

**GUÍA TÉCNICA SOBRE  
TRAZABILIDAD E INCERTIDUMBRE  
EN LOS SERVICIOS DE  
CALIBRACIÓN DE TRANSDUCTORES  
DE FUERZA**

**México, abril de 2015**

**Derechos reservados ©**

## PRESENTACIÓN

Durante la evaluación de la competencia técnica de los laboratorios de calibración y de ensayo, la demostración de la trazabilidad y la estimación de la incertidumbre de las mediciones, requiere la aplicación de criterios técnicos uniformes y consistentes.

Con el propósito de asegurar la uniformidad y consistencia de los criterios técnicos en la evaluación de la trazabilidad y la incertidumbre de las mediciones, la entidad mexicana de acreditación, a.c. (ema), solicitó al Centro Nacional de Metrología que encabezara un programa de elaboración de Guías Técnicas de Trazabilidad e Incertidumbre de las Mediciones.

Los Comités de Evaluación, a través de los Subcomités de los Laboratorios de Calibración y de Ensayo, se incorporan a este programa y su participación está orientada a transmitir sus conocimientos y experiencias técnicas en la puesta en práctica de las Políticas de Trazabilidad y de Incertidumbre establecidas por ema, mediante el consenso de sus grupos técnicos de apoyo. La incorporación de estos conocimientos y experiencias a las Guías, las constituyen en referencias técnicas para usarse en la evaluación de la competencia técnica de los laboratorios de calibración y ensayo.

En este programa, el CENAM se ocupa, entre otras actividades, de coordinar el programa de las Guías Técnicas, proponer criterios técnicos sobre la materia, validar los documentos producidos, procurar que todas las opiniones pertinentes sean apropiadamente consideradas en los documentos, apoyar la elaboración de las Guías con eventos de capacitación, asegurar la consistencia de las Guías con los documentos de referencia indicados al final de este documento.

La elaboración de las Guías está vinculada con la responsabilidad que comparten mutuamente los laboratorios acreditados de calibración y de ensayo, de ofrecer servicios con validez técnica en el marco de la evaluación de la conformidad. La calidad de estos servicios se apoya en la confiabilidad y uniformidad de las mediciones, cuyo fundamento está establecido en la trazabilidad y en la incertidumbre de las mismas. Los que ejercitan la evaluación de la competencia técnica de los laboratorios, así como los que realizan la práctica rutinaria de los servicios acreditados de calibración y ensayo, encontrarán en las Guías una referencia técnica de apoyo para el aseguramiento de las mediciones.

Las Guías Técnicas de Trazabilidad e Incertidumbre de las Mediciones no reemplazan a los documentos de referencia en que se fundamentan las políticas de trazabilidad e incertidumbre de ema. Las Guías aportan criterios técnicos que servirán de apoyo a la aplicación de la norma NMX-EC-17025-IMNC-2006. La consistencia de las Guías con esta norma y con los demás documentos de referencia, permitirá conseguir el propósito de asegurar la confiabilidad de la evaluación de la conformidad por parte de los laboratorios de calibración y ensayo.

Abril de 2015.

**Dr. Héctor O. Nava Jaimes**

**María Isabel López Martínez**

Director General  
Centro Nacional de Metrología

Directora Ejecutiva  
entidad mexicana de acreditación, a. c.

## Grupo de Trabajo que participó en la elaboración de esta Guía:

Jorge C. Torres Guzmán,	CENAM
Alejandro Cárdenas Moctezuma,	CENAM
Alberto Guízar López Hermosa,	Experto técnico - ema
Mario Camacho Martínez,	Experto técnico - ema
Guillermo Flores Flores,	Experto técnico - ema
Oscar Gutierrez,	CIO
Luis García,	CIO
Vicente Gómez Bezares,	IMCyC
Jorge Alberto Jasso Cortés,	CAPYMET
Ervey López,	METROLAB
Aida López Blanco,	ema

## ÍNDICE

	<b>Página</b>
<b>PRESENTACIÓN</b>	<b>2</b>
<b>GRUPO DE TRABAJO</b>	<b>4</b>
<b>ÍNDICE</b>	<b>5</b>
<b>I. PROPÓSITO DE LA GUÍA TÉCNICA</b>	<b>6</b>
<b>II. ALCANCE DE LA GUÍA TÉCNICA</b>	<b>6</b>
<b>III. MENSURANDO</b>	<b>6</b>
<b>IV. MÉTODO Y SISTEMA DE MEDICIÓN</b>	<b>7</b>
<b>V. SISTEMAS DE MASAS SUSPENDIDAS Y SISTEMAS DE TRANSFERENCIA DE FUERZA</b>	<b>12</b>
<b>VI. TRAZABILIDAD DE LAS MEDICIONES</b>	<b>25</b>
<b>VII. INCERTIDUMBRE DE MEDICIÓN</b>	<b>27</b>
<b>VIII. VALIDACIÓN DE MÉTODOS DE MEDICIÓN</b>	<b>33</b>
<b>IX. BUENAS PRÁCTICAS DE MEDICIÓN</b>	<b>33</b>
<b>X. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>35</b>

## **I. PROPÓSITO DE LA GUÍA TÉCNICA**

Establecer criterios con el objetivo de tener mecanismos que coadyuven en lograr mediciones con trazabilidad e incertidumbre confiables en la calibración de Transductores de Fuerza.

Esta guía es una recomendación del Subcomité de Fuerza y Par Torsional de la ema y CENAM (sin ser un documento normativo) y cualquier modificación deberá analizarse por el cuerpo colegiado (constituido por los autores de esta Guía) correspondiente. También esta guía establece criterios técnicos mínimos para verificar el cumplimiento de los requisitos de la norma NMX-17025-IMNC:2006 del servicio de calibración aquí indicado.

Por lo general, en el proceso de acreditación de un laboratorio de calibración de transductores de fuerza, no se evalúa la conformidad debido a que no existe norma obligatoria aplicable, sin embargo para efectos de esta guía, se utiliza como referencia de calibración la norma NMX-CH-376-IMNC:2008.

Esta guía técnica de trazabilidad e incertidumbre pretende facilitar la aplicación de las normas NMX-EC-17025-IMNC:2006, NMX-CH-140-IMNC:2002, NMX-CH-376-IMNC:2008 sin sustituirlas ni modificarlas.

## **II. ALCANCE DE LA GUÍA TÉCNICA**

Esta guía establece criterios e incluye observaciones para la calibración de transductores de fuerza por el método de comparación directa, tanto en sistemas de masas suspendidas, como en sistemas de transferencia de fuerza.

## **III. MENSURANDO**

Fuerza, medida en el transductor en calibración, a través de la lectura en el dispositivo indicador, en algunos casos, ingresados en tablas o ecuaciones que permitan obtener unidades de fuerza del SI.

### **III.1 Intervalo de calibración**

El límite superior de medición quedará acotado por la solicitud de calibración de los equipos, sin embargo el límite inferior típicamente se establece al 10 % del intervalo de medición del transductor.

Nota 1: El uso fuera de los límites de calibración es una actividad del usuario e incluye la justificación de la incertidumbre asociada de los equipos involucrados en la calibración.

### III.2 Incertidumbre de medición esperada

La incertidumbre resultante de la calibración no podrá ser menor que la incertidumbre de la capacidad de medición y calibración del laboratorio (CMC). Para realizar el servicio es conveniente mantener una relación de incertidumbres tal que el valor de la CMC del laboratorio sea menor que el valor requerido del transductor.

Nota 2: El enfoque adecuado para asegurar la calidad de las mediciones incluye un acuerdo entre el usuario del transductor y el laboratorio respecto a la relación de incertidumbre (CMC) ofrecida por el laboratorio de calibración y las tolerancias de error ya sea del proceso de medición, del ensayo o de la verificación por parte del usuario del transductor.

## IV. MÉTODO Y SISTEMA DE MEDICIÓN

A continuación se especifican los conocimientos, habilidades y aptitudes necesarios mínimos que deben ser considerados para realizar la calibración de transductores de fuerza.

En esta sección se incluirán las definiciones de “TRANSDUCTOR DE FUERZA” para diferenciarlo de “INSTRUMENTO MEDIDOR DE FUERZA” y de “MÁQUINA DE ENSAYOS

### IV.1 Método de medición

*Método de comparación directa:* Comparación de las lecturas observadas del dispositivo indicador del transductor contra las lecturas del patrón utilizado, aplicando la fuerza directamente al ensamble transductor - patrón, garantizando una aplicación coaxial de la fuerza.

### IV.2 Documentos de consulta

- ◆ NMX-CH-376-IMNC:2008 Instrumentos de medición – Calibración de instrumentos de medición de fuerza empleados para la verificación de máquinas de ensayo uniaxiales
- ◆ ISO 376:2004 Metallic materials – Calibration of force - proving instruments used for the verification of uniaxial testing machines.
- ◆ NMX-CH-7500-1-IMNC:2008. Verificación de máquinas uniaxiales para ensayo - máquinas para ensayo a tracción o compresión - Verificación y calibración del sistema de medición de fuerza.
- ◆ ISO 7500-1:2004 Metallic materials — Verification of static uniaxial testing machines - Tension/compression testing machines - Verification and calibration of the force-measuring system.
- ◆ NOM-008-SCFI-2002, Sistema General de Unidades de Medida
- ◆ NMX-Z-055-IMNC:2009, Metrología - Vocabulario de términos fundamentales y generales.

- ◆ NMX-CH-140-IMNC2002 Guía para la expresión de la incertidumbre de las mediciones; equivalente al documento Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement, BIPM, IEC, IFCC, ISO, IUPAC, IUPAP, OIML, 1995.
- ◆ ISO 10012-2003 Sistemas de gestión de las mediciones — Requisitos para los procesos de medición y los equipos de medición.

### **IV.3 Procedimiento general de medición**

Es deseable que el procedimiento de calibración se realice de acuerdo con los requisitos descritos en la norma mexicana NMX-CH-376-IMNC:2008. Algunos aspectos importantes a revisar en la norma son los requisitos del punto 7.4 de la norma en cuestión, además de:

- Verificar que el intervalo de medición y especificaciones de exactitud o incertidumbre del transductor esté dentro del alcance de acreditación del laboratorio. Ver nota 2 página 6.

### **IV.4 Actividades Preliminares.**

Es importante antes de iniciar la calibración de cualquier instrumento de medición de fuerza, registrar la condición física del instrumento. Para tal efecto es necesario iniciar el funcionamiento de todo el sistema del instrumento medidor de fuerza y verificar el correcto funcionamiento del mismo de acuerdo a las pruebas preliminares que se indican en los párrafos subsecuentes. En muchos laboratorios, es práctica que la temperatura del laboratorio sea de  $22^{\circ}\text{C} \pm 1.5^{\circ}\text{C}$ .

En caso de sospechar de alguna anomalía en el estado físico o en el funcionamiento del sistema de medición, es conveniente notificar inmediatamente tal situación al cliente para acordar lo necesario.

Nota: No calibrar bajo sospecha de mal funcionamiento del equipo y avisar al cliente para acordar lo procedente mediante registro mediante cualquier forma escrita.

### **IV.5 Ambientación.**

Dejar ambientar el equipo en el lugar de la calibración por un tiempo mínimo de 1 hora antes de comenzar la calibración del mismo. En el caso de un instrumento con indicador digital es necesario conectar a la fuente de alimentación al menos 1 h antes de realizar la calibración.

En los casos en que los instrumentos trabajen a base de baterías, se debe cuidar que la respuesta del equipo no sufra variaciones en base a la “carga” de las baterías, durante el proceso de energización. Si el equipo tiene la función de “ahorro de energía” debe quedar registrado en el informe de calibración.

Verificar el manual del instrumento de calibración por si son requeridas condiciones adicionales de ambientación.



#### **IV.6 Resolución del Indicador.**

Antes de iniciar la calibración es necesario determinar la resolución del indicador analógico o digital del instrumento y registrar su valor.

#### **IV.7 Montaje del instrumento a calibrar.**

Realizar el montaje del transductor de fuerza en la MMS. Utilizar los accesorios de compresión o de tracción del cliente para su calibración registrando la identificación de los mismos.

#### **IV.8 Accesorios de calibración.**

Es conveniente verificar que los accesorios de calibración del transductor de fuerza son los adecuados para el uso intencionado. Es muy conveniente que los accesorios para calibración sean fabricados como se indica en la norma NMX-CH-376-IMNC-2008.

#### **IV.9 Aplicación de Precargas.**

Antes de iniciar la calibración, es necesario pre cargar el transductor de fuerza tres veces sucesivas en el 100% del intervalo de calibración y al menos una vez en cada cambio de posición tal como se observa en la secuencia de la calibración del diagrama esquemático de la Figura 1.

#### **IV.10 Calibración.**

El proceso de calibración debe seguir la secuencia que se muestra en la figura 1. A menos que el cliente especifique otros puntos de calibración, de ser así, estos deberán acordarse con el cliente.

En el caso que no sea posible aplicar la secuencia de cargas mostradas en la figura, estas deberán ser distribuidas lo más uniformemente posible en el intervalo de calibración del instrumento a calibrar.

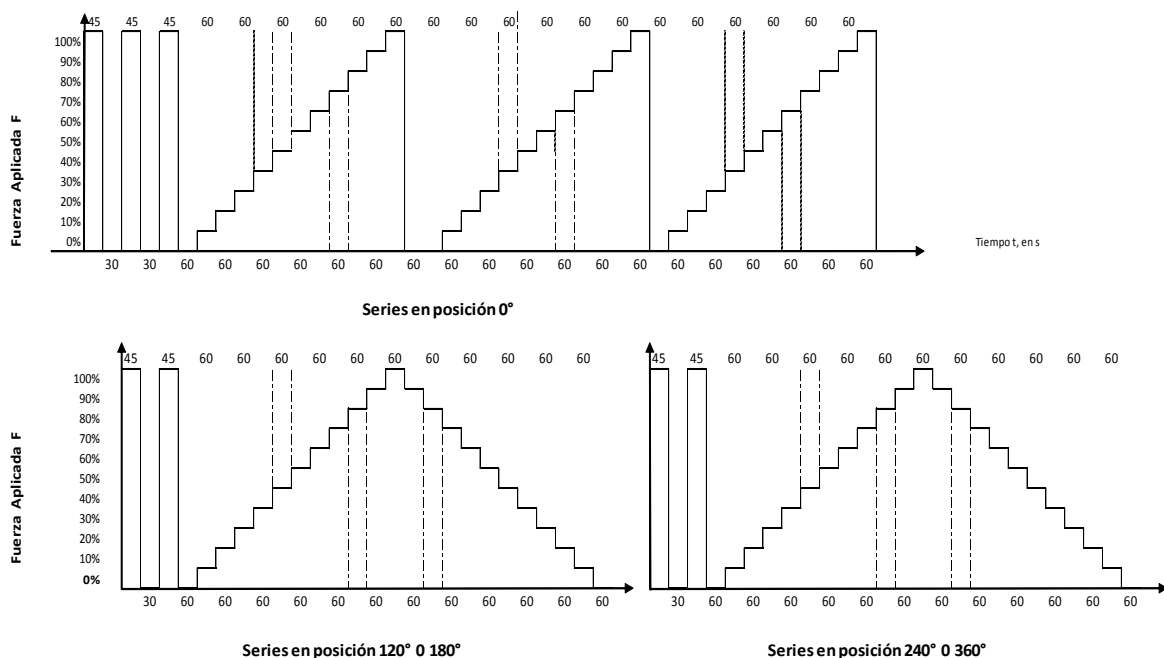


Figura 1. Diagrama esquemático del procedimiento de calibración de transductores de Fuerza. Posición del instrumento en el diagrama de acuerdo al giro en 0°, 120° y 240°, o bien cuando lo anterior no es posible, se podrán usar giros de 180° y 360° en lugar de 120° y 240°, según lo indica el título del eje x de la gráfica.

### Observaciones a los diagramas de calibración:

1. El tiempo de respuesta en el diagrama es el mínimo que debe observarse para obtener la lectura del indicador del instrumento después de la carga o descarga en cada punto de medición. Incluye la lectura de cero.
2. **F** indica el valor de fuerza del intervalo máximo de medición del transductor de fuerza. Los valores de la escala están en porcentaje del intervalo de calibración. Otros puntos de calibración pueden ser medidos durante el proceso (ver IV.10).
3. Adicional al proceso de toma de lecturas, se registran las condiciones ambientales en las que se lleva a cabo la calibración, asegurando que los instrumentos auxiliares se encuentren lo más cerca posible de la Máquina de masas suspendidas (MMS) en la cual realiza la calibración.
4. La toma de lecturas debe de ser realizada por la misma persona que inicia la calibración con la resolución estimada en las unidades del indicador y manteniendo los intervalos de tiempo para la toma de lecturas, constantes.

### IV.11 Desviaciones permitidas a la calibración.

En el caso de que algún cliente requiera una calibración con una metodología diferente al procedimiento aquí descrito, esta tendrá que ser evaluada por el responsable del laboratorio para verificar la factibilidad

y conveniencia de realización de la misma. En caso de ser aprobada otra metodología o procedimiento especial de calibración, se deberá contar con información documental de aceptación por parte del cliente.

#### **IV.12 Registros**

Es necesario registrar mediante el método que designe el laboratorio la toma de lecturas y las anotaciones correspondientes a los puntos descritos.

#### **IV.13 Resultados**

Los resultados de la calibración del transductor de fuerza son consignados en un informe de calibración e incluyen:

- ✓ La identificación del patrón utilizado así como del transductor bajo calibración;
- ✓ La identificación de las condiciones bajo las cuales se realiza la calibración;
- ✓ La fuerza aplicada de acuerdo al alcance del transductor bajo calibración;
- ✓ El mejor valor de la medición representado por el valor promedio del instrumento bajo calibración (resultado de la medición);
- ✓ El error de indicación del transductor bajo calibración, cuando el transductor sea utilizado en las unidades del múltiplo o submúltiplo de la unidad de Fuerza en newton;
- ✓ El error residual de la ecuación de mejor ajuste;
- ✓ La ecuación de mejor ajuste para el transductor a calibrar;
- ✓ Todas las lecturas obtenidas en el transductor bajo calibración del proceso de calibración;
- ✓ La repetibilidad, la reproducibilidad, la resolución, la histéresis (la reversibilidad) y el error de indicación del cero del transductor bajo calibración;
- ✓ Las incertidumbres estándar asociadas al punto anterior;
- ✓ La incertidumbre estándar del patrón o de la capacidad de medición del laboratorio utilizado para la calibración;
- ✓ La incertidumbre expandida y el factor de cobertura del transductor bajo calibración;
- ✓ Una gráfica que muestra el error de residual de la ecuación de mejor ajuste con su incertidumbre expandida y la fuerza aplicada.

#### **IV.14 Competencia técnica del personal (evaluaciones de la ema)**

Es conveniente verificar que el personal que realiza las calibraciones (personal operativo, técnico de calibración o como se llame) cumple en los términos en los que el laboratorio define y en los criterios de aplicación de la norma NMX-EC-17025-IMNC:2006, con las siguientes habilidades, aptitudes y conocimientos mínimos:

- ✓ Que es competente en términos de su experiencia en calibración de transductores (se considera adecuado por ejemplo una experiencia mínima de 1 año en calibración de transductores), que tiene adecuada interpretación de la norma NMX-CH-376-

IMNC:2008 en el manejo y operación de patrones mediante la testificación de esta actividad por el evaluador.

Ejemplos de actividades para demostrar la competencia del personal:

1. Verificar la habilidad de centrado del transductor en el sistema de fuerza, ya sea en sistemas que trabajen por masas suspendidas o transferencia.
2. Verificar que la toma de lecturas se realiza de acuerdo a los procedimientos del laboratorio.
3. Que conoce los procedimientos operativos dentro de su competencia.

Es conveniente verificar que el signatario (responsable técnico o como se llame) cumple en los términos en los que el laboratorio define y en los criterios de aplicación de la norma NMX-EC-17025-IMNC:2006, con las siguientes habilidades, aptitudes y conocimientos mínimos:

- ✓ Que cumple con los requisitos del punto anterior y adicionalmente es competente en términos que el laboratorio define, en evaluación de incertidumbres y determinación de la CMC del laboratorio, clasificación de transductores, conocimiento de las normas aplicables, tener conocimientos de regulaciones y normatividad en metrología, además de tener la capacidad de supervisar los trabajos realizados en el laboratorio y desarrollar y revisar los procedimientos y análisis de las calibraciones.

Nota 3: Es recomendable que el signatario tuviese grado escolar mínimo de educación media superior.

## V. SISTEMAS DE MASAS SUSPENDIDAS Y SISTEMAS DE TRANSFERENCIA DE FUERZA

### V.1 SISTEMAS DE MASAS SUSPENDIDAS

#### V.1.1. Modelo matemático para la magnitud de Fuerza

La metodología para la aplicación de la magnitud Fuerza mediante Masas Suspendidas esta basada en la expresión que define a la magnitud de acuerdo a la segunda ley de Newton como:

$$F = mg_l \cdot \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_m}\right) \quad \text{A.1)}$$

Donde:

$m$  es la masa aplicada, en kg y su valor es obtenido con trazabilidad al patrón nacional de masa prototipo número 21.

$g_l$  es la acción de la aceleración de la gravedad en  $m/s^2$ .

$\rho_a$  es la densidad del aire, en  $kg/m^3$ .

$\rho_m$  densidad de la masa, en  $kg/m^3$ .

El valor de la densidad del aire puede se obtener de la expresión A.2) siguiente:

$$\rho_a = \frac{a \cdot P_{am} - b \cdot P_{vs} \cdot h_r}{c \cdot (1 + d \cdot T_{amb})} \quad A.2)$$

Aquí:

$P_{am}$  es la presión atmosférica promedio, en Pa.

$P_{vs}$  es la presión del vapor saturado, y su valor puede ser obtenido de la expresión A.3, en Pa.

$h_r$  es la humedad relativa, en %.

$t_{amb}$  es la temperatura ambiente durante la medición, en °C.

$a$ ,  $b$  y  $c$ , son valores constantes y su valor respectivo es:  $a = 1.293\ 04 \cdot 10^{-3}$ ;  $b = 4.885 \cdot 10^{-6}$ ;  $c = 101.325$  y  $d = 3.67 \cdot 10^{-3}$

La presión del vapor saturado se obtiene de la siguiente expresión.

$$P_{vs} = 1Pa \cdot e^{[A \cdot T^2_{amb} + B \cdot T_{amb} + C + D / (T_{amb} + 273.15)]} \quad A.3)$$

Donde:

$e = 2.718\ 281\ 83\dots$  es la base de los logaritmos naturales

$A = 1.237\ 884\ 7 \cdot 10^{-5} \text{ °C}^{-2}$ ;

$B = -0.012\ 358\ 751\ 883\ 9 \text{ °C}^{-1}$ ;

$C = 29.637\ 720\ 198\ 76$

$D = -6\ 343.164\ 5 \text{ °C}$

### V.1.2 Incertidumbre de la magnitud fuerza.

Para obtener la incertidumbre de la expresión que define la fuerza se aplica la ley de propagación de incertidumbres A.4) al modelo matemático A.1) de tal forma que se tiene la expresión A.5).

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^N \left[ \frac{\partial f}{\partial x_i} \right]^2 u^2(x_i) \quad A.4)$$

Es decir

$$u_F = \sqrt{\left(\frac{\partial F}{\partial m}\right)^2 \cdot u_m^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial g}\right)^2 \cdot u_g^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial \rho_a}\right)^2 \cdot u_{\rho_a}^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial \rho_m}\right)^2 \cdot u_{\rho_m}^2}$$

A.5)

La incertidumbre de cada magnitud de influencia de la expresión anterior es estimada mediante varianzas de distribuciones de probabilidad tipificado como incertidumbres tipo “B” o bien de otro análisis de incertidumbre como por ejemplo en el caso de la incertidumbre de la densidad del aire obtenida a partir de su modelo matemático.

### V.1.3 Incertidumbre de la densidad del aire.

Aplicando las propiedades de la ley de propagación de incertidumbres A.4) al modelo matemático de la densidad del aire A.2) se tiene la expresión A.6).

$$u_{\rho_{aire}} = \sqrt{\left(\frac{\partial \rho_{aire}}{\partial P_{atm}}\right)^2 \cdot u_{Patm}^2 + \left(\frac{\partial \rho_{aire}}{\partial h_r}\right)^2 \cdot u_{hr}^2 + \left(\frac{\partial \rho_{aire}}{\partial T_{amb}}\right)^2 \cdot u_T^2 + \left(\frac{\partial \rho_{aire}}{\partial P_{vs}}\right)^2 \cdot u_{pvs}^2}$$

A.6)

#### 1. Incertidumbre de la Presión del vapor saturado.

Aplicando las propiedades de la ley de propagación de incertidumbres 4) al modelo matemático de la presión del vapor saturado A.3) se tiene la expresión A.7).

$$u_{P_{vs}} = \sqrt{\left(\frac{\partial P_{vs}}{\partial T_{amb}}\right)^2 \cdot u_{T_{amb}}^2}$$

A.7)

Nota: En el caso que la evaluación de la incertidumbre de la aplicación de una fuerza implique la combinación de masas, el valor de incertidumbre debido a tal combinación de masas se obtiene como la suma de las incertidumbres individuales de cada masa.

Los coeficientes de sensibilidad de cada magnitud de influencia de las expresiones A.5, A.6 y A.7 se observan en las tablas A.1, A.2 y A.3 siguientes.

Coeficientes de sensibilidad para Fuerza	
En unidades del SI	En unidades relativas
$\frac{\partial F}{\partial m} = g_l \cdot \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_m}\right)$	$\frac{\partial F}{\partial m} \cdot \frac{1}{F} = \frac{1}{m}$
$\frac{\partial F}{\partial g_l} = m \cdot \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_m}\right)$	$\frac{\partial F}{\partial g_l} \cdot \frac{1}{F} = \frac{1}{g_l}$

$\frac{\partial F}{\partial \rho_a} = \frac{-mg}{\rho_m}$	$\frac{\partial F}{\partial \rho_a} \cdot \frac{1}{F} = \frac{-1}{(\rho_m - \rho_a)} \approx \frac{-1}{\rho_m}$
$\frac{\partial F}{\partial \rho_m} = \frac{mg\rho_a}{\rho_m^2}$	$\frac{\partial F}{\partial \rho_m} \cdot \frac{1}{F} = \frac{\rho_a}{\rho_m(\rho_m - \rho_a)} \approx \frac{1}{\rho_m^2}$

Tabla A.1 Coeficientes de sensibilidad para cada una de las magnitudes de influencia en la determinación de la incertidumbre asociado al modelo matemático para fuerza  $F$ .

Coeficientes de sensibilidad para la densidad del aire	
En unidades del SI	En unidades relativas
$\frac{\partial \rho_a}{\partial P_{atm}} = \frac{a}{c \cdot (1 + d \cdot T_{amb})}$	$\frac{\partial \rho_a}{\partial P_{atm}} \cdot \frac{1}{\rho_a} = \frac{a}{a \cdot P_{atm} - b \cdot P_{vs} \cdot h_r}$
$\frac{\partial \rho_a}{\partial h_r} = -\frac{b \cdot P_{vs}}{c \cdot (1 + d \cdot T_{amb})}$	$\frac{\partial \rho_a}{\partial h_r} \cdot \frac{1}{\rho_a} = -\frac{b \cdot P_{vs}}{a \cdot P_{atm} - b \cdot P_{vs} \cdot h_r}$
$\frac{\partial \rho_a}{\partial P_{vs}} = -\frac{b \cdot h_r}{c \cdot (1 + d \cdot T_{amb})}$	$\frac{\partial \rho_a}{\partial P_{vs}} \cdot \frac{1}{\rho_a} = -\frac{b \cdot h_r}{a \cdot P_{atm} - b \cdot P_{vs} \cdot h_r}$
$\frac{\partial \rho_a}{\partial T_{amb}} = -\frac{c \cdot b \cdot (a \cdot P_{atm} - b \cdot P_{vs} \cdot h_r)}{[c \cdot (1 + d \cdot T_{amb})]^2}$	$\frac{\partial \rho_a}{\partial T_{amb}} \cdot \frac{1}{\rho_a} = -\frac{d}{(1 + d \cdot T_{amb})}$

Tabla A.2. Coeficientes de sensibilidad para cada una de las magnitudes de influencia en la determinación de la incertidumbre asociado al modelo matemático para la densidad del aire  $\rho_a$ .

Coeficientes de sensibilidad para la Presión del Vapor Saturado	
En unidades del SI	En unidades relativas
A1.8.	$\frac{\partial P_{vs}}{\partial T_{amb}} \cdot \frac{1}{P_{vs}} = 2AT_{amb} + B - \frac{D}{(T_{amb} + 273.15)^2}$

Tabla A.3 Coeficientes de sensibilidad para cada una de las magnitudes de influencia en la determinación de la incertidumbre asociado al modelo matemático para la presión del vapor saturado  $P_{vs}$ .

$$\frac{\partial P_{vs}}{\partial T_{amb}} = e^{[A \cdot T_{amb}^2 + B \cdot T_{amb} + C + D / (T_{amb} + 273.15)]} \cdot 2AT_{amb} + B - \frac{D}{(T_{amb} + 273.15)^2} \quad \text{A.8)}$$

Tablas ejemplo para determinación de la magnitud e incertidumbre en Fuerza.

$X_i$ / (SI)	Valor $X_i$ (SI)	Incertidumbre, $U_E$	Incertidumbre estándar $u(X_i)$ / (SI)	Tipo: A B (a, b, c, d)	Expresión del Coeficiente de sensibilidad $(\partial F / \partial X_i)$	Valor del Coeficiente de sensibilidad $(\partial F / \partial X_i)$	Valor de cada componente de incertidumbre $(\partial F / \partial X_i)^2 \cdot u(X_i)^2$
$m$ / (kg)	501.392	1.600E-03	8.000E-04	B-c	$g [1 - (\rho_a / \rho_m)]$	9.779 662	6.12E-05
$g$ / (m/s <sup>2</sup> )	9.780 845	1.000 E-05	5.000E-06	B-c	$m [1 - (\rho_a / \rho_m)]$	501.331 796	6.28E-06
$\rho_a$ / (kg/m <sup>3</sup> )	0.957 617	7.626 E-04	3.813 E-04	B-a	$-mg / \rho_m$	-0.619 197	5.57E-08
$\rho_m$ / (kg/m <sup>3</sup> )	7 920	115.470	57.74	B-c	$-mg \rho_a / \rho_m^2$	-0.000 075	1.87E-05
$F$ / (N)	4 903.449	0.018 6	3.788	Normal	$F = mg [1 - (\rho_a / \rho_m)]$	$u_c(F)$ / N	0.009 286
						$U_E$ / N, $k = 2$	0.018 572

Tabla A.4 Determinación de la incertidumbre de fuerza debido al modelo matemático para la realización de la magnitud Fuerza en unidades absolutas (newton).

$X_i$ / (SI)	Valor $X_i$ (SI)	Incertidumbre, $U_E$	Incertidumbre estándar $u(X_i)$ / (SI)	Tipo: A B (a, b, c, d)	Expresión del Coeficiente de sensibilidad $(\partial F / \partial X_i) \cdot 1/F$	Valor del Coeficiente de sensibilidad $(\partial F / \partial X_i) \cdot 1/F$	$(\partial F / \partial X_i)^2 \cdot u(X_i)^2$
$m$ / (kg)	501.392	1.600E-03	8.000E-04	B-c	$1/m$	0.001 994	2.55E-12
$g$ / (m/s <sup>2</sup> )	9.780 845	1.000E-05	5.000E-06	B-c	$1/g$	0.102 241	2.61E-13
$\rho_a$ / (kg/m <sup>3</sup> )	0.957 617	7.626E-04	3.813 E-04	B-a	$-1/\rho_m$	-0.000 126	2.32E-15
$\rho_m$ / (kg/m <sup>3</sup> )	7 920	115.47	57.735	B-c	$-\rho_m / [\rho_m (\rho_m \rho_a)]$	0.000 000	7.77E-13
$F$ / (N)	4 903.449			Normal	$F = mg [1 - (\rho_a / \rho_m)]$	$u_c(F)$ / U.Rel	1.894E-06
						$U_E$ / %, $k = 2$	3.788E-06

Tabla A.5 Determinación de la incertidumbre de fuerza debido al modelo matemático para la realización de la magnitud Fuerza, en unidades relativas.

$X_i$ / (SI)	Valor $X_i$ (SI)	Incertidumbre, $U_E$	Incertidumbre estándar $u(X_i)$ / (SI)	Tipo: A B (a, b, c, d)	Expresión del Coeficiente de sensibilidad $(\partial \rho_{aire} / \partial X_i)$	Valor del Coeficiente de sensibilidad $(\partial \rho_{aire} / \partial X_i) \cdot 1/\rho_{aire}$	$(\partial \rho_{aire} / \partial X_i)^2 \cdot u(X_i)^2$
$P_{Atm.}$ / (Pa)	81 200.0	62.12	31.060	B-c		1.237E-05	1.477 E-07
$H.R.$ / (%)	40.0	0.5	0.288 675	B-c		-1.163E-04	1.127 E-09
$P_{vs.}$ / (Pa)	2 488.06	8.8303	4.415 171	B-a		-1.870E-06	6.815 E-11
$t_{amb.}$ / (°C)	21.00	0.058	0.028 868	B-c		-3.407E-03	9.675 E-09
$\rho_a$	0.957 617					$u_c(\rho_a)$ / (U.relat.)	3.98E-04
$a$	0.001 293 04					$U_E(\rho_a)$ / (u. Relat)	7.96E-04
$b$	4.885E-06					$U_E(\rho_a)$ / (kg/m <sup>3</sup> )	7.63E-04
$c$	101.325						
$d$	0.003 67						

Tabla A.6 Determinación de la incertidumbre de la densidad del aire del modelo matemático para la medición de la magnitud en unidades relativas y su respectivo valor en kg/m<sup>3</sup>.

$X_i$ / (SI)	Valor $X_i$ / (SI)	Incertidumbre, $U_E$	Incertidumbre estándar $u(X_i)$ / (SI)	Tipo: A B (a, b, c, d)	Expresión del Coeficiente de sensibilidad $(\partial P_{vs} / \partial X_i)$	Valor del Coeficiente de sensibilidad $(\partial P_{vs} / \partial X_i) \cdot 1/P_{vs}$	$(\partial P_{vs} / \partial X_i)^2 \cdot u(X_i)^2$
$t_{amb.}$ / (°C)	21	0.0577	0.028 87	B-c	Ver A1.8	0.061 472	1.775E-03
$P_{VS}$	2 488.059					$u_c(P_{vs})$ / (U.relat.)	1.775E-03
						$U_E(P_{vs})$ / (u. Relat)	3.549E-03
						$U_E(P_{vs})$ / (Pa)	8.830

Tabla A.7 Determinación de la incertidumbre de la presión del vapor saturado debido al modelo matemático para la medición en unidades relativas y su respectivo valor en Pa.



### V.1.3 Evaluación de Resultados para la Calibración de Transductores de Fuerza

#### a) Desarrollo

Una vez realizada la toma de lecturas de acuerdo al procedimiento de calibración para los transductores de fuerza, el siguiente paso es la evaluación de los resultados del mismo. Para tal efecto y sobre la base de aplicación de normas nacionales e internacionales, se tienen las siguientes propiedades metroológicas del equipo bajo calibración:

- Resultado de la medición (mejor valor de medición del instrumento bajo calibración);
- Resolución del instrumento indicador;
- Repetibilidad en la misma posición de montaje;
- Reproducibilidad en diferente posición de montaje;
- Reversibilidad (histéresis);
- Error de cero;
- Error de indicación (exactitud);
- Error de interpolación.

#### b) Resultado de la calibración $\bar{y}$

El mejor valor de medición del instrumento bajo calibración se obtiene para cada valor de fuerza aplicado, como el valor promedio de las lecturas obtenidas de las series con incremento de carga y con cambio en la posición de aplicación de la fuerza. Ver esquema de calibración que se observa en la figura 1.

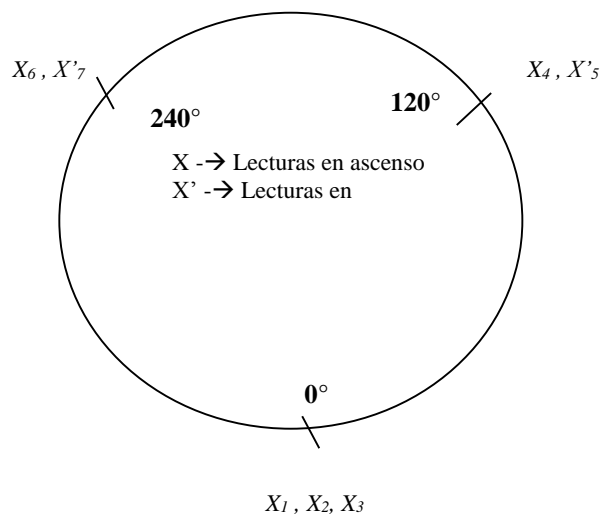


Figura 1. Proceso de calibración para el instrumento de medición de fuerza de conformidad con norma NMX-CH-376-IMNC-2008.

### c) Resolución

Se obtiene de los datos de calibración para una indicación analógica o digital de la siguiente manera:

- i. Escala analógica.- Es considerado como la fracción más pequeña de la escala de medición que puede ser estimada y puede ser calculada como:

$$R = \frac{d}{(a/d)+1}$$

Donde:

*d* es la división mínima que puede ser estimada, en las unidades del indicador  
*a*, es el ancho de la aguja o del puntero e indica la cantidad de veces que la aguja cabe en la división mínima.

- ii. Escala digital.- Es considerado el dígito menos significativo, es decir un incremento del último número activo en la lectura del dispositivo indicador cuando está descargado.

Nota B.1: Cuando la lectura con el instrumento bajo calibración estando descargado fluctúa por más del valor previamente determinado para la resolución, está podrá ser considerada igual a la mitad del intervalo de fluctuación.

La resolución relativa en unidades relativas porcentuales (para la escala analógica o digital) es determinada mediante la siguiente expresión para cada mejor valor de medición de respuesta del instrumento bajo calibración.

$$r = \frac{R}{\bar{X}} \cdot 100\%$$

Donde  $\bar{X}$  es el promedio de las lecturas obtenidas.

### d) Respuesta del instrumento bajo calibración.

La respuesta del instrumento bajo calibración (salida) correspondientes a la fuerza aplicada correspondiente (entrada) se define como la diferencia entre la lectura del dispositivo indicador cuando se le aplica un cierto valor menos la lectura del mismo bajo un valor de cero, en una serie de medición para cada punto aplicado.

### e) Repetibilidad en la misma posición de montaje.

Evaluar la repetibilidad implica necesariamente repetir *n* veces la medición sin efectuar cambios intencionalmente. La evaluación de la incertidumbre de repetibilidad se realizará de acuerdo al procedimiento de calibración en la posición de  $\theta^\circ$  donde son obtenidas al menos 3

series de medición en cada punto discreto de carga y se obtiene como una medida de la dispersión del mejor valor de medición (en la misma posición de montaje) y se calcula como:

$$r_{\bar{x}} = \frac{s_x}{\sqrt{n}}$$

Donde:

$r_x$ , es la repetibilidad en la misma posición de montaje, en las unidades del transductor de bajo calibración;

$\bar{x}$  es el promedio (mejor valor de medición) del conjunto de las respuestas  $x_i$ , del instrumento bajo calibración, con  $i = 1, 2, 3$

$s_x$ , es la desviación estándar del conjunto de las  $x_i$  y se evalúa mediante la siguiente expresión:

$$s_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}$$

Donde:  $n = 3$  es el número total de series de medición en incremento de la aplicación de fuerza.

La repetibilidad relativa  $b$  en por ciento, para la misma posición de montaje se evalúa para cada valor de fuerza como:

$$b = \frac{r_x}{\bar{x}} \cdot 100\%$$

#### f) Reproducibilidad para diferente posición de montaje.

La evaluación de reproducibilidad en diferente posición de montaje se evalúa de acuerdo con el procedimiento de calibración, con las lecturas obtenidas del transductor bajo calibración en forma ascendente en las posiciones de  $0^\circ$ ,  $120^\circ$  y  $240^\circ$ . Al igual que en el punto anterior, esta reproducibilidad se obtiene como una medida de la dispersión del mejor valor de medición (en diferente posición de montaje) y se calcula como:

$$R = \frac{s_y}{\sqrt{m}}$$

Donde:

$R$ , es la repetibilidad en diferente posición de montaje (reproducibilidad), en las unidades del transductor de bajo calibración;

$\bar{X}$  es la media (mejor valor de medición) del conjunto de las respuestas en diferente posición de montaje del transductor bajo calibración y se obtiene como:

$$\bar{X} = \frac{(x_{1,2,3} + x_4 + x_6)}{3}$$

$s_y$ , es la desviación estándar de las respuestas  $x_{1,2,3}$ ,  $x_4$  y  $x_6$  mediante la siguiente expresión:

$$s_x = \sqrt{\frac{(x_{1,2,3} - y)^2 + (x_4 - y)^2 + (x_6 - y)^2}{m-1}}$$

Donde:  $m = 3$  es el número de cambios de posición.

La reproducibilidad relativa en porcentaje  $b'$  en la diferente posición de montaje (en porcentaje) se evalúa para cada valor aplicado como:

$$b' = \frac{R}{y} \cdot 100\%$$

#### g) Error de Reversibilidad (histéresis)

El error de reversibilidad (histéresis) se debe determinar para cada serie de fuerzas discretas de calibración como la diferencia entre el valor de respuesta del dispositivo indicador de Fuerza cuando se le ha aplicado una fuerza en orden ascendente (en incremento) y la respuesta del mismo a la correspondiente fuerza en orden descendente (en decrementos) para las posiciones de  $120^\circ$  y  $240^\circ$ . En su caso el valor considerado de histéresis es el mayor de ambos valores para cada valor de fuerza aplicada.

$$H_{120} = |x_4 - x_5|$$

$$H_{240} = |x_6 - x_7|$$

$$H = \text{Máximo} (H_{120}; H_{240})$$

El error relativo de reversibilidad se calcula como:

$$h = \frac{H}{y} \cdot 100\%$$

#### h) Error relativo de interpolación $f_a$

El error relativo de interpolación debe ser determinado cuando el transductor bajo calibración sea especificado como de interpolación y se obtiene para cada valor discreto usando una ecuación generalmente de 1º, 2º, o 3º grado mediante la siguiente expresión:

$$f_a = \frac{F - F'}{F'} \cdot 100\%$$

Donde:

$F'$ , es el valor de fuerza obtenido de la ecuación de mejor ajuste (generalmente lineal, cuadrática o cúbica) en función del valor de indicación del transductor de fuerza.

$F$ , es la fuerza que se aplica en el momento de la calibración.

### **i) Error relativo de señal de cero $f_o$**

Este error se calcula con la siguiente expresión (solamente para la serie de medición en 0°) y su contribución se obtiene en unidades relativas del intervalo máximo de medición:

$$f_o = \frac{i_f - i_o}{y_{\max}} \cdot 100\%$$

Donde

$y_{\max}$  es el mejor valor de medición en el intervalo máximo de medición.

$i_f$  es la lectura del indicador del instrumento de medición bajo un valor de fuerza cero después de terminar la serie;

$i_o$  es la lectura del indicador del instrumento de medición bajo una fuerza cero antes de iniciar la serie.

### **j) Error relativo de exactitud (de indicación del instrumento)**

El error de exactitud debe determinarse cuando un transductor sea considerado como de indicación y se obtiene como la diferencia entre el mejor valor de medición del transductor bajo calibración (en las unidades de fuerza del SI) menos el valor de la fuerza real aplicada para cada valor discreto. El error relativo de exactitud se determina mediante la siguiente expresión:

$$e = \frac{(y - F)}{F} \cdot 100\%$$

Donde:

$F$  es el valor de la fuerza real aplicada.

## **V.2 SISTEMAS DE TRANSFERENCIA DE FUERZA**

## V.2.1 Calibración con Sistemas de Transferencia de Fuerza

En el uso de sistemas de transferencia de Fuerza, se utiliza un marco de carga con un sistema de aplicación de fuerza, generalmente hidráulico, aunque puede ser mecánico o una integración de ambos sistemas, en conjunto con un instrumento de referencia (Instrumento de fuerza).

La descripción detallada de los componentes que conforman el sistema de transferencia de fuerza, es muy importante, ya que como es sabido, la influencia de accesorios con diferente paralelismo de superficies, excentricidad del eje axial de la aplicación de la fuerza, estabilidad del sistema de control, etc. son determinantes en la comparación del patrón de referencia y el transductor bajo calibración.

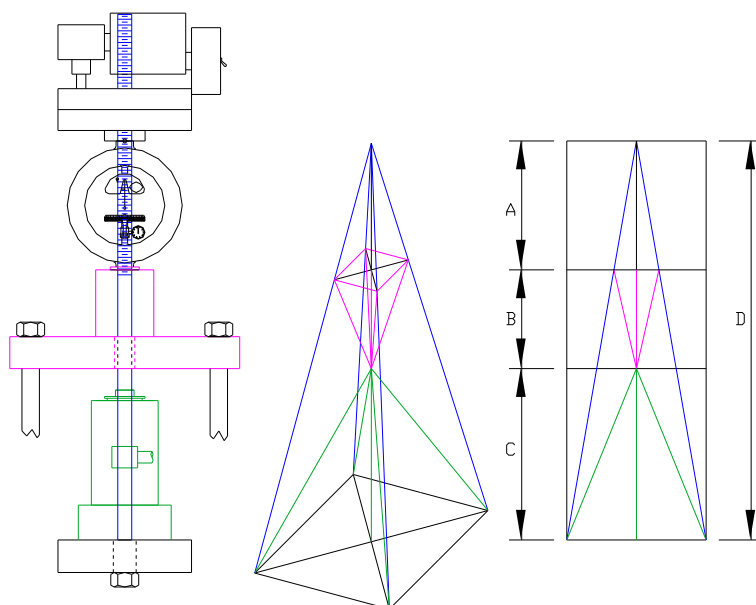


Figura 1. Puntos de axialidad / paralelismo de una Máquina de Transferencia de fuerza

En este tipo de máquinas la fuerza se aplica por medio de una prensa hidráulica con carga sostenida estable y se utiliza un transductor de fuerza como patrón de referencia. La fuerza se determina en función del cambio de señal de salida del patrón, directamente en unidades de fuerza o por la aplicación de fórmulas que la relacionen a unidades de fuerza por medio de una ecuación a unidades de fuerza. Las máquinas de transferencia de fuerza, constan de las siguientes partes,

1. Motor de desplazamiento del marco de carga
2. Marco de carga
3. Pistón hidráulico
4. Soporte con sistema hidráulico

5. Control hidráulico
6. Patrón de referencia (anillo o celda)

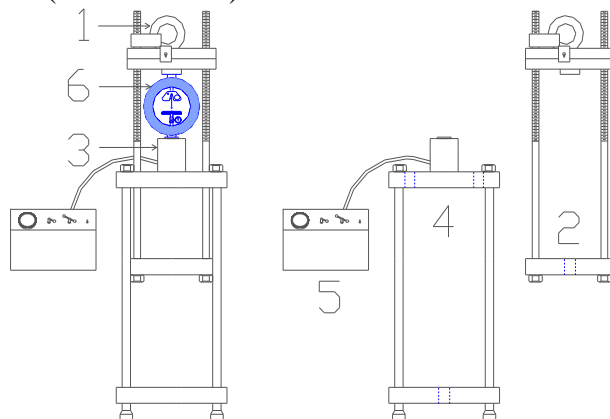


Figura 2. Componentes básicos de una Máquina de Transferencia de fuerza.

Del patrón de referencia, debe conocerse la incertidumbre expandida, la cual, según la norma NMX-CH-376-IMNC-2008, debe considerar, al menos las fuentes de incertidumbre indicadas en la tabla VII.2.

Adicional a las incertidumbres indicadas anteriormente, debe considerarse la deriva del patrón de referencia. (*criterios de la Guía EMA en Calibración de Máquinas de Ensayos, que se incluyen en el punto VII.3*)

Adicional a esta incertidumbre, debe considerarse la influencia del sistema de transferencia, como un conjunto, para determinar la incertidumbre del arreglo patrón de referencia – máquina de transferencia.

Para esto, se debe estudiar la repetibilidad – reproducibilidad del sistema, e integrar estas incertidumbres a la incertidumbre del patrón de referencia.

La desviación (error) del sistema de transferencia de fuerza, debe considerarse, para determinar la ecuación de mejor ajuste del sistema.

### V.2.2 Calibración con Máquinas de Ensayos

Cuando se utiliza una máquina de ensayos para calibrar transductores de fuerza, se tiene la posibilidad de que la máquina de ensayos sea el patrón de referencia, en este caso, la incertidumbre de la calibración de la máquina debe estimarse considerando las fuentes de incertidumbre del anexo B, además de la deriva de la máquina.

En el caso de que la máquina de ensayos sea solo utilizada como marco de carga, también debe considerarse la incertidumbre del sistema de transferencia, en este caso, la incertidumbre del

patrón de referencia, mas la repetibilidad y la reproducibilidad que genera la integración en la máquina de ensayos, por el efecto mecánico de los cabezales, (paralelismo, axialidad, estabilidad) y de los accesorios que se utilicen.

En el sentido de los accesorios, placas intermedias, etc., debe evaluarse el efecto de la posibilidad de intercambiarlos para realizar la comparación de los dos equipos de fuerza, es decir, en el caso de que la celda de carga de referencia haya sido calibrada con accesorios normalizados, y al momento de utilizarse como equipo de transferencia, se sustituyan los botones de carga, apoyos esféricos, etc. Debe evaluarse la influencia de este cambio, y considerarse en la incertidumbre del sistema de transferencia.

*(fotos de ejemplos de placas, accesorios, etc., utilizados por los laboratorios acreditados en la calibración de transductores de fuerzas).*

En la calibración de los equipos de fuerza, debe evitarse sustituir los accesorios de uso, ya que esto significa variabilidad en los resultados respecto a la manera en que se utilizan normalmente.

En el mismo sentido, debe utilizarse el sistema de medición, es decir, no utilizar indicadores diferentes a los del equipo, ya que, al igual que los accesorios, esto genera variación en el comportamiento del equipo.

## **CONFIRMACIÓN METROLÓGICA Y CALIFICACIÓN DE EQUIPOS**

### **V.1 Confirmación metrológica**

El laboratorio deberá contar con elementos suficientes para demostrar la confirmación metrológica de su sistema de medición acorde al tipo de patrón utilizado y su clase de exactitud, por ejemplo mediante cartas de control, programa de calibración, verificaciones intermedias, etcétera.

El periodo de calibración del (o los) patrón (es) es una actividad y función del laboratorio de calibración, sin embargo una práctica usual es que éste no exceda 1 año. En lapsos mayores de calibración (sin exceder 24 meses) es conveniente demostrar por confirmación metrológica adecuada (por ejemplo mediante cartas de control de al menos los últimos 3 años y el aseguramiento de la calidad de las mediciones) que la calibración es vigente.

### **V.2 Calificación de equipos**

En caso de que el laboratorio desee realizar la clasificación de los transductores de fuerza con la norma de referencia NMX-CH-376-IMNC:2008, se usarán para tal efecto los requisitos que se observan en la tabla 1 de esta guía.



## VI. TRAZABILIDAD DE LAS MEDICIONES

La trazabilidad de las mediciones de los patrones de calibración del laboratorio debe ser a los patrones nacionales de fuerza, evidenciada con los respectivos certificados o informes de calibración.

### VI.1 Trazabilidad, calibración y patrón

*Trazabilidad:* Propiedad del resultado de una medición o de un patrón, tal que ésta pueda ser relacionada con referencias determinadas, generalmente patrones nacionales o internacionales, por medio de una cadena ininterrumpida de comparaciones teniendo todas incertidumbres determinadas [1].

#### NOTAS

- i. Este concepto se expresa frecuentemente por el adjetivo trazable.
- ii. La cadena ininterrumpida de comparaciones es llamada cadena de trazabilidad.

*Patrón:* Medida materializada, aparato de medición o sistema de medición destinado a definir, realizar, conservar o reproducir una unidad, o uno o varios valores conocidos de una magnitud, para servir de referencia [1].

*Calibración:* Conjunto de operaciones que establecen bajo condiciones especificadas, la relación entre los valores indicados por un aparato o sistema de medición o los valores representados por una medida materializada y los valores correspondientes de la magnitud realizada por los patrones [1].

*Verificación:* Confirmación y provisión de evidencia objetiva de que se han cumplido los requisitos especificados [4].

Debe notarse que la calibración NO incluye operaciones de ajuste, y tampoco implica la comparación con requisito alguno, por lo que debe entenderse que la verificación es una actividad no incluida en la calibración, aunque sean necesarios los resultados de una calibración para soportarla.

### VI.2 Utilidad de la trazabilidad

La trazabilidad es la propiedad de las mediciones que permite hacer comparaciones entre ellas, por lo que es indispensable para construir la confianza en las mismas. Cabe subrayar que sólo tienen sentido las comparaciones entre medidas asociadas a una misma magnitud.

La trazabilidad de una medición está relacionada con la disseminación de la unidad correspondiente a esa medición. La expresión del valor de una magnitud incluye la referencia

a una unidad de medida, la cual ha sido elegida por acuerdo, y por tanto, las medidas de la misma magnitud deben estar referidas a la misma unidad. Aún cuando la definición de trazabilidad no impone limitaciones sobre la naturaleza de las *referencias determinadas*, es conveniente lograr la uniformidad universal de las mismas mediante el uso de las unidades del Sistema Internacional de unidades, SI, las cuales ya han sido convenidas en el marco de la Convención del Metro. En México, es obligatorio el uso del Sistema General de Unidades [3], el cual contiene a las unidades del SI.

La definición de cada una de las unidades del SI puede llevarse a la práctica mediante el uso de algún instrumento, artefacto o sistema de medición, lo cual de hecho, es la realización física de la unidad de medida. Un patrón nacional de medida se establece mediante la realización física de una unidad de medición, con la característica de que mantiene, tanto la menor incertidumbre de medición en una nación, cuanto la comparación con patrones nacionales de otros países. El patrón nacional constituye el primer eslabón de la cadena de trazabilidad en una nación. Estas realizaciones están usualmente bajo la responsabilidad de los institutos nacionales de metrología, quienes diseminan las unidades de medición al siguiente eslabón en la cadena de trazabilidad. Las calibraciones de instrumentos o patrones de medición constituyen los eslabones de la cadena de trazabilidad.

Las magnitudes derivadas tienen trazabilidad originada en más de una referencia determinada, en cuyo caso aparecen varias cadenas de trazabilidad que parten de las unidades base que componen la unidad derivada, y se encuentran en un punto de concurrencia que eventualmente conecta a las medidas bajo examen. Nuevamente, las cadenas pueden estar constituidas por calibraciones o por la aplicación apropiada de los métodos correspondientes.

### **VI.3 Elementos de la trazabilidad**

Los criterios relativos a la trazabilidad de las medidas, en la parte de la cadena bajo su responsabilidad, deben atender los elementos siguientes:

- a. El resultado de medición cuya trazabilidad se desea mostrar;
- b. Las referencias determinadas, en este caso los patrones nacionales de fuerza;
- c. Cadena de comparaciones, es decir conjunto de calibraciones que conecta el resultado de la medición con las referencias determinadas;
- d. El valor de la incertidumbre de las mediciones;
- e. La referencia al procedimiento de calibración;
- f. La referencia al organismo responsable de la calibración.

Los siguientes equipos deberán estar calibrados para asegurar la trazabilidad e incertidumbre de la medición para la calibración de transductores de fuerza.

- Sistema de masas suspendidas
- Sistema de Transferencia de fuerza, compuesto por el Instrumento patrón (cápsulas de mercurio, anillos de carga, transductores de fuerza, celdas de carga) y la máquina que se utiliza como medio de transferencia (puede ser máquina de ensayos).
- Máquina de ensayos.

- Termómetro.

Para asegurar la trazabilidad e incertidumbre de la medición en la calibración de transductores de fuerza, el periodo de calibración de los equipos antes mencionados no deberá exceder 24 meses, (con base a la norma NMX-CH-376-IMNC:2008).

Entre los mecanismos para mantener la trazabilidad de las mediciones se contemplan los siguientes:

- Programa adecuado de calibración, en los términos que se comentan en el apartado V.1).
- Contar con cartas de control de calibración del (los) patrón (es).
- Contar con un programa de verificación del (los) patrón (es) entre cada calibración.
- Participar en comparaciones entre laboratorios acreditados y ensayos de aptitud.

## VII. INCERTIDUMBRE DE MEDICIÓN

### VII.1 Modelo matemático para la incertidumbre de la calibración

Para estimar la incertidumbre de la calibración del transductor de fuerza, el siguiente modelo matemático aplica en la determinación del mensurando.

$$e = \bar{X} - F_{cmc}$$

Donde:

- $e$  Es el error del transductor bajo calibración;
- $\bar{X}$  Es el valor de fuerza obtenido de una curva de ajuste o del valor de indicación del transductor;
- $F_{cmc}$  Es el valor de fuerza generado en el patrón de acuerdo con su Capacidad de Medición y Calibración.

Aplicando la ley de propagación de la incertidumbre a la expresión anterior, obtenemos la siguiente relación funcional para la calibración del equipo bajo calibración.

### VII.2 Incertidumbre estándar combinada e incertidumbre expandida de la calibración.

La incertidumbre estándar combinada de la calibración  $u_{cal}$  es obtenida mediante la siguiente expresión:

$$u_{cal} = \sqrt{u_{(cmc)}^2 + u_{\bar{X}}^2}$$

Donde:

- $u_{cmc}$  es la incertidumbre estándar de la capacidad de medición y calibración del patrón utilizado;

$u_x$  es la incertidumbre estándar combinada asociada al mejor valor de medición del transductor de fuerza.

De acuerdo a los parámetros anteriormente descritos (propiedades metrológicas) para la calibración de transductores, la incertidumbre asociada del mejor valor de medición del instrumento bajo calibración puede ser determinada mediante la siguiente relación funcional para  $\bar{X}$ :

$$\bar{X} = f(b, b', h, f_0, r_a)$$

Donde:

- $b$  es la repetibilidad en la misma posición de montaje del transductor bajo calibración;
- $b'$  es la reproducibilidad relativa en diferente posición de montaje del transductor bajo calibración;
- $h$  es el la reversibilidad (histéresis) relativa del transductor bajo calibración;
- $f_0$  es el error relativo de cero después de la descarga del transductor bajo calibración;
- $r$  es la resolución relativa del sistema de indicación del transductor bajo calibración.

La incertidumbre  $u(\bar{X})$  puede obtenerse mediante la ley de propagación de incertidumbres considerando aproximación de variables no correlacionadas:

$$u(\bar{X}) = \sqrt{\sum_{i=1}^N \left( \frac{\partial y}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i)}$$

Como todos los parámetros de influencia de la expresión anterior se consideran en valores relativos, el cuadrado de las derivadas parciales  $\partial \bar{y} / \partial x_i$  en la expresión anterior será +1, por lo que tal expresión puede re escribirse como:

$$u(x) = \sqrt{u^2_{(cmc)} + u^2(r) + u^2(b) + u^2(b') + u^2(h) + u^2(f_0) + u^2(f_a)}$$

Las distribuciones de probabilidad para la estimación de las varianzas relativas, se muestran en la tabla siguiente.

Componente de incertidumbre	Distribución de probabilidad	Varianza relativa Estimada
Resolución	Rectangular	$u^2(r) = r^2/12$
Repetibilidad misma posición	Normal	$u^2(b) = s^2_b/n$
Reproducibilidad en diferente posición	Normal	$u^2(b') = s^2(b')/n$
Residual de la Ec de ajuste	Normal	Ver Nota B.2

Histéresis	Rectangular	$u^2_H = h^2/12$
Error de cero	Rectangular	$u^2_{\text{cero}} = f_0^2/12$

Tabla VII.2. Distribuciones de probabilidad y varianza asociada a las propiedades metrológicas del transductor de fuerza (equipo bajo calibración).

Nota B.2. La incertidumbre o varianza asociada a la ecuación de mejor ajuste  $f_a$ , será la desviación estándar de los residuales.

Por lo tanto, se tiene la siguiente expresión general:

$$u_{cal} = \sqrt{u^2_{\text{(sistema patrón)}} + u^2_x} = \sqrt{u^2_{\text{(cmc)}} + u^2(r) + u^2(b) + u^2(b') + u^2(h) + u^2(f_0) + u^2(f_a)}$$

Donde  $u_{\text{(sistema patrón)}}$  es igual o menor que la CMC declarada del laboratorio

Para la incertidumbre expandida  $U_E$  de la calibración, esta se evalúa como:

$$U_E = u_c \cdot k$$

Aquí,  $k$  es un número que corresponde al valor de  $p$  elegido por el proveedor de la medición, usualmente  $p = 95 \%$  y entonces  $k = 2$ . También es posible determinar la incertidumbre expandida determinando en primer lugar los grados efectivos de libertad ( $v_{ef}$ ) conforme a la siguiente expresión:

$$\frac{1}{v_{ef}} = \sum_{i=1}^N \frac{\left(\frac{u_i(y)}{u_c}\right)^4}{v_i}$$

Donde:

$u_c$  es la incertidumbre combinada de la calibración

$u_i$  es la incertidumbre de cada componente

$v_i$  son los grados de libertad para cada incertidumbre

La incertidumbre expandida puede también determinarse también como:

$$U_E = u_c \cdot t_p(v_{ef})$$

Donde:

$t_p$  es el valor de la distribución t-student para los  $v_{ef}$ .

### VII.3 Determinación de contribución del sistema de medición patrón

La tabla 2 muestra las contribuciones asociadas al sistema de medición e incluyen el patrón de medición y la deriva en las diferentes calibraciones del equipo patrón.

✓ Patrón de calibración:

El resultado de la calibración de los patrones de calibración del laboratorio debe ser trazable a patrones nacionales mantenidos en el CENAM (política de trazabilidad e incertidumbres de ema). Son considerados como resultados de la calibración los siguientes puntos:

- Los valores de referencia con los que se generó la magnitud (patrón del CENAM o del laboratorio acreditado jerárquicamente con menor incertidumbre) y el valor promedio de lectura del equipo bajo calibración.
- La ecuación de corrección o el error promedio del equipo bajo calibración;
- La incertidumbre asociada a la calibración del patrón del laboratorio.

✓ Deriva en la calibración del equipo

Es conveniente considerar la deriva en la calibración del patrón de medición bajo los siguientes criterios:

- i. Si es la primera calibración del patrón de medición, se sugiere considerar como contribución por deriva un valor igual  $\frac{1}{4}$  del valor de la incertidumbre estándar del patrón
- ii. Si es la segunda calibración, se puede considerar una contribución igual a la desviación entre las calibraciones asignando una distribución de probabilidad rectangular como se observa en la tabla 2 en <sup>1</sup>.
- iii. Si son 3 o más calibraciones se sugiere asignar una distribución de probabilidad basada en la desviación estándar de las diferentes calibraciones como se observa en la tabla 2 en <sup>2</sup>.

Ejemplo:

La Fuerza  $F$  del sistema es determinada mediante la siguiente relación funcional:

$$F_{sistema\ patrón} = f(\bar{F}_{patrón}, d)$$

Es decir, la fuerza  $F_{sistema\ patrón}$  se determina mediante la siguiente expresión:

$$F_{sistema\ patrón} = \bar{F}_{patrón} + d$$

Aquí:

$\bar{F}_{patrón}$  es la fuerza obtenida del certificado de calibración del sistema de medición de fuerza (instrumento patrón);

$d$  es la corrección por deriva del patrón de medición de fuerza

Aplicando la ley de propagación de incertidumbre a la expresión anterior y dado que los argumentos  $\bar{F}_{patrón}$ ,  $d$ , son independientes, la expresión anterior para la incertidumbre queda de la siguiente manera:

$$u_{F-sistema patrón} = \sqrt{u_{Patrón}^2 + u_d^2}$$

Fuente $X_i$	Valor de la Incertidumbre estándar $u_{X_i}$	Tipo	Coficiente de sensibilidad $\partial f / \partial X_i$	$(\partial f / \partial X_i) \cdot u_{X_i}$
Patrón	<sup>1</sup> $U_{Certificado} / k$	B	1	$u_{Certificado}$
Deriva	<sup>2</sup> $u = \frac{(Desviación)}{2 \cdot \sqrt{3}} u = s \div \sqrt{n}$	B	1	$u_{deriva}$
	<sup>3</sup> $u = s \div \sqrt{n^2}$	A		
$u_{F-sistema patrón}$				$\sqrt{\sum u_i^2}$
$\nu_{eff}$				$t_{(\nu_{eff})}$
$U_{F-sistema patrón}$				$t_{(\nu_{eff})} \cdot u_{F-sistema patrón}$

Tabla 2. Determinación de la contribución a la incertidumbre por el sistema de medición del laboratorio de calibración.

✓ **Efecto de las condiciones ambientales por efecto de temperatura:**

Los patrones de fuerza son generalmente calibrados a temperaturas controladas (por ejemplo  $22\text{ °C} \pm 1\text{ °C}$ ). Existen equipos compensados por temperatura, como es el caso de la mayoría de las celdas de carga; sin embargo, la temperatura ( $t$ ) durante una calibración puede variar, en condiciones operativas de campo, de  $10\text{ °C}$  a  $40\text{ °C}$ , por lo que su contribución en la incertidumbre podría considerarse como tipo B con una distribución rectangular. Su consideración se puede llevar a cabo mediante la siguiente relación:

$$u_{temp}^2 = \frac{(k \cdot \Delta t)^2}{12}$$

Donde  $k$  es el coeficiente de temperatura para el cambio en la sensibilidad del patrón de fuerza (celda de carga) de acuerdo a las especificaciones del fabricante y al intervalo de variación de temperatura  $\Delta t$ . (Un valor típico adimensional para  $k = 0.000\ 05\text{ °C}^{-1}$  acorde a EURAMET CG-04 V.01, ó  $k = 0.000\ 27\text{ °C}^{-1}$ , acorde a ISO 376:2004)

Sólo en el caso de anillos de carga utilizados como patrones, la incertidumbre debida a la corrección por temperatura es determinada mediante la expresión de corrección siguiente:

$$D_t = D_c [1 + K(t_t - t_c)]$$

$D_c$  es la lectura de la deflexión corregida a la temperatura de calibración  $t_c$  (en  $^{\circ}\text{C}$ ).

$D_t$  es la deflexión a la temperatura de trabajo  $t_t$  (en  $^{\circ}\text{C}$ ).

$K = 0,000\ 27$  es el coeficiente de temperatura, en  $1/^{\circ}\text{C}$ , (acorde a ISO 376:2004).

La incertidumbre por la corrección deberá obtenerse de la aplicación de la ley de propagación de incertidumbres a la expresión anterior.

## **VII.5 Informe de los resultados de la calibración**

Los resultados, de la calibración de un transductor de fuerza, mínimos que se deben informar, son los que se presentan en la tabla 1. Es necesario indicar claramente para todos los casos si los resultados están expresados como % de la lectura (%L), como % de escala total (% E. T.) o como una combinación de ambos. Es obligatorio expresar los resultados en unidades del Sistema Internacional de unidades, SI.



Resultados usuales	De acuerdo con la Norma ISO
Tabla de lecturas del mensurando	Valor medio del mensurando del transductor.
Error de cero	Incertidumbre expandida de la calibración del transductor.
Histéresis	Nivel de confianza y/o factor de cobertura.
Reproducibilidad	Gráfico de la lectura del equipo contra los errores o residuales, según sea el caso.
Resolución	

Tabla 5. Resultados de la calibración de un transductor de fuerza.

## VIII. VALIDACIÓN DE MÉTODOS DE MEDICIÓN

Con el uso de la norma mexicana no se requiere validación del método.

## IX. BUENAS PRÁCTICAS DE MEDICIÓN

Para las buenas prácticas de calibración de es recomendable que el laboratorio tenga en cuenta las siguientes consideraciones:

### El patrón de trabajo debería:

- ❑ Tener el intervalo de medición, correcciones adecuadas e incertidumbre suficiente para calibrar la máquina de acuerdo punto IV Método y Sistema de Medición de esta guía.
- ❑ Estar vigente en su calibración y dentro del control “estadístico” (cartas de control), que mantenga el laboratorio para el patrón. Para mayor información ver la norma ISO 10012-2003 Sistemas de gestión de las mediciones — Requisitos para los procesos de medición y los equipos de medición.
- ❑ Estar en óptimas condiciones de funcionamiento, cumpliendo con sus programas de mantenimiento preventivo y en buen estado de funcionamiento.
- ❑ Aplicar las correcciones necesarias de acuerdo al patrón utilizado.
- ❑ Asegurar la trazabilidad al patrón nacional de fuerza, cumpliendo con el punto VI de esta guía.

### Las instalaciones deberían:

- ❑ Mantener una temperatura ambiente estable de acuerdo al nivel de incertidumbre requerido y/o solicitado en la medición. La norma NMX-CH-7500-1-IMNC:2008 para la calibración proporciona los límites de variación recomendados para la calibración.
- ❑ Mantener una humedad adecuada (que no exceda el 80%) de acuerdo al nivel de incertidumbre requerido y/o solicitado en la medición.
- ❑ Mantener las instalaciones limpias y ordenadas.
- ❑ Supervisar el mantenimiento del área de calibración evitando cualquier daño a los patrones de trabajo y/o referencia.
- ❑ Cumplir con los requisitos establecidos en el punto IV.4 de esta guía.

**El termómetro debería:**

- ❑ Mantener su calibración dentro del control “estadístico” (cartas de control), que mantiene el laboratorio para el equipo auxiliar, cuando sea necesario.
- ❑ Tener el intervalo de medición, exactitud e incertidumbre suficiente para calibrar la máquina de acuerdo al punto III.2 de esta guía, y considerando el nivel de incertidumbre requerido y/o solicitado.
- ❑ Estar en óptimas condiciones de funcionamiento, cumpliendo con sus programas de mantenimiento preventivo y en buen estado de funcionamiento.

**Método y/o procedimiento de medición debería:**

- ❑ Asegurar su trazabilidad al patrón nacional de fuerza aplicando el punto VI de esta guía.
- ❑ Cumplir con los requisitos mínimos de esta guía mencionados en el punto IV.
- ❑ Estar documentado con suficiente detalle de acuerdo a los patrones, condiciones ambientales con que cuenta el laboratorio y al nivel de incertidumbre solicitado.
- ❑ Ser revisado periódicamente.

**Máquina a ser calibrada debería:**

- ❑ Estar en condiciones de funcionamiento y limpia.
- ❑ Leer el manual del fabricante antes de su calibración, para revisar su funcionamiento y especificaciones para evitar dañarla.
- ❑ Cumplir con la relación de exactitudes para su calibración, propuesta en esta guía en el punto III.2 o en caso contrario documentarlo.
- ❑ Evitar la aplicación de cargas que excedan su intervalo de medición.
- ❑ Cumplir con los pasos establecidos en el punto IV de esta guía.

**El personal debería:**

- ❑ Tener los conocimientos necesarios para cumplir con su actividad desempeñada dentro del laboratorio (técnico, signatario, responsable técnico, etc.).
- ❑ Cumplir con los requisitos propuestos en el punto IV.5 de esta guía.
- ❑ Estar en un esquema de evaluación periódica que asegure y mejore la repetibilidad y reproducibilidad de las mediciones.
- ❑ Estar dentro de un programa de capacitación.

**Los informes de calibración deberían:**

- ❑ Contener la información necesaria para reproducir las mediciones.
- ❑ Ser claros y sin ambigüedad para el cliente.
- ❑ Contener gráficos cuando sea necesario.
- ❑ Contener información que muestre la trazabilidad de las mediciones y/o resultados del informe, al patrón nacional de fuerza cumpliendo con lo estipulado en el punto VI de esta guía.
- ❑ Estimar la incertidumbre del resultado de la medición de acuerdo con la recomendación estipulada en el punto VII de esta guía.

## X. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] NMX-Z-055-IMNC:2009 Metrología – Vocabulario de términos fundamentales y generales; equivalente al documento International Vocabulary of Basic and General Terms in Metrology, BIPM, IEC, IFCC, ISO, IUPAC, IUPAP, OIML, 1993.
- [2] NMX-EC-17025-IMNC-2006 Requisitos generales para la competencia de los laboratorios de ensayo y de calibración.
- [3] NOM- 008-SCFI Sistema General de Unidades de Medida.
- [4] NMX-EC-9000-IMNC-2000 Sistemas de gestión de la calidad – Fundamentos y vocabulario.
- [5] NMX-CC-10012-IMNC-2004 Sistema de gestión de las mediciones – Requisitos para procesos de medición y equipos de medición.
- [6] Política referente a la trazabilidad de las mediciones, ema,  
<http://www.ema.org.mx/ema/pdf/PROCEDIMIENTOS/TRAZABILIDAD%20E%20IN CERTIDUMBRE%20SC-2002-12-12.pdf>, 2002.
- [7] The mutual recognition arrangement, BIPM, (1999). También en <http://www.bipm.fr/en/convention/mra>
- [8] Política referente a la incertidumbre de mediciones, ema,  
<http://www.ema.org.mx/ema/pdf/PROCEDIMIENTOS/TRAZABILIDAD%20E%20IN CERTIDUMBRE%20SC-2002-12-12.pdf>, 2002.
- [9] NMX-CH-140-IMNC-2002 Guía para la expresión de la incertidumbre de las mediciones; equivalente al documento Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement, BIPM, IEC, IFCC, ISO, IUPAC, IUPAP, OIML, 1995.
- [10] Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement. Supplement 1. Numerical Methods for the Propagation of Distributions. Preparado por miembros de JCGM/WG1/SC1, Diciembre 2002.
- [11] Norma NMX-CH-7500-1-IMNC:2008. Verificación de Máquinas de Ensayo Uniaxial – Máquinas de Ensayo a Tracción/Compresión – Verificación y calibración del sistema de medición de Fuerza.
- [12] Norma NMX-CH23-1994-SCFI. Instrumentos de Medición. Calibración de Instrumentos Probadores de Fuerza Para la Verificación de Máquinas de Ensaye Uniaxiales.
- [13] ISO-7500-1:2004 Metallic Material -Verification of Static uniaxial testing machines – Part 1: Tension/compression Testing Machines – Verification and Calibration of the Force-measuring System.
- [14] Norma ISO-376: Metallic Materials – Calibration of Proving Instruments Used for the Verification of Uniaxial Testing Machines.
- [15] Guía EURAMET / cg-04/v.01(Marzo 2010) Incertidumbres en Mediciones de Fuerza.