

Guía Técnica sobre Trazabilidad Metrológica e Incertidumbre de Medida en los Servicios de Calibración de Máquinas o Instrumentos de Compresión y/o Tracción

México, octubre de 2013

Derechos reservados ©

PRESENTACIÓN

Para asegurar la uniformidad y validez técnica de la expresión de la trazabilidad metrológica de las mediciones y de la estimación de la incertidumbre de medida de las mismas, la entidad mexicana de acreditación, a.c., solicitó al Centro Nacional de Metrología la revisión y elaboración de Guías Técnicas sobre Trazabilidad Metrológica e Incertidumbre de Medida.

Los Subcomités de evaluación de Laboratorios Acreditados de Calibración y de Ensayo de la entidad mexicana de acreditación, a.c., se incorporaron a este proyecto transmitiendo sus conocimientos y experiencias relacionados con la trazabilidad metrológica e incertidumbre de medida.

El Centro Nacional de Metrología coordinó la elaboración de las Guías, proponiendo criterios técnicamente sustentados, procurando que las opiniones de los Subcomités fueran apropiadamente consideradas y asegurando la coherencia de las mismas con otros documentos técnicos de referencia.

Las Guías Técnicas de Trazabilidad Metrológica e Incertidumbre de Medida observan lo establecido en documentos de referencia conocidos ampliamente en la comunidad internacional, en los cuales se fundamentan las políticas de Trazabilidad e Incertidumbre de la entidad mexicana de acreditación, a.c.

Las Guías aportan criterios técnicos que sirven de apoyo a la aplicación de la norma NMX-EC-17025-IMNC-2006. La coherencia de las Guías con esta norma y con otros documentos de referencia, contribuye a asegurar la confiabilidad y uniformidad de las mediciones que realizan los laboratorios acreditados.

Octubre de 2013

Dr. Héctor O. Nava Jaimes
Director General
Centro Nacional de Metrología

María Isabel López Martínez
Directora Ejecutiva
entidad mexicana de acreditación, a.c.

AGRADECIMIENTOS

La entidad mexicana de acreditación, a.c., expresa su reconocimiento al Fondo de Apoyo para la Micro, Pequeña y Mediana Empresa (FONDO PYME), auspiciado por la Secretaría de Economía, por haber proporcionado los recursos financieros para la elaboración de este documento, mediante el proyecto aprobado con folio FP2007-1605 de nombre “Elaboración de guías técnicas sobre trazabilidad metrológica e incertidumbre de medida que permitan el fortalecimiento del Sistema Nacional de Acreditación de Laboratorios de Ensayo y Calibración” y por este medio hace patente su sincero reconocimiento y agradecimiento a la Secretaría de Economía, a la Subsecretaría para la Pequeña y Mediana Empresa, a la Dirección General de Desarrollo Empresarial y Oportunidades de Negocio, y a los profesionales que aportaron su tiempo y conocimiento en su desarrollo, destacando a los responsables de la elaboración.

GRUPO DE TRABAJO

QUE PARTICIPÓ EN LA ELABORACIÓN DE ESTA GUÍA TÉCNICA

Alberto Guízar López Hermosa,	Representaciones y Distribuciones FAL, S. A. de C. V.
Rodolfo Navarrete Silva,	Davi, Equipo de Laboratorio para Construcción, S.A. de C.V.
Walter Louis Buehler,	Caltechnix de México, S. A. de C. V.
Jorge C. Torres Guzmán,	CENAM
Alejandro Cárdenas Moctezuma,	CENAM
Daniel A. Ramírez Ahedo,	CENAM
David Jacobo Obregón,	Comisión Federal de Electricidad - LAPEM
Mario Camacho Millán,	Independiente
Felipe Gómez Sánchez,	AMICPAC
Octavio López Contreras,	Laboratorio de Calibración y Consultoría, S.C.
Santiago Ochoa Márquez,	SOO SOM
Luis Manuel Mercado	IMNC
David F. Correa Jara	ema

Grupo de trabajo que participo en la revisión de la guía técnica:

Jorge C. Torres Guzmán,	CENAM
Alejandro Cárdenas Moctezuma,	CENAM
Walter Louis Buehler,	Caltechnix de México, S. A. de C. V.

Alberto Guízar López Hermosa,	Representaciones y Distribuciones FAL, S. A. de C. V.
Fernando Camacho Martínez,	Impulsora Tlaxcalteca de Industrias, S. A. de C. V.
Rodolfo Navarrete Silva,	Davi, Equipo de Laboratorio para Construcción, S.A. de C.V.
Héctor I. Valladolid Rojas,	Comercializadora del Istmo, S. A. de C. V.
Jorge A. Jasso Cortés	CAPYMET
José Guillermo Flores Flores	Independiente
Gabriela Dávila M.	LACOSA
Juan Baltazar García	AMIC
Alejandro Zarate Flores	CFE - LAPEM
David F. Correa Jara	ema
Álvaro Villa Montes	ema

