

Incertidumbre en Mediciones de Fuerza

EURAMET/cg-04/v.01

Previamente EA-10/04

1ª edición digital de la traducción al español

Marzo 2010.

Calibration Guide

Guía de Calibración EURAMET/cg-04/v.01



INCERTIDUMBRE EN LAS MEDICIONES DE FUERZA

Marzo 2010

Propósito

La presente guía tiene por objeto mejorar la armonización en la determinación de las incertidumbres en las mediciones de fuerza. En ella se incluye información acerca de las capacidades de medición adquiridas mediante máquinas de calibración de fuerza; también proporciona directrices para los laboratorios de calibración sobre el modo de establecer un procedimiento para la expresión de la incertidumbre global en los resultados de calibración de transductores de fuerza para calibraciones realizadas según la Norma ISO 376 y otros procedimientos. También proporciona directrices sobre la estimación de la incertidumbre asociada a las mediciones de fuerza realizadas posteriormente con estos transductores, ya sea durante la calibración de máquinas de ensayo de materiales o en otras aplicaciones industriales de mediciones de fuerza.

Edición digital 1 de la Traducción al español de:
"Calibration Guide EURAMET/cg-04/v.01: Uncertainty of Force Measurements"



Traducción

Titulo original: "Calibration Guide EURAMET/cg-04/v.01: Uncertainty of Force Measurements"

Traductor: Dña. Anne Karbe

La traducción ha sido adaptada y corregida por el Centro Español de Metrología (CEM), C/ Del Alfar, 2 Tres Cantos, 28760 – Madrid. España

Autor

El documento original (EAL-G22, que más tarde se denominó EA-10/04) fue elaborado por el Comité 2 de EAL (Actividades de Calibración y Ensayo) a partir del borrador redactado por el Grupo de Expertos sobre Mediciones Mecánicas de EAL. El documento fue corregido y se volvió a publicar por el Comité Técnico de Masa y Magnitudes Relacionadas de EURAMET (TC-M).

Idioma oficial

La versión en inglés de esta publicación es la versión definitiva. La Secretaría de EURAMET puede autorizar la traducción de este documento a otros idiomas, en función de ciertas condiciones establecidas en la solicitud.

Derechos de autor

© EURAMET e.V. 2010 tiene todos los derechos de reproducción de este texto. La versión anterior fue originalmente publicada por EA como Guía EA-10/04. El texto no puede ser copiado con fines de lucro.

El permiso para la presente traducción al español se ha obtenido a través de la Secretaría de Euramet.

Orientación de la publicación

Este documento presenta las prácticas usuales de aplicación de las cláusulas relevantes de las normas de acreditación en el campo objeto de este documento. Los enfoques adoptados no son obligatorios, tienen carácter orientativo para los laboratorios de calibración. El documento ha sido concebido como medio para promover un enfoque consistente para la acreditación de laboratorios.

No se garantiza que este documento o la información que contiene sean apropiados para cualquier aplicación particular. En ningún caso EURAMET e.V., los autores, ni ninguna otra persona involucrada en la producción de este documento, serán responsables de ningún daño, sin limitación, incluyendo daños por pérdidas de beneficios comerciales, interrupciones comerciales, pérdida de información comercial o cualquier otra pérdida económica provocada por el uso de la información de este documento.

Información adicional

Para obtener más información sobre esta publicación, póngase en contacto con su representante nacional en el Comité Técnico para Masa y Magnitudes Relacionadas de EURAMET (véase www.euramet.org/index.php?id=tc-m).

NIPO: 706-10-010-7

INCERTIDUMBRE EN LAS MEDICIONES DE FUERZA

Marzo 2010

Índice

1	Introducción	1
2	Alcance	1
3	Símbolos y abreviaturas	2
4	Máquina patrón nacional de fuerza	4
4.1	Máquinas patrón de fuerza de carga directa	4
4.2	Máquinas patrón de fuerza de amplificación hidráulica.....	5
4.3	Máquinas patrón de fuerza de amplificación por palanca.....	5
4.4	Máquinas patrón de fuerza con sistemas de múltiples transductores	6
5	Máquinas de calibración de fuerza	6
5.1	Tipos de máquinas de calibración de fuerza.....	6
5.2	Determinación de la CMC de la máquina	7
6	Transductores de fuerza	11
6.1	Determinación de la incertidumbre de calibración según la Norma ISO 376	11
6.2	Determinación de la incertidumbre según otros procedimientos de calibración.....	15
7	Mediciones industriales de fuerza.....	16
7.1	Contribuciones a la incertidumbre que deben ser consideradas	16
7.2	Calibración de máquinas de ensayo de acuerdo con la Norma ISO 7500-1	18
7.3	Otras aplicaciones industriales de medición de fuerza.....	19
8	Referencias y lecturas adicionales	19
8.1	Referencias	19
8.2	Lecturas adicionales	20

INCERTIDUMBRE EN LAS MEDICIONES DE FUERZA

1 Introducción

En una amplia gama de aplicaciones industriales es necesario medir fuerzas de tensión o compresión. Estas aplicaciones van desde ensayos de materiales al pesaje industrial, así como desde la medición de empuje de motores a las cargas de prueba de apoyos en puentes. En cada aplicación habrá un requisito de incertidumbre determinado para la medición de fuerza. El equipo utilizado en la medición debe ser trazable a la realización de la unidad SI de fuerza (el newton) dentro de la incertidumbre requerida.

La situación puede variar de un país a otro. Este documento ha sido elaborado en un país con un Instituto Nacional de Metrología (INM) donde se realiza el newton en sus máquinas patrón nacional de fuerza y con unos laboratorios de calibración que, generalmente acreditados por su organismo nacional de acreditación, utilizan máquinas de calibración de fuerza para calibrar los instrumentos de medida de fuerza. Estos instrumentos pueden utilizarse para medir fuerzas directamente o bien para calibrar equipos industriales de generación de fuerza como las máquinas de ensayo de tracción.

Las máquinas de calibración de fuerza serán, por lo general, trazables a las máquinas patrón nacional de fuerza a través de comparaciones usando transductores de fuerza de precisión. La Capacidad de Medida y Calibración (CMC) acreditada del laboratorio de calibración está basada en los resultados de estas comparaciones.

Por lo general, la calibración de instrumentos de medida de fuerza en las máquinas de calibración de fuerza se realizará de acuerdo con un procedimiento documentado, como la Norma ISO 376 [1]. Además la incertidumbre de los resultados de calibración dependerá tanto de la CMC de la máquina como del funcionamiento del instrumento durante la calibración.

Del mismo modo, la incertidumbre de la calibración del equipo industrial de generación de fuerza dependerá, en parte, de la incertidumbre procedente del instrumento de medida de fuerza. Además, la incertidumbre de cualquier medición de fuerza posterior dependerá en cierto modo de la incertidumbre asociada al equipo de generación de fuerza.

Se puede observar que la incertidumbre de la medida final de fuerza depende de todas las etapas anteriores de trazabilidad; por ello, este documento tiene como objetivo ser una guía en la estimación de todas estas contribuciones.

La situación de trazabilidad señalada anteriormente sólo cubre la medición de fuerza en estático, mientras que un número considerable de aplicaciones industriales de medición de fuerza, como ensayos de fatiga e impacto, son dinámicos. Cuando se trata de una de estas áreas de medición deben hacerse consideraciones adicionales para la evaluación de la incertidumbre.

2 Alcance

El alcance de este documento consiste en proporcionar directrices sobre la estimación de la incertidumbre de medida de fuerza dentro de distintas áreas, a saber:

- incertidumbre de fuerzas generadas por máquinas patrón nacional de fuerza;
- incertidumbre de fuerzas generadas por máquinas de calibración de fuerza (es decir, la determinación de la CMC);

- incertidumbre de fuerzas medidas por instrumentos de medida de fuerza;
- incertidumbre de fuerzas generadas por equipos industriales de generación de fuerza.

En cada uno de estos casos, la determinación de la incertidumbre está basada en dos componentes principales: la incertidumbre obtenida durante la calibración del equipo y la incertidumbre que resulta del uso posterior del equipo.

Además, en este documento se discuten brevemente otras contribuciones de incertidumbre a considerar en aplicaciones de medida de fuerza en dinámico.

3 Símbolos y abreviaturas

Símbolo	Descripción	Unidad
a_{drift}	semiamplitud de la variación relativa debida a la deriva	-
b'	error relativo de repetibilidad, según la Norma ISO 376	%
c	error relativo de fluencia (<i>creep</i>)	%
d	orden de la función	-
f_0	error relativo de cero, según la Norma ISO 376	%
F	fuerza	N
F_{min}	fuerza mínima de calibración	N
F_{nfsm}	fuerza generada por la máquina patrón nacional de fuerza	N
g	aceleración debida a la gravedad	$\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$
i_{30}	señal de salida, 30 s después de la aplicación o supresión de la fuerza máxima de calibración	$\text{mV}\cdot\text{V}^{-1}$
i_{300}	señal de salida, 300 s después de la aplicación o supresión de la fuerza máxima de calibración	$\text{mV}\cdot\text{V}^{-1}$
i_f	lectura final del indicador (después de la aplicación de la fuerza)	$\text{mV}\cdot\text{V}^{-1}$
i_0	lectura inicial del indicador (antes de la aplicación de la fuerza)	$\text{mV}\cdot\text{V}^{-1}$
k	factor de cobertura	-
K	coeficiente de temperatura del instrumento de fuerza	$^{\circ}\text{C}^{-1}$
K_{ts}	coeficiente de calibración del patrón de transferencia	$\text{N}\cdot(\text{mV}\cdot\text{V}^{-1})^{-1}$
m	masa	kg
r	resolución	N
w_{approx}	incertidumbre típica relativa debida a la aproximación de la función de interpolación	-
w_c	incertidumbre típica relativa combinada	-
w_{cal}	incertidumbre típica relativa debida a la calibración del patrón de transferencia	-
w_{corr}	incertidumbre típica relativa asociada al valor de corrección	-
$w(D)$	incertidumbre típica relativa debida a la deriva	-
$w(d_{\text{fcm}})$	incertidumbre típica relativa asociada a la generación de fuerza en la máquina de calibración de fuerza	-
w_{drift}	incertidumbre típica relativa debida a la deriva del patrón de transferencia	-
$w(F_{\text{nfsm}})$	incertidumbre típica relativa de la fuerza generada por la máquina patrón nacional de fuerza	-
w_i	incertidumbre típica relativa asociada al parámetro i	-
$w(K_{\text{ts}})$	incertidumbre típica relativa del valor de fuerza indicado por el patrón de transferencia	-

W_{ref_instab}	incertidumbre típica relativa de la inestabilidad a largo plazo del transductor de fuerza de referencia	-
W_{ref_tra}	incertidumbre típica relativa de la calibración del transductor de fuerza de referencia	-
W_{rep}	incertidumbre típica relativa debida a la repetibilidad	-
W_{res}	incertidumbre típica relativa debida a la resolución	-
W_{rev}	incertidumbre típica relativa debida a la reversibilidad	-
W_{rv}	incertidumbre típica relativa del valor de referencia	-
W_{std}	incertidumbre típica relativa debida al patrón de transferencia	-
W_{temp}	incertidumbre típica relativa debida a efectos de la temperatura	-
$u(X)$	incertidumbre típica relativa de la deformación media	-
W	incertidumbre relativa expandida	-
W_{CMC}	incertidumbre relativa expandida de la fuerza generada por la máquina de calibración de fuerza, equivalente a la CMC (Capacidad de Medida y Calibración)	-
W_{nfsm}	incertidumbre relativa expandida de la fuerza generada por la máquina patrón nacional de fuerza	-
W_{ref_instab}	incertidumbre relativa expandida de la inestabilidad a largo plazo del transductor de referencia de fuerza	-
W_{ref_tra}	incertidumbre relativa expandida de la calibración del transductor de referencia de fuerza	-
W_{rv}	incertidumbre relativa expandida del valor de referencia	-
W_{ts}	incertidumbre relativa expandida del valor de fuerza indicado por el patrón de transferencia	-
X	deformación media	$mV \cdot V^{-1}$
X_{fcm}	deformación media en la máquina de calibración de fuerza	$mV \cdot V^{-1}$
X_{fcm_i}	deformación individual en la máquina de calibración de fuerza	$mV \cdot V^{-1}$
X_i	valor de deformación individual en la serie i	$mV \cdot V^{-1}$
X_N	deformación en la fuerza máxima de calibración	$mV \cdot V^{-1}$
\bar{X}_r	deformación media según la Norma ISO 376 en las series 1, 3 y 5	$mV \cdot V^{-1}$
δ_r	suma cuadrática de las desviaciones entre la deformación media y el valor calculado	$(mV \cdot V^{-1})^2$
Δd_d	desviación relativa decreciente entre el valor de referencia y el valor obtenido en la máquina de calibración de fuerza	-
Δd_i	desviación relativa creciente entre el valor de referencia y el valor obtenido en la máquina de calibración de fuerza	-
Δd_{max}	valor absoluto de la desviación relativa máxima entre el valor de referencia y el valor obtenido en la máquina de calibración de fuerza	-
ΔT	intervalo de temperatura durante la calibración	$^{\circ}C$
ρ_a	densidad del aire	$kg \cdot m^{-3}$
ρ_m	densidad de la carga	$kg \cdot m^{-3}$
σ_F	desviación típica de fuerza	N
σ_g	desviación típica de la aceleración debida a la gravedad	$m \cdot s^{-2}$
σ_m	desviación típica de la masa de la carga	kg
$\sigma_{\rho a}$	desviación típica de la densidad del aire	$kg \cdot m^{-3}$
$\sigma_{\rho m}$	desviación típica de la densidad de la carga	$kg \cdot m^{-3}$

4 Máquina patrón nacional de fuerza

Las máquinas patrón nacional de fuerza se pueden dividir en dos categorías: la primera, donde la fuerza generada es trazable a otras máquinas de fuerza mediante patrones de transferencia y la segunda, donde se calcula la fuerza generada a partir de un modelo matemático del sistema de generación de fuerza. En la primera categoría, la incertidumbre de la fuerza se puede calcular siguiendo las directrices dadas en el apartado "5 Máquinas de calibración de fuerza". Este apartado sólo trata la segunda categoría que incluye, entre otras, las siguientes máquinas:

- carga directa (pesos muertos);
- amplificación hidráulica;
- amplificación por palanca;
- sistema de múltiples transductores.

4.1 Máquinas patrón de fuerza de carga directa

La fuerza vertical neta hacia abajo (F_f en N) generada por una carga (de masa m_f en kg, y densidad ρ_m , en $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$) suspendida en aire (de densidad ρ_a , en $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$) en el campo gravitatorio terrestre (de intensidad g , en $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$) viene dada de la siguiente forma:

$$F = mg(1 - \rho_a/\rho_m). \quad (1)$$

Las incertidumbres en las cuatro variables del lado derecho de esta ecuación se pueden combinar para determinar la incertidumbre en el valor de fuerza calculado (donde σ_x es la desviación típica asociada a la variable x):

$$(\sigma_{F/F})^2 = (\sigma_{m/m})^2 + (\sigma_{g/g})^2 + (\rho_a/\rho_m)^2 \times ((\sigma_{\rho_m/\rho_m})^2 + (\sigma_{\rho_a/\rho_a})^2). \quad (2)$$

La incertidumbre asociada a cada una de las variables debe tener en cuenta su variación en el tiempo. La densidad del aire y la aceleración gravitacional cambiarán repentinamente de un día para otro, mientras que el valor de masa puede verse sujeto a la deriva a largo plazo provocada por el desgaste, la contaminación y la estabilidad de la superficie.

Si se desconoce el valor verdadero de la masa de la carga, pero no su valor de masa convencional m_c (es decir, la masa de una carga de densidad igual a $8\,000\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ que se equilibrará en el aire con densidad igual a $1,2\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$), en donde la masa convencional normalmente es el valor dado en un certificado de calibración de masa, estas dos ecuaciones se corrigen de la siguiente forma:

$$F = m_c g(1 - (1,2/8\,000) + ((1,2 - \rho_a)/\rho_m)) \quad (3)$$

y

$$(\sigma_{F/F})^2 = (\sigma_{m_c/m_c})^2 + (\sigma_{g/g})^2 + ((1,2 - \rho_a)/\rho_m)^2 \times ((\sigma_{\rho_m/\rho_m})^2 + (\sigma_{\rho_a/(1,2 - \rho_a)})^2) \quad (4)$$

El balance de incertidumbre para la máquina también debe considerar otras contribuciones a la generación de fuerza aparte de la gravedad y el empuje de aire, como efectos magnéticos, electroestáticos y aerodinámicos.

En máquinas en las que la fuerza aplicada no es sólo una carga directa pura —donde, por ejemplo, el peso del bastidor de carga está tarado por una palanca y un contrapeso, o la estructura portacargas está estabilizada con un sistema guía— el efecto de cualquier fuerza de fricción o fuerza desequilibrada debe incorporarse adicionalmente dentro del balance de incertidumbre, en cada fuerza dentro del rango de la máquina.

La capacidad de la máquina para mantener el transductor de fuerza en correcta alineación —es decir, con su eje de medición vertical y concéntrico a la fuerza aplicada— en cada fuerza aplicada, tendrá un efecto en la magnitud del vector de fuerza aplicado al eje de medición del transductor. Todo ello también debe incluirse en el balance de incertidumbre. Otras características de máquinas específicas, como la rigidez a la compresión de los montantes y la generación de fuerzas horizontales, también pueden influir en la señal de la salida del transductor (en función de la sensibilidad del transductor a este tipo de efectos) pero no contribuyen a la incertidumbre de la fuerza aplicada en el eje de medición del transductor. Todo ello constituye la incertidumbre a la que se refiere el valor de CMC de un INM.

La incertidumbre de medida asociada a las escalas de fuerza realizadas en los INM se garantiza mediante intercomparaciones internacionales. Varios INM declaran un valor para la incertidumbre relativa expandida de medida, con la que máquinas patrón de fuerza de carga directa pueden generar valores de fuerza, tan bajos como 1×10^{-5} . Sin embargo, en la práctica, cuando se utilizan diferentes máquinas patrón de fuerza de carga directa para calibrar el mismo transductor de fuerza, las diferencias entre los resultados son a veces considerablemente mayores por efectos mecánicos de interacción. Todo ello se demostró en las comparaciones entre laboratorios del BCR y la WECC basadas en las calibraciones de transductores de fuerza que tuvieron lugar en 1987 y 1991 respectivamente [2, 3].

4.2 Máquinas patrón de fuerza de amplificación hidráulica

En una máquina de amplificación hidráulica, el uso de un sistema hidráulico con conjuntos pistón-cilindro de diferentes áreas efectivas amplifica una fuerza de carga directa, aumentándola mediante un factor aproximadamente igual a la razón de las dos áreas. Como la trazabilidad de esta fuerza amplificada deriva directamente de las unidades del SI, las contribuciones a la incertidumbre que deben considerarse incluirán, entre otros, los siguientes puntos:

- incertidumbre de la fuerza de carga directa (véase "4.1 Máquinas patrón de fuerza de carga directa" para obtener más detalles);
- incertidumbre de mediciones dimensionales de ambos conjuntos pistón-cilindro;
- incertidumbre debida a diferencias de presión en todo el circuito hidráulico, causadas por el flujo del fluido hidráulico y la altura vertical;
- incertidumbre debida al efecto de temperatura en el cociente de áreas (expansión térmica de los conjuntos pistón-cilindro, posiblemente con diferentes relaciones) y caídas de presión (dependencia con la temperatura de la viscosidad del fluido hidráulico);
- incertidumbre debida al efecto de presión en el cociente de áreas (distorsión elástica de los conjuntos pistón-cilindro);
- incertidumbre debida a la inestabilidad del sistema de control;
- incertidumbre debida a fricción/histéresis dentro de los conjuntos pistón-cilindro o sistemas guía mecánicos;
- incertidumbre asociada al ajuste inicial de fuerza cero.

Cuando sea posible, se deben realizar las correspondientes correcciones para el efecto estimado de cualquiera de estas componentes en la magnitud de la fuerza generada. Las incertidumbres típicas asociadas a estas correcciones, junto con las incertidumbres típicas debidas a cualquier efecto que no se pueda corregir, debe combinarse cuadráticamente (si se puede demostrar que los efectos no están correlacionados) y posteriormente multiplicarse por un factor de cobertura para obtener una incertidumbre expandida para la fuerza generada.

4.3 Máquinas patrón de fuerza de amplificación por palanca

En una máquina de amplificación por palanca, una fuerza producida por carga directa se amplifica utilizando uno o más sistemas mecánicos de palancas, aumentando la fuerza a través de un factor aproximadamente igual a la relación de las longitudes de los brazos de palanca. Como la trazabilidad de esta fuerza amplificada deriva directamente de las unidades del SI, las contribuciones de incertidumbre que se deben considerar incluirán, entre otras, las siguientes incertidumbres:

- incertidumbre de la fuerza de carga directa (véase "4.1 Máquinas patrón de fuerza de carga directa" para obtener más detalles);
- incertidumbre de mediciones dimensionales del sistema de palanca;
- incertidumbre por fricción dentro de los sistemas de palanca;
- incertidumbre debida al efecto de temperatura en la relación del brazo de palanca (expansión térmica de los sistemas de palanca, posiblemente con diferentes relaciones);
- incertidumbre debida al efecto de la magnitud fuerza aplicada en la relación del brazo de palanca (distorsión elástica de los sistemas de palanca);
- incertidumbre debida a la inestabilidad del sistema de control;
- incertidumbre debida al alineamiento de fuerza generada respecto al eje de medición del transductor;
- incertidumbre debida a la reproducibilidad posicional de partes móviles;

- incertidumbre debida al desgaste/estabilidad de las cuchillas, si existen.

Cuando sea posible, se deben realizar correcciones para el efecto estimado de cualquiera de estas componentes en la magnitud de la fuerza generada. Las incertidumbres típicas asociadas a estas correcciones junto a las incertidumbres típicas debidas a otros efectos que no se puedan corregir, deben combinarse cuadráticamente (si se puede demostrar que los efectos no están correlacionados) y posteriormente multiplicarse por un factor de cobertura para obtener una incertidumbre expandida para la fuerza generada.

4.4 Máquinas patrón de fuerza con sistemas de múltiples transductores

Estas máquinas están basadas en un conjunto de transductores de fuerza cargados en paralelo y calibrados individualmente en máquinas patrón de fuerza. La fuerza generada se calcula como la suma de las fuerzas que miden los transductores individuales. Para este tipo de máquina, las contribuciones de incertidumbre que se deben considerar incluirán, entre otras, las siguientes incertidumbres:

- incertidumbre de las calibraciones de los transductores individuales (véase el apartado 6);
- incertidumbre debida al uso de los transductores posteriormente a su calibración (véase el apartado 7.1);
- incertidumbre debida al alineamiento de transductores respecto al eje de medición del transductor bajo calibración;
- incertidumbre debida a la estabilidad/funcionamiento del sistema de control y la metodología de adquisición de datos.

Cuando sea posible, se deben llevar a cabo las correspondientes correcciones para el efecto estimado de cualquiera de estas componentes sobre la magnitud de la fuerza generada. Las incertidumbres típicas asociadas a estas correcciones, junto con las incertidumbres típicas debidas a cualquier efecto que no se pueda corregir, deben combinarse cuadráticamente (si se puede demostrar que los efectos no están correlacionados) y posteriormente multiplicarse por un factor de cobertura para obtener una incertidumbre expandida para la fuerza generada.

5 Máquinas de calibración de fuerza

5.1 Tipos de máquinas de calibración de fuerza

Las CMC alcanzadas por las máquinas de calibración de fuerza dependen del tipo de generación de fuerza (la tabla 5.1 muestra los valores típicos para diferentes tipos de máquinas). La incertidumbre con la que las máquinas de calibración de fuerza de carga directa realizan valores de fuerzas se pueden calcular de forma similar a la de una máquina patrón nacional de fuerza y puede ser menor de 5×10^{-5} . Sin embargo, si se requiere trazabilidad a las máquinas patrón nacional de fuerza o si la CMC declarada se debe validar mediante una comparación con una máquina patrón nacional de fuerza, la demostración de una CMC más pequeña que 5×10^{-5} será técnicamente inviable o simplemente demasiado costosa. En la mayoría de los casos, las necesidades de un laboratorio de calibración se satisfacen si se consigue una CMC de 1×10^{-4} . Ello le permite al laboratorio de calibración calibrar dispositivos de medida de fuerza para la mejor clasificación especificada en la Norma ISO 376.

En máquinas hidráulicas y máquinas de amplificación por palanca, los valores más pequeños para la CMC sólo pueden lograrse mediante la corrección de cualquier componente sistemática del efecto de amplificación. Para la determinación de la CMC de la máquina de calibración de fuerza tipo comparador, los transductores de fuerza de referencia incorporados en la máquina deben, si es posible, ser calibrados primero en una máquina patrón de fuerza para determinar las características metrológicas relevantes. La calibración de la máquina de calibración de fuerza debe entonces llevarse a cabo utilizando patrones de fuerza de transferencia.

Tabla 5.1: CMC típicas de máquinas de calibración de fuerza

Tipo de máquina	Rango típico de las CMC (incertidumbre relativa expandida)
Carga directa	5×10^{-5} a 1×10^{-4}
Amplificación hidráulica	1×10^{-4} a 5×10^{-4}
Amplificación por palanca	1×10^{-4} a 5×10^{-4}
Comparador con uno o tres transductores de fuerza de referencia	5×10^{-4} a 5×10^{-3}

Es evidente que hay dos rutas de trazabilidad distintas para las fuerzas generadas por la máquina de calibración de fuerza y el método para la evaluación de las incertidumbres asociadas, y las CMC dependen del método elegido:

Trazabilidad por la ruta A: La máquina de calibración de fuerza obtiene su trazabilidad directamente de patrones de transferencia calibrados en máquinas patrón nacional de fuerza.

En el apartado 5.2 se describe el método recomendado para determinar las CMC para máquinas con esta ruta de trazabilidad.

Trazabilidad por la ruta B: La máquina de calibración de fuerza tiene trazabilidad independiente a las unidades básicas SI de masa, longitud y tiempo.

La trazabilidad se obtiene de mediciones de masa, gravedad, longitud de palanca, áreas de pistón, etc. y la incertidumbre asociada a la fuerza generada (y las CMC declaradas por el laboratorio) se calcula, como para las máquinas patrón nacional de fuerza, de las incertidumbres asociadas a estas mediciones, junto con las otras contribuciones detalladas en el apartado 4. También es necesario realizar comparaciones entre la máquina de calibración de fuerza y una máquina patrón nacional de fuerza apropiada, usando patrones de transferencia de alta calidad. El procedimiento para este trabajo puede ser como el descrito en el apartado 5.2, pero se deben analizar los resultados de una manera diferente, ya que es más un ejercicio de comparación que una calibración. El análisis debe mostrar si los resultados de las dos máquinas son compatibles metrológicamente. En la referencia [4] se describe un método de evaluación e incluye determinar si los valores E_n calculados dentro de todo el rango de fuerza aplicada exceden o no la unidad. Si estos valores exceden la unidad, no es suficiente aumentar la CMC para reducir el valor E_n a un nivel aceptable, sino que el balance completo de incertidumbre asociado a la máquina de calibración de fuerza (y con el procedimiento de comparación) debe ser revisado para satisfacer al organismo nacional de acreditación.

5.2 Determinación de la CMC de la máquina

Para determinar la CMC de la máquina, se debería aplicar el siguiente plan de medición:

- Selección de varios transductores de fuerza como patrones de transferencia para cubrir el rango completo de fuerza de la máquina de calibración de fuerza. Para minimizar la influencia de cualquier