


Figura 1. Procedimiento general para la calibración de RHCP.

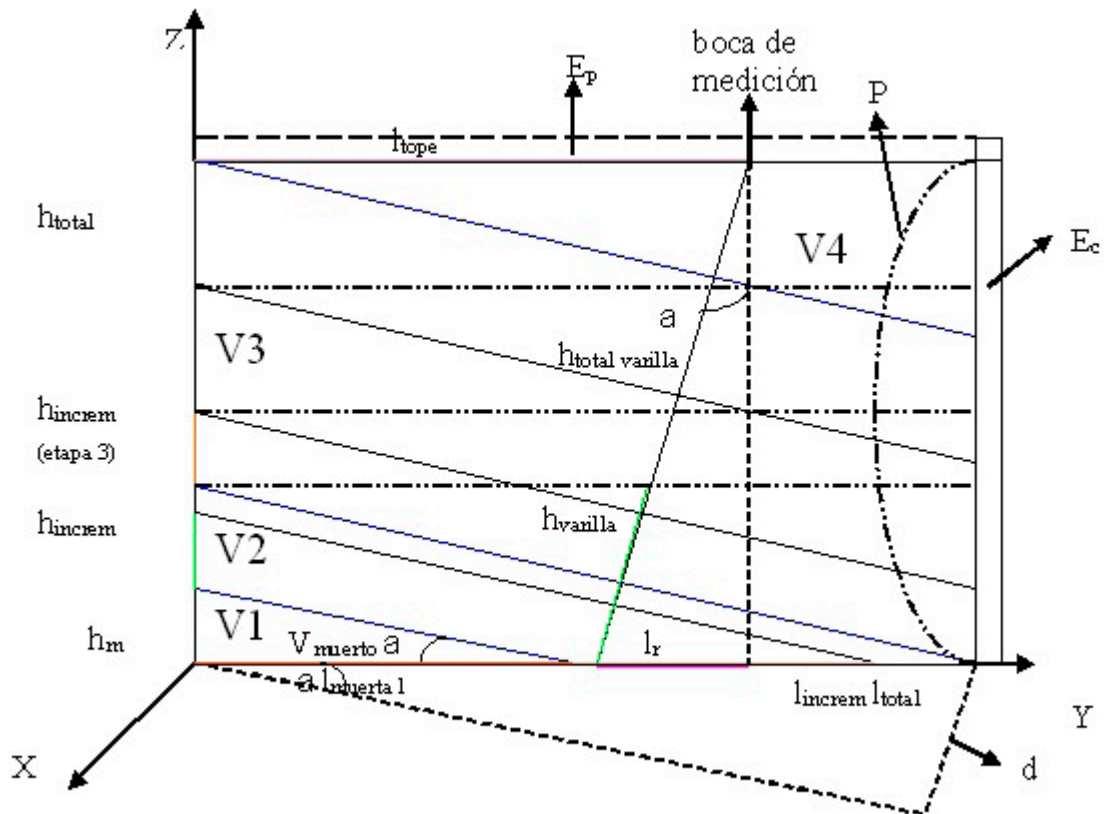


Figura 2. Esquema general del RHCP inclinado.

1.  $l_m$  (m)- Largo del volumen muerto
2.  $l_{total,parcial}(w)$ - Largo a partir del largo del volumen muerto sin llegar al largo total
3.  $h_m$  - Altura del volumen muerto
4.  $V_{muerto}$  ( $V_m$ ) - Volumen muerto del tanque
5.  $h_{total\ varilla}$  ( $h$ ) - Altura total de la varilla en el tanque
6.  $h_{total}$  - altura total del tanque
7.  $P$  - Perímetro del tanque (dato de campo)
8.  $E_c$  (s) - Espesor de las paredes de las cabezas del tanque (dato de campo)
9.  $E_p$  (s)- Espesor de las paredes del cuerpo del tanque (dato de campo)
10. Nota: Por simplicidad se asume que los espesores ambos son iguales
11.  $l_{tope}$  (t)- Largo desde el borde del tanque a la boca de medición en el sentido de llenado del tanque
12.  $l_{total}$  (l)- Longitud total del tanque (dato de campo)
13.  $l_{increment}$  (c)- Longitud de llenado del tanque
14.  $h_{increment}$  - Altura incrementada en el llenado del tanque, sin llenar a cubrir el largo del mismo (después de cubierto el largo se convierte en la  $h_{total\ parcial(etapa2)}$ )
15.  $h_{increment\ (etapa\ 3)}$  - Altura incrementada en el llenado del tanque, después de cubierto el largo del mismo
16.  $h_{varilla}(v)$ - Altura de la varilla, marcada por el volumen de líquido incorporado al tanque (dato de campo)
17.  $l_{tope}$  - Longitud del tanque hasta la boca de medición en el sentido de llenado del tanque (dato de campo)
18.  $l_r$  - Diferencia entre  $l_{tope}$  y  $l_m$

19. d- Cateto que marca la diferencia de planos horizontales de los bordes extremos del
20. tanque para determinar el ángulo de inclinación (dato de campo)
21.  $\alpha$  - Angulo de inclinación del tanque.

## RESULTADOS Y DISCUSION

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

$$Vm = 2 \int_0^m dy \int_0^{a+by} dz \int_0^{\sqrt{r^2 - (z-r)^2}} dx = Vregistro \quad \text{donde:}$$

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

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  $P_2(0, h_m)$

- $a = h_m$
- $h_m = m \tan \alpha$
- $m = t - l_r$
- $lr = h \operatorname{sen} \alpha$
- $m = t - h \operatorname{sen} \alpha$
- $a = (t - h \operatorname{sen} \alpha) \tan \alpha$

- $h = \frac{h_{total}}{\cos \alpha} = \frac{2r}{\cos \alpha}$
- $a = \left( (t - s) - \frac{P - 2\pi s}{\pi \cos \operatorname{arcsen} \frac{d}{l - 2s}} \frac{d}{l - 2s} \right) \tan \operatorname{arcsen} \frac{d}{l - 2s}$
- $m = \left( (t - s) - \frac{P - 2\pi s}{\pi \cos \operatorname{arcsen} \frac{d}{l - 2s}} \frac{d}{l - 2s} \right)$
- $b = -h_m/m$
- $\tan \alpha = \frac{h_m}{m}$
- $b = -\tan \alpha$
- $b = -\tan \operatorname{arcsen} \frac{d}{l - 2s}$

### 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, se determina por medio de la siguiente integral triple

$$V = 2 \int_0^w dy \int_0^{a+by} dz \int_0^{\sqrt{r^2 - (z-r)^2}} dx = Vregistro$$

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

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

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  $P_2(0, h_{total, parcial})$

- $l_{total, parcial}(w) = l_{increment} + l_m(m)$
- $l_{increment} = \frac{h_{varilla}(v)}{\operatorname{sen} \alpha}$
- $w = \left( \frac{v}{\operatorname{sen} \alpha} + m \right)$

- $a = h_{\text{total.parcial}}$

- $h_{\text{total.parcial}} = w \tan \alpha$

$$a = \tan \alpha \left( \frac{v}{\text{sen} \alpha} + m \right)$$

### Tercera Etapa

Cubierta la longitud total, el nivel de líquido aumenta pa-  
rejo 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 siguiente integral triple

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

El volumen calculado por esta fórmula ya tiene incorpora-  
do el volumen de las dos etapas anteriores

donde:

- $Z = a + by \quad a, b \in R$

es la ecuación de la recta que representa la proyec-  
ción del plano del líquido, donde las constantes a y b se  
buscan mediante los puntos  $P_1(0; a)$   $P_2(l_{\text{total}}; h_{\text{increm.etapa3}}^*)$ ,

- $a = h_{\text{increm.etapa3}}^* + h_{\text{total.parcial.etapa2}}$

$h_{\text{increm(etapa3)}}^*$ —se ha resaltado con el asterisco para simbo-  
lizar 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 ( $h_{\text{varilla}}$ ) y cuya representación se  
puede ver en la figura 3.

Figura 3. Esquema para la cuarta etapa de medición de  
un RHCP, inclinado, boca de medición desplazada y altura  
de la varilla hasta el fondo.

- $p = h_{\text{varilla}(v)} - h_{\text{varilla.etapa2.final}}$

- $h_{\text{varilla.etapa2.final}} = (l - 2s - l_m) \text{sen} \alpha$

- $\cos \alpha = \frac{p}{q}$

- $q = \frac{h_{\text{varilla}} - \text{sen} \alpha (l - 2s - l_m)}{\cos \alpha}$

- $h_{\text{etapa2.final}} = (l - 2s) \tan \alpha$

- $a = h_{\text{etapa2.final}} + q$

- $a = \frac{h_{\text{varilla}} - \text{sen} \alpha (l - 2s - l_m)}{\cos \alpha} + (l - 2s) \tan \alpha$

- $a = \frac{h_{\text{varilla}(v)} + (d / (l - 2s)) l_{m(m)}}{\cos(\text{arc sin}(d / (l - 2s)))}$

En esta etapa es suficiente conocer la altura de la varilla  
 $h_{\text{varilla}}$  que satisfaga la condición:

$$h_{\text{total.parcial.etapa2}} + h_{\text{increm.etapa3}} \leq h_{\text{total}}$$

que es análoga a:

$$a \leq h_{\text{total}}$$

### Cuarta Etapa (etapa final del aforo)

Cubierta la altura total, el líquido comienza a cubrir la lon-  
gitud 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 lon-  
gitud del tanque por el líquido, por la parte superior del  
mismo hasta la boca o lugar de medición (longitud tope),  
se determina por medio de la integral triple

$$V = 2 \int_0^{l_{\text{increm.etapa4}}} dy \int_{a+by}^a dz \int_0^{\sqrt{r^2-(z-r)^2}} dx + 2 \int_{l_{\text{increm.etapa4}}}^{l-2s} dy \int_{a+by}^{q+by} dz \int_0^{\sqrt{r^2-(z-r)^2}} dx$$

Una mejor comprensión de esta última etapa se puede  
lograr observando la figura 4.

Figura 4. Esquema para la cuarta etapa de medición de  
un RHCP, inclinado, boca de medición desplazada y altura  
de la varilla hasta el fondo.

- $Z = a + by \quad a, b \in R$

es la ecuación de la recta que representa la proyec-  
ción 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

- $Z = q + by \quad a, b \in R$

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

$$a = altura.total = \frac{p - 2\pi s}{\pi}$$

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

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

$$q = a + h_{increm.etapa4}$$

$$h_{increm.etapa4} = \frac{h_v}{\cos \alpha}$$

$$h_v = h_{varilla(v)} - h_{varilla.etapa3}$$

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

$$h_{varilla.etapa3} = h - (t-s)d / (l - 2s)$$

$$h_v = v - h + (t-s)d / (l - 2s)$$

$$h_{increm.etapa4} = \frac{v - h + (t-s)d / (l - 2s)}{\cos \alpha}$$

$$q = \frac{p - 2\pi s}{\pi} + \frac{v - h + (t-s)d / (l - 2s)}{\cos \alpha}$$

$$sen \alpha = \frac{h_{varilla.total(h)} - h_{varilla(v)}}{l_{tope(t)} - l_{increm.etapa4}}$$

$$l_{increm.etapa4} = t - \frac{l(h-v)}{d}$$

$$h_{varilla(v)}$$

Esta etapa se ejecutará hasta que se cumpla que

$$l_{increm.etapa4} \leq l_{tope} \text{ (esta última es una medición de campo)}$$

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

### Validación de las fórmulas

La validación de las fórmulas se ejecutó a través del uso de un tanque hipotético a pequeña escala, al cual se le puede imponer y medir muy fácil un grado de inclinación. La escala utilizada fue en centímetros y llevada a metros para una mejor interpretación de la realidad. El esquema del tanque, sus dimensiones y resultados de la validación confirman la posibilidad de realización del aforo y programación de un software más sencillo, para la determinación de las capacidades parciales

**Determinación de los datos de campo** (Grado de Inclinación, Perímetro Exterior, Longitud Exterior, Espesor de la chapa y Altura de la varilla).

- El perímetro exterior se determina con ayuda de la cinta métrica patrón realizando dos mediciones como mínimo distribuidas a 1/4 ó 1/5 de las costuras o solapes verticales y uniformemente en cada rolo.
- La longitud exterior del recipiente se determina con ayuda de la cinta métrica patrón, realizando cuatro mediciones como mínimo distribuidas uniformemente alrededor del perímetro y coincidiendo sus extremos con la parte exterior de las cabezas.

- El espesor de las planchas de los rolos y de las cabezas se determinará con ayuda del medidor ultrasónico de espesor, realizando dos mediciones en cada rolo y en cada cabeza, si el recipiente presenta una capa de pintura gorda y suciedad, se tratará de medir con el pie de rey en los lugares donde sea posible. Cuando esto no ocurra se limpiará la superficie y se medirá o el dato puede ser tomado de los planos, si se encuentran disponibles estos valores.
- El grado de inclinación se determina con un teodolito, el cual registra la diferencia de los planos horizontales en los cuales se encuentran apoyadas ambas caras del tanque respectivamente.
- La altura de la varilla se mide según lo establecido en la norma (Cuba. Oficina Nacional de Normalización, 2012).

## CONCLUSIONES

En el estudio se elabora sobre la base de los documentos internacionales y nacionales vigentes: El procedimiento de calibración de RHCP inclinados; y el procedimiento general para la estimación de la incertidumbre de las calibraciones.

## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- American Petroleum Institute. (2014). *Manual of Petroleum Measurement Standards, Chapter 2. Standard method for measurement and calibration of horizontal cylindrical tanks*. American Petroleum Institute.
- Colectivo de autores. (2004). *La trazabilidad metrológica en Cuba*. Oficina Nacional de Normalización.
- Cuba. Consejo de Estado. (1998). Decreto-Ley No.182. *Gaceta Oficial de la República de Cuba*. <http://www.dncontabilidad.sld.cu/rrhh/Doc/Normas/CALIDAD/D-D-L%20182%20Y%20183%20-1998%20.pdf>
- Cuba. Oficina Nacional de Normalización. (1996). NC-VIM-2. *Vocabulario internacional de términos básicos y generales en metrología*. Organización Internacional de Normalización.
- Cuba. Oficina Nacional de Normalización. (2012). NC 90-04-13:81. *Recipientes Horizontales de Cabezas Planas. Métodos y medios de verificación*. <https://ftp.isdi.co.cu/Biblioteca/BIBLIOTECA%20UNIVERSARIA%20DEL%20ISDI/COLECCION%20DIGITAL%20DE%20NORMAS%20CUBANAS/2011/NC%20846%20a2011%2033p%20poi.pdf>

International Organization for Standardization-International Electrotechnical Commission. (1995). *Guía ISO/IEC GUIDE 98-3:2008 [JCGM/WG1/100]. Uncertainty of measurement - Part3: Guide to the expression of uncertainty in measurement*. ISO/IEC. [https://www.bsigroup.com/contentassets/fb7f1499fa6f43c6b-9084be8c2378bc9/iso\\_iec\\_guide\\_98-3\\_2008e---uncertainty-of-measurement---part-3-guide-to-the-expression-of-uncertainty-in-measurement-gum1995.pdf](https://www.bsigroup.com/contentassets/fb7f1499fa6f43c6b-9084be8c2378bc9/iso_iec_guide_98-3_2008e---uncertainty-of-measurement---part-3-guide-to-the-expression-of-uncertainty-in-measurement-gum1995.pdf)

United States Department of Commerce Technology Administration. (1994). Guidelines for Evaluating and Expressing the Uncertainty of NIST Measurement Result. NIST Technical Note 1297. Gaithersburg, MD. <https://emtoolbox.nist.gov/publications/nisttechnicalnote1297s.pdf>