ÍNDICE

PRESENTACIÓN	2
AGRADECIMIENTOS	3
GRUPO DE TRABAJO	3
1. PROPÓSITO DE LA GUÍA TÉCNICA	6
2. ALCANCE DE LA GUÍA TÉCNICA	6
3. MENSURANDO.....	6
4. MÉTODO Y SISTEMA DE MEDICIÓN	7
5. CONFIRMACIÓN METROLÓGICA Y CALIFICACIÓN DE EQUIPOS.....	10
6. TRAZABILIDAD METROLÓGICA DE LAS MEDICIONES	10
7. INCERTIDUMBRE DE MEDIDA.....	13
8. VALIDACIÓN DE MÉTODOS DE MEDICIÓN.....	20
9. PRÁCTICAS DE MEDICIÓN.....	21
10. REFERENCIAS	23
ANEXO I. EJEMPLO NUMÉRICO PARA LA ESTIMACIÓN DE INCERTIDUMBRE EN LA CALIBRACIÓN DE MÁQUINAS DE DE FUERZA EN MODO COMPRESIÓN Y/O TRACCIÓN	25

1. PROPÓSITO DE LA GUÍA TÉCNICA

Establecer criterios con el objetivo de tener mecanismos que coadyuven en lograr mediciones con trazabilidad metrológica e incertidumbre de medida confiables en la calibración de máquinas de compresión y/o tracción.

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 [1] del servicio de calibración aquí indicado.

Por lo general, en el proceso de acreditación de un laboratorio de calibración de máquinas de ensayo a tracción o compresión, 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-7500-1-IMNC-2008 [5].

Esta guía técnica de trazabilidad metrológica e incertidumbre de medida pretende facilitar la aplicación de las normas NMX-EC-17025-IMNC-2006 [1], NMX-CH-140-IMNC-2002 [3], NMX-CH-7500-1-IMNC-2008 [5] sin sustituirlas ni modificarlas.

2. ALCANCE DE LA GUÍA TÉCNICA

Esta guía establece criterios e incluye observaciones para la calibración de máquinas o instrumentos, de compresión y/o tracción por el método de comparación directa.

3. MENSURANDO

Fuerza, medida en la máquina o instrumento, de compresión y/o tracción, a través de la lectura en el dispositivo indicador de mejor resolución, en ocasiones, ingresados en tablas o ecuaciones que permitan obtener unidades de fuerza del SI.

3.1 Intervalo de calibración

El límite superior de medición quedará acotado por la solicitud de calibración de los equipos, sin embargo se recomienda un límite inferior típicamente del 20 % del intervalo de medición de la máquina. Lo anterior aplica para cada intervalo de medición a ser calibrado de la máquina acorde al punto 6.4.5 de la norma NMX-CH-7500-1-IMNC-2008 [5] / ISO 7500-1:2004 [6].

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

3.2 Incertidumbre de medida esperada

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

Nota 2: El enfoque adecuado para asegurar la calidad de las mediciones incluye un acuerdo entre el usuario de la máquina y el laboratorio respecto a la relación de incertidumbre de medida (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 de la máquina.

4. 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 máquinas de compresión y/o tracción.

4.1 Método de medición

Método de medida: Descripción genérica de la secuencia lógica de operaciones utilizadas en una medición. [2]

Nota. Los métodos de medida pueden clasificarse de varias formas como:

- Método de sustitución,
- Método diferencial, y
- Método de cero;
- o
- Método directo, y
- Método indirecto.

El método de medida es por medio de comparación directa, ya que se realizará la comparación de las lecturas observadas del dispositivo indicador de la máquina contra las lecturas del patrón utilizado (o viceversa) de acuerdo al punto 6.4.4 de la norma NMX-CH-7500-1-IMNC-2008, aplicando la fuerza directamente de la máquina al instrumento patrón, o aplicando la fuerza simultáneamente, en acoplamiento en serie, al instrumento medidor de fuerza y al instrumento patrón, garantizando una aplicación axial de la fuerza.

4.2 Documentos de consulta

- 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 - Part 1: Tension/compression testing machines - Verification and calibration of the force - measuring system.
- NMX-CH-376-IMNC-2008, Instrumentos de medición - Calibración de instrumentos de medición de fuerza empleados para la verificación de máquinas de ensayo uniaxiales.
- NOM-008-SCFI-2002, Sistema General de Unidades de Medida.
- NMX-Z-055-IMNC-2009, Vocabulario Internacional de Metrología - Conceptos fundamentales y generales, y términos asociados (VIM). Equivalente al documento ISO/IEC GUIDE 99:2007 y a la tercera edición del VIM.
- 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.
- ISO 10012:2003, Measurement management systems - Requirements for measurement processes and measuring equipment.
- Daniel A. Ramírez Ahedo, Jorge C. Torres Guzmán, Propuesta para la Determinación de la Mejor Capacidad de Medición de Máquinas y Sistemas de Calibración de Fuerza y su Clasificación para Laboratorios Acreditados. Memorias del IV Congreso Internacional y XVI Nacional de Metrología y Normalización. Guadalajara, México. Octubre 2000.
- Daniel A. Ramírez Ahedo, Jorge C. Torres Guzmán, Amritlal Sawla, Propuesta Para La Determinación de la Incertidumbre en la Calibración de Máquinas de Ensayo de Tensión y/o Compresión en México. Memorias del XV Seminario Nacional de Metrología, ISN-0188-4328. Querétaro, México. Octubre 1999.

4.3 Procedimiento de medición

Procedimiento de medida: Descripción detallada de una medición conforme a uno o más principios de medida y a un método de medida dado, basado en un modelo de medida y que incluye los cálculos necesarios para obtener un resultado de medida. [2]

Es deseable que el procedimiento de calibración se realice de acuerdo con los requisitos descritos en la norma mexicana NMX-CH-7500-1-IMNC-2008 [5]. Algunos aspectos importantes a revisar en la norma son los requisitos del punto 6.4 de la norma en cuestión, además de:

- Verificar que el intervalo de medición y especificaciones de error o incertidumbre de medida de la máquina esté dentro del alcance de acreditación del laboratorio.

4.4 Equipos, instrumentos e instalaciones.

Los equipos, e instrumentos mínimos con los que cuenta un laboratorio para calibración de máquinas de ensaye de tracción y/o compresión incluyen:

- Instrumento patrón (cápsulas de mercurio, anillos de carga, transductores de fuerza, celdas de carga, masas);
- Placas soporte y dispositivos de carga;
- Dispositivo para verificar el centrado del patrón respecto al cabezal de carga;
- Termómetro;
- Instalaciones no específicas (las propias del cliente, calibración en sitio).

4.5 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 [10], con las siguientes habilidades, aptitudes y conocimientos mínimos:

- Que es competente en términos de su experiencia en calibración de máquinas de tracción o compresión (se considera adecuado por ejemplo una experiencia mínima de 1 año en calibración de máquinas), que tiene adecuada interpretación de la norma NMX-CH-7500-1-IMNC-2008 [5] 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 patrón en la máquina.
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 [10], 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 de medida y determinación de la CMC del laboratorio, clasificación de máquinas, 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 medio superior.

5. CONFIRMACIÓN METROLÓGICA Y CALIFICACIÓN DE EQUIPOS

5.1 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, etc. OIML D10 / ILAC-G24. [15]

El periodo de calibración del(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.

5.2 Clasificación de equipos

En caso de que el laboratorio desee realizar la clasificación de las máquinas de ensayo a tracción / compresión con la norma de referencia NMX-CH-7500-1-IMNC-2008 [5], se usarán para tal efecto los requisitos que se observan en la tabla 1 de esta guía. La clasificación no aplica a instrumentos.

6. TRAZABILIDAD METROLÓGICA DE LAS MEDICIONES

La trazabilidad metrológica 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 de acuerdo a lo descrito en la Política de Trazabilidad Metrológica de las Mediciones de ema [8].

6.1 Trazabilidad metrológica, calibración y patrón

Trazabilidad metrológica: Propiedad de un resultado de medida por la cual el resultado pueda relacionarse con una referencia mediante una cadena ininterrumpida y documentada de calibraciones cada una de las cuales contribuye a la incertidumbre de medida. [2]

Patrón: Realización de la definición de una magnitud dada, con un valor determinado y una incertidumbre de medida asociada, tomada como referencia. [2]

Calibración: Operación que bajo condiciones especificadas establece, en una primera etapa, una relación entre los valores y sus incertidumbres de medida asociadas obtenidas a partir de los patrones de medida, y las correspondientes indicaciones con sus incertidumbres de medida asociadas y, en una segunda etapa, utiliza esta información para establecer una relación que permita obtener un resultado de medida a partir de una indicación. [2]

Verificación: Aportación de evidencia objetiva de que un elemento satisface los requisitos especificados. [2]

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.

6.2 Utilidad de la trazabilidad metrológica

La trazabilidad metrológica 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 metrológica de una medición está relacionada con la diseminación 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 metrológica 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 de Medida [4], 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 medida en una nación, cuanto la comparabilidad con patrones nacionales de otros países. El patrón nacional constituye el primer eslabón de la cadena de trazabilidad metrológica 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 metrológica. Las calibraciones de instrumentos o patrones de medición constituyen los eslabones de la cadena de trazabilidad metrológica.

Las magnitudes derivadas tienen trazabilidad metrológica originada en más de una referencia determinada, en cuyo caso aparecen varias cadenas de trazabilidad metrológica 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.

6.3 Elementos de la trazabilidad metrológica

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

- a. El resultado de las mediciones cuya trazabilidad metrológica 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 medida;
- 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 metrológica e incertidumbre de medida para la calibración de máquinas y/o instrumentos medidores de fuerza de compresión y/o tracción.

- Instrumento patrón (cápsulas de mercurio, anillos de carga, transductores de fuerza, celdas de carga, masas).
- Termómetro.
- Higrómetro (en caso de utilizar masas como patrón, deberá calcularse la densidad del aire).

Para asegurar la trazabilidad metrológica e incertidumbre de medida en la calibración de máquinas de compresión y/o tracción, el periodo de calibración de los equipos antes mencionados no deberá exceder 24 meses, con base en la norma NMX-CH-376-IMNC-2008 [12] (para el patrón de medición ver apartado 5.1).

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

- Programa adecuado de calibración, en los términos que se comentan en el apartado 5.1).
- 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 participar en ensayos de aptitud.

7. INCERTIDUMBRE DE MEDIDA

De acuerdo a la norma mexicana NMX-CH-7500-1-IMNC-2008 [5], en la tabla 1 se muestran las tolerancias de los errores de exactitud, repetibilidad, reproducibilidad, de histéresis y de cero. La última columna no forma parte de la norma, pero incluye el valor recomendado de la incertidumbre de medida de la capacidad de medición y calibración del laboratorio (CMC) para calibrar cierta clase de máquina. En esta columna se indica la incertidumbre de medida relativa (U_{CMC}) la cual se recomienda sea menor o igual a $\frac{1}{4}$ del máximo error permisible de los parámetros de influencia de la máquina.

Clase	Errores relativos de la Máquina de Ensayos en % L para				Resolución en %L de la máquina r	Incertidumbre Recomendada U_{CMC} del laboratorio en % L
	“Exactitud” q	Repetibilidad b	Cero f_o	Histéresis v		
0.5	0.5	0.5	0.05	0.75	0.25	0.12
1	1.0	1.0	0.10	1.50	0.5	0.25
2	2.0	2.0	0.20	3.00	1.0	0.50
3	3.0	3.0	0.30	4.50	1.5	0.75

NOTAS: En el caso de que el patrón no se rote, la incertidumbre se denominará Repetibilidad (b), en caso de que se rote o se vuelva a centrar, se denominará Reproducibilidad (b'), en ambos casos se considera incertidumbre tipo A. “% L significa por ciento de la lectura”.
 En el sentido de la norma el término “Exactitud” se refiere al error relativo de la máquina.

Tabla 1. Valores máximos permisibles para los errores relativos en las máquinas de ensayos de conformidad a la norma NMX-CH-7500-1-IMNC-2008 [5].

La presente guía fue redactada siguiendo las recomendaciones de la NMX-CH-140-IMNC-2002 [3] y se asume que se ha empleado el criterio de clasificación de la norma mexicana NMX-CH-7500-1-IMNC-2008 [5]. Todas las contribuciones de incertidumbre de medida son consideradas como incertidumbres de medida relativas.

Para estimar la incertidumbre de medida en la calibración de una máquina de ensayo tracción/compresión, es necesario que, el laboratorio determine la contribución del sistema de medición y la propia del laboratorio. Para la cual podría incluir además de otras consideradas por el laboratorio, las siguientes contribuciones a la calibración de manera ordenada:

- Contribución del sistema de medición en las que se encuentra la calibración propia del patrón o patrones, la contribución del laboratorio y la contribución de las condiciones de uso;
- Resolución y reproducibilidad de una máquina sujeta a calibración bajo condiciones perfectas de operación para determinar la Capacidad de Medición y Calibración del Laboratorio (CMC) así como la Capacidad de Calibración Expresada como una Incertidumbre de medida (CMCEI) y;

- Las incertidumbres de medida en el momento de la medición asociadas a la toma de lecturas de la máquina de ensayo.

Nota 4: En la tabla de alcance de acreditación que, ante la entidad de mexicana de acreditación (ema) el laboratorio propone, éste pretende reflejar de manera objetiva las capacidades de medición con las que cuenta y en las que:

- La CMC desea reflejar el valor de la incertidumbre de medida alcanzable por el laboratorio. La incertidumbre de medida alcanzable depende en gran medida del patrón (o patrones). En las diferentes áreas metrológicas existen diferentes tipos de patrones con los cuales se pueden lograr los mismos niveles de incertidumbre de medida, y por lo tanto se pudiera concluir que la incertidumbre de medida alcanzable sólo tuviese como criterio la incertidumbre de medida de los patrones para la descripción de las capacidades del laboratorio. Sin embargo esto no es así, el grado de complejidad para operar diferentes instrumentos influye de manera importante en la calibración y por lo tanto se considera un segundo criterio.
- La habilidad de operar instrumentos complejos se considera como punto adicional de descripción de las capacidades técnicas de medición del laboratorio.

7.1 Elementos de la incertidumbre de medida

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. En el Anexo I de esta Guía Técnica, se encuentra un ejemplo numérico para la estimación de incertidumbre en la calibración de máquinas de fuerza en modo compresión y/o tracción.

a) 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 de las Mediciones [8] y Política de incertidumbre de Mediciones [9] 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 de medida) y el valor promedio de lectura del equipo bajo calibración.
- La ecuación de corrección o el error promedio del equipo bajo calibración.
- La incertidumbre de medida asociada a la calibración del patrón del laboratorio.

b) 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 a $\frac{1}{4}$ del valor de la incertidumbre de medida estándar del patrón, como se observa en la tabla 2 inciso i.
- ii Si es la segunda calibración, se puede considerar una contribución igual a la diferencia entre las dos calibraciones considerando una distribución de probabilidad uniforme, como se observa en la tabla 2 inciso ii.
- iii Si son 3 o más calibraciones se sugiere asignar una distribución de probabilidad basada en la desviación estándar de las calibraciones, como se observa en la tabla 2 inciso iii.

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

$$F_{\text{sistema patrón}} = f(\bar{F}_{\text{patrón}}, d) \quad (1)$$

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

$$F_{\text{sistema patrón}} = \bar{F}_{\text{patrón}} + d \quad (2)$$

Donde:

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

$$u_{F_{\text{sistema patrón}}} = \sqrt{u_{\text{patrón}}^2 + u_d^2} \quad (3)$$

Fuente x_i	Valor de la Incertidumbre estándar u_{x_i}	Tipo	Coefficiente de sensibilidad $(\partial f / \partial x_i)$	$(\partial f / \partial x_i) \cdot u_{x_i}$
Patrón	$\frac{U_{\text{certificado}}}{k}$	B	1	$u_{\text{patrón}}$
Deriva	i $\frac{u_{\text{patrón}}}{4}$	B	1	u_d
	ii $\frac{(\text{Diferencia})}{2 \cdot \sqrt{3}}$	B		
	iii $\frac{s}{\sqrt{n}}$	A		
Variabilidad del laboratorio (R&r)	Por ejemplo: ISO 5725 [11]	A	1	$u_{R\&r}$
			$u_{F_{\text{sistema patrón}}}$	$\sqrt{\sum u_i^2}$
			v_{eff}	$t(v_{\text{eff}})$
			$u_{F_{\text{sistema patrón}}}$	$t(v_{\text{eff}}) \cdot u_{F_{\text{sistema patrón}}}$

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

7.2 Determinar la Capacidad de Medición y Calibración del laboratorio (CMC)

Se propone en esta sección las consideraciones necesarias para determinar la CMC del laboratorio de conformidad con la definición de la misma.

Fuente x_i	Valor de la Incertidumbre estándar u_{x_i}	Tipo	Coefficiente de sensibilidad $\partial f / \partial x_i$	$\partial f / \partial x_i \cdot u_{x_i}$
Sistema Patrón	$u_{sistema}$	B	1	$u_{sistema}$
Resolución (“ideal”)	$u_{Resol-ideal} = \frac{r}{2 \cdot \sqrt{3}}$	B	1	$u_{Res-ideal}$
Reproducibilidad (“ideal”)	$u_{Rep-ideal} = \frac{s}{\sqrt{n}}$	A	1	$u_{Reprod-ideal}$
				u_{cmc}
				$\sqrt{\sum u_i^2}$
				v_{eff}
				$t(v_{eff})$
				U_{cmc}
				$t(v_{eff}) \cdot u_{cmc}$

Tabla 3. Determinación de la CMC del laboratorio.

La resolución (“ideal”) es considerada en esta guía como la resolución de la mejor máquina que es posible calibrar sin que esta sea mejor que la resolución del patrón de calibración. La reproducibilidad es considerada como la mejor especificación de desviación estándar de la máquina o bien de la incertidumbre de medida de la máquina sin que esta sea menor que la incertidumbre de medida del patrón de calibración. Se sugiere que la incertidumbre de medida debido a la variabilidad del laboratorio sea estimada mediante un experimento (documentado) del laboratorio asociando los efectos de repetibilidad y reproducibilidad del personal del laboratorio. Una propuesta es como lo indica la norma NMX-CH-5725-2-IMNC-2006 [11]. Aquí $R&r$ es la contribución por variabilidad debido a estudios de repetibilidad y reproducibilidad del laboratorio.

En la tabla 4 se presenta un ejemplo de tabla CMC, para la cual es importante considerar las siguientes definiciones:

Máquina de medición de fuerza: Son aquellas que generan y miden la fuerza.

Instrumento de medición de fuerza: Son aquellos que sólo miden la fuerza y no la generan, estos instrumentos se puede acoplar al elemento a ensayar (probeta ó espécimen).

Transductor: Dispositivo capaz de transformar o convertir una señal de entrada (fuerza) en otra a la salida (mV/V, deformación, volumen de Hg, etc.) y no se acoplan directamente a la probeta.

I	II	III	IV	V		VI						VII		VIII	IX
Servicio de Calibración o Medición			Intervalo o punto de medida	Condiciones de funcionamiento de referencia		Incertidumbre expandida de medida						Patrón de referencia usado en la calibración		Participación en Ensayos de aptitud	Observaciones
Magnitud	Instrumento de medida	Método de medida		Parámetro	Especificaciones	Valor numérico de la unidad	unidad de medida	Contribución del laboratorio	Contribución del IBC	Factor de cobertura	¿Inc.relativa o absoluta?	Patrón de medida	Fuente de trazabilidad metrológica		
Fuerza	Máquina de medición de fuerza (tracción).	Comparación directa	10 kN a 100 kN	Temperatura	10 °C a 35 °C $\Delta t \leq 2 \text{ °C}$	0.15 a 0.63	%	0.15 a 0.60	0.05 a 0.20	2	relativa (lectura)	Celda de carga	Laboratorio de Metrología F-68	CNM-EA-XXX-2007	NMX-CH-7500-1-2008
Fuerza	Instrumentos de medición de fuerza (tracción).	Comparación directa	10 kN a 100 kN	Temperatura	10 °C a 35 °C $\Delta t \leq 2 \text{ °C}$	0.068 a 0.41	%	0.064 a 0.41	0.021 a 0.049	2	relativa (lectura)	Celda de carga	Metrología básica F-72		NMX-CH-7500-1-2008
Fuerza	Instrumentos de medición de fuerza en modo tracción (Dinamómetros*)	Comparación directa	10 kN a 100 kN	Temperatura	10 °C a 35 °C $\Delta t \leq 2 \text{ °C}$	0.068 a 0.41	%	0.064 a 0.41	0.021 a 0.049	2	relativa (lectura)	Celda de carga	Laboratorio de Metrología F-68		NMX-CH-7500-1-2008
Fuerza	Instrumentos de medición de fuerza en modo compresión (Dinamómetros*)	Comparación directa	10 kN a 100 kN	Temperatura	10 °C a 35 °C $\Delta t \leq 2 \text{ °C}$	0.048 a 0.23	%	0.047 a 0.23	0.008 a 0.048	2	relativa (lectura)	Celda de carga	Metrología básica F-72		NMX-CH-7500-1-2008
Fuerza	Instrumentos de medición de fuerza (tracción y compresión)	Comparación directa	0.4 kN a 5 kN	Temperatura	10 °C a 35 °C $\Delta t \leq 2 \text{ °C}$	0.068 a 0.41	%	0.064 a 0.41	0.021 a 0.049	2	relativa (lectura)	Masas Suspendidas (Juego de pesas "E ₂ " "F ₁ ")	Metas, S. A. de C. V. M-129		NMX-CH-7500-1-2008
Fuerza	Instrumentos de medición de fuerza (compresión)	Comparación directa	0.4 kN a 5 kN	Temperatura	10 °C a 35 °C $\Delta t \leq 2 \text{ °C}$	0.048 a 0.23	%	0.047 a 0.23	0.008 a 0.048	2	relativa (lectura)	Masas Suspendidas (Juego de pesas "E ₂ " "F ₁ ")	Metas, S. A. de C. V. M-129		NMX-CH-7500-1-2008

Tabla 4. Ejemplo de tabla CMC con incertidumbre de medida en alcances mínimo y máximo.

7.3 Incertidumbre de medida de una máquina de ensayo

La incertidumbre de medida estándar relativa combinada de la máquina de ensayo puede ser determinada mediante la siguiente expresión:

$$u_{cal_máq} = \sqrt{u_{cmc}^2 + u_c^2(\bar{F}) + u_{temp}^2} \quad (4)$$

Donde:

- u_{cmc} Incertidumbre estándar de la capacidad de medición del laboratorio
- $u_c(\bar{F})$ Incertidumbre relativa a la toma de lecturas de la máquina de fuerza
- u_{temp} Incertidumbre debido a la influencia de las condiciones ambientales como el efecto de la temperatura en el momento de la medición.

a) Incertidumbre de medida debido a la toma de lecturas de la máquina

De acuerdo a los parámetros descritos en la norma NMX-CH-7500-1-IMNC-2008 [5] para la calibración de máquinas de ensayo, la incertidumbre de medida del mejor valor de la indicación de la máquina puede ser determinada mediante la siguiente relación funcional:

$$\bar{F} = f(b', v, f_0, r) \quad (5)$$

Donde:

- b' es la reproducibilidad relativa de la máquina bajo calibración;
- v es el valor de histéresis relativa;
- f_0 es el error relativo de cero después de la descarga;
- r es la resolución relativa del sistema de indicación;

La incertidumbre de medida estándar combinada $u_c(\bar{F})$ asociada al valor promedio de medición de la máquina puede entonces obtenerse mediante la ley de propagación de incertidumbres de medida.

Fuente x_i	Valor de la Incertidumbre estándar u_{x_i}	Tipo	Coficiente de sensibilidad $\partial f / \partial x_i$	$\partial f / \partial x_i \cdot u_{x_i}$
Error de cero	$u_{cero} = \frac{f_0}{2 \cdot \sqrt{3}}$	B	1	u_{cero}
Resolución de la máquina	$u_{Res-máquina} = \frac{r}{2 \cdot \sqrt{3}}$	B	1	$u_{Res-máquina}$
Reproducibilidad de la máquina	$u_{Reprod-máquina} = \frac{b'}{2 \cdot \sqrt{3}}$	B	1	$u_{Reprod-máquina}$
Histéresis de la máquina	$u_{Hist-máquina} = \frac{v}{2 \cdot \sqrt{3}}$	B	1	$u_{Hist-máquina}$
			$u_c(F)$	$\sqrt{\sum u_i^2}$
			v_{eff}	$t_{(v_{eff})}$
			U_c	$t_{(v_{eff})} \cdot u_c(F)$

Tabla 5. Determinación de la incertidumbre de medida de la calibración de la máquina.

Es decir:

$$u_c^2(\bar{F}) = u^2(b) + u_c^2(v) + u^2(f_0) + u^2(r) \quad (6)$$

b) 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 °C a 40 °C , por lo que su contribución en la incertidumbre de medida podría considerarse como tipo B con una distribución rectangular. Su consideración se puede llevar a cabo mediante la siguiente relación:

$$u_{temp}^2 = \frac{(k \cdot \Delta t)^2}{12} \quad (7)$$

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 Δt . (Un valor típico adimensional para $k = 0.000\ 05\text{ °C}^{-1}$ acorde a EURAMET CG-04 V.01 [14], ó $k = 0.000\ 27\text{ °C}^{-1}$, acorde a ISO 376:2004 [13]).

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

$$D_t = D_c[1 + k(t_t - t_c)] \quad (8)$$

Donde:

D_c es la lectura de la deflexión corregida a la temperatura de calibración t_c en °C

D_t es la lectura de la deflexión a la temperatura de trabajo t_t en °C

$k = 0.000\ 27$ es el coeficiente de temperatura en $1/\text{°C}$, (ISO 376:2004 [13]).

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

c) Incertidumbre de medida debida a la aplicación de fuerza en la máquina

En caso que sea necesario, una contribución de incertidumbre de medida de la aplicación de la fuerza es conveniente y depende principalmente de los siguientes parámetros:

- Alineación de la máquina de ensayos y de accesorios de montaje.
- Generación de fuerza axial.
- Dureza, rugosidad y rectificado de las placas de carga.
- Deflexión de las placas de carga debido a la fuerza aplicada.

El laboratorio debería realizar una estimación debida a esta contribución.

7.4 Incertidumbre de medida expandida de la máquina de ensayos en una calibración

Para determinar e informar la incertidumbre de medida expandida U_E de la calibración de la máquina de ensayo se tiene:

$$U_E = k_{eff} \cdot \sqrt{u_{cal_maq}^2} \quad (9)$$

Donde:

k_{eff} es el factor de cobertura dependiendo los grados de libertad asociados.

Nota 5: La distribución del mensurando es siempre normal, salvo cuando se tiene una contribución dominante con distribución no-normal en cuyo caso no aplica la k_{eff} que se menciona y se tendría que determinar mediante otros métodos.

7.5 Informe de los resultados de la calibración

Los resultados, de la calibración de una máquina de ensayo, mínimos que se deben informar, son los que se presentan en la tabla 6. 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, SI [4].

Resultados usuales	De acuerdo con la Norma ISO
Tabla de lecturas del mensurando	Valor medio del mensurando de la máquina
Error de cero	Incertidumbre de medida expandida de la calibración de la máquina.
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 6. Resultados de la calibración de una máquina de ensayo.

8. VALIDACIÓN DE MÉTODOS DE MEDICIÓN

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

9. PRÁCTICAS DE MEDICIÓN

Para las buenas prácticas de calibración de máquinas y de instrumentos medidores de fuerza de compresión y/o tracción es recomendable que el laboratorio tenga en cuenta las siguientes consideraciones:

9.1 El patrón de trabajo debería:

- Tener el intervalo de medición, correcciones adecuadas e incertidumbre de medida suficiente para calibrar la máquina de acuerdo punto 4 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 [8]
- 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 metrológica al patrón nacional de fuerza, cumpliendo con el punto 6 de esta guía.

9.2 Las instalaciones deberían:

- Mantener una temperatura ambiente estable de acuerdo al nivel de incertidumbre de medida requerido y/o solicitado en la medición. La norma NMX-CH-7500-1-IMNC-2008 [5] para la calibración proporciona los límites de variación recomendados para la calibración.
- En caso de utilizar masas suspendidas (pesos muertos), mantener una humedad adecuada (que no exceda el 60%) de acuerdo al nivel de incertidumbre de medida 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 4.4 de esta guía.

9.3 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 de medida suficiente para calibrar la máquina de acuerdo al punto 3.2 de esta guía, y considerando el nivel de incertidumbre de medida requerido y/o solicitado.
- Estar en óptimas condiciones de funcionamiento, cumpliendo con sus programas de mantenimiento preventivo y en buen estado de funcionamiento.

9.4 Método y/o procedimiento de medición debería:

- Asegurar su trazabilidad metrológica al patrón nacional de fuerza aplicando el punto 6 de esta guía.
- Cumplir con los requisitos mínimos de esta guía mencionados en el punto 4.
- Estar documentado con suficiente detalle de acuerdo a los patrones, condiciones ambientales con que cuenta el laboratorio y al nivel de incertidumbre de medida solicitado.
- Ser revisado periódicamente.

9.5 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 3.2 o en caso contrario documentarlo.
- Evitar la aplicación de cargas que excedan su intervalo de medición.
- Cumplir con los pasos establecidos en el punto 4 de esta guía.

9.6 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 4.5 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.

9.7 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 metrológica de las mediciones y/o resultados del informe, al patrón nacional de fuerza cumpliendo con lo estipulado en el punto 6 de esta guía.
- Estimar la incertidumbre de medida del resultado de la medición de acuerdo con la recomendación estipulada en el punto 7 de esta guía.

10. REFERENCIAS

- [1] NMX-EC-17025-IMNC-2006 Requisitos generales para la competencia de los laboratorios de ensayo y calibración.
- [2] NMX-Z-055-IMNC-2009 Vocabulario Internacional de Metrología - Conceptos fundamentales y generales, términos asociados (VIM); equivalente al documento ISO/IEC GUIDE 99:2007 y a la tercera edición del VIM.
- [3] 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.
- [4] NOM- 008-SCFI-2002, Sistema General de Unidades de Medida.
- [5] 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.
- [6] ISO 7500-1:2004, Metallic materials - Verification of static uniaxial testing machines - Part 1: Tension/compression testing machines - Verification and calibration of the force -measuring system.
- [7] ISO 10012:2003, Measurement management systems - Requirements for measurement processes and measuring equipment.
- [8] MP-CA006, Trazabilidad de las Mediciones - Política de ema vigente.
- [9] MP-CA005, Incertidumbre de Mediciones - Política de ema vigente
- [10] MP-FE005, Criterios de Aplicación de la Norma NMX-EC-17025-IMNC-2006 / ISO/IEC 17025:2005 - Guía de ema vigente.
- [11] NMX-CH-5725-2-IMNC-2006, Exactitud (veracidad y precisión) de resultados y métodos de medición - Parte 2: Método básico para la determinación de la repetibilidad y la reproducibilidad de un método de medición normalizado.
- [12] 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
- [13] ISO 376:2004, Metallic materials - Calibration of force - proving instruments used for the verification of uniaxial testing machines.

- [14] EURAMET CG-04 V.01, Uncertainty of Force Measurements.
- [15] ILAC-G24, Guidelines for the determination of calibration intervals of measuring instruments, Edition 2007.

ANEXO I. EJEMPLO NUMÉRICO PARA LA ESTIMACIÓN DE INCERTIDUMBRE EN LA CALIBRACIÓN DE MÁQUINAS DE FUERZA EN MODO COMPRESIÓN Y/O TRACCIÓN

Supongamos que hemos calibrado una máquina con las siguientes características y resultados:

Resolución de la máquina:	0.02 kN = 20 N
Fuerza aplicada:	60.017 kN
Lecturas tomadas en la máquina:	59.76 kN 59.80 kN 59.74 kN
Lecturas al retirar las cargas E_0 :	0.00 kN 0.02 kN 0.04 kN
Incertidumbre del patrón reportada en su informe de calibración para 60 kN $U_{C60} = \pm 0.19 \% \text{ con } k=2$	

A continuación se presentan los cálculos necesarios para la estimación de la incertidumbre considerando cada uno de los factores de influencia:

a) Promedio de las mediciones realizadas:

$$Promedio = \frac{59.79 + 59.80 + 59.74}{3} = 59.767 \text{ kN} = \mathbf{59\ 767\ N}$$

b) Error de medida

$$q = Promedio - Fuerza aplicada = 59.767 - 60.017 = -0.25 \text{ kN} = \mathbf{-250\ N}$$

c) Error porcentual

$$q(\%) = \frac{q}{Fuerza aplicada} \times 100 = \frac{-0.25}{60.017} \times 100 = \mathbf{-0.417\ \%}$$

d) Repetibilidad:

$$b = \text{Máximo valor leído} - \text{Mínimo valor leído} = 59.80 - 59.74 = 0.06 \text{ kN} = \mathbf{60\ N}$$

e) Repetibilidad porcentual

$$b(\%) = \frac{b}{Promedio} \times 100 = \frac{0.06}{59.767} \times 100 = \mathbf{0.100\ 38\ \%}$$

f) Desviación estándar de las lecturas

$$s = \sqrt{\frac{\sum(x - \bar{x})^2}{n - 1}} = \sqrt{\frac{(59.76 - 59.767)^2 + (59.80 - 59.767)^2 + (59.74 - 59.767)^2}{2}}$$

$$s = \sqrt{0.000\ 933\ 5} = \pm 0.030\ 553\ 2 \text{ kN} = \mathbf{\pm 30.553\ N}$$

g) Incertidumbre por repetibilidad u_R

$$u_R = \frac{s}{\sqrt{n}} = \frac{30.553}{\sqrt{3}} = \pm 17.634 \text{ N}$$

h) Incertidumbre por repetibilidad al cuadrado u_R^2

$$u_R^2 = 17.634^2 = 311.162 \text{ N}^2$$

i) Incertidumbre por resolución u_r

$$u_r = \frac{r}{2 \cdot \sqrt{3}} = \frac{20}{3.464} = \pm 5.774 \text{ N}$$

Donde:

r es la resolución del IBC.

Resolución: Mínima variación de la magnitud medida que da lugar a una variación perceptible de la indicación correspondiente. [2]

j) Incertidumbre por resolución al cuadrado u_r^2

$$u_r^2 = \frac{r^2}{12} = \frac{400}{12} = 33.33 \text{ N}^2$$

k) Incertidumbre por error de cero u_0

$$u_0 = \frac{MAXE_0}{2 \cdot \sqrt{3}} = \frac{40}{3.464} = \pm 11.547 \text{ N}$$

Donde:

$MAXE_0$ es la máxima lectura al retirar las cargas.

l) Incertidumbre por error de cero al cuadrado u_0^2

$$u_0^2 = 11.547^2 = 133.333 \text{ N}^2$$

m) Incertidumbre por el patrón usado u_P

Se toma del informe de calibración, convirtiéndola a N^2

$$u_P^2 = \left(\frac{UC * Fuerza aplicada}{2 * 100} \right)^2 = \left(\frac{0.19 * 60\,000}{2 * 100} \right)^2 = 3\,249 \text{ N}^2$$

En la incertidumbre del patrón, pudieran considerarse otras fuentes de incertidumbre, (como deriva, corrección por temperatura) y no solo el informe de calibración.

De la misma forma se calculan las incertidumbres al cuadrado de todas las fuentes que afecten la calibración: $u_R^2, u_r^2, u_0^2, etc.$

n) Incertidumbre combinada

$$u_c^2 = u_R^2 + u_r^2 + u_0^2 + u_p^2 + \dots + u_n^2 \approx 3\,726.825\, \text{N}^2$$

$$u_c = \sqrt{u_c^2} = \sqrt{3\,726.825} = \pm 61.048\, \text{N}$$

o) Incertidumbre expandida

$$U = u_c * k = 61.048 * 2 = \pm 122.095\, \text{N}$$

Con un factor de cobertura $k = 2$.

p) Incertidumbre expandida porcentual

$$U(\%) = \left(\frac{U}{\text{Fuerza aplicada}} \right) \times 100 = \left(\frac{122.095}{60\,017} \right) \times 100 = \pm 0.20\, \%$$

En el caso de que el patrón no se rote, la incertidumbre tipo A se denominará Repetibilidad, en caso de rotación, se denominará Reproducibilidad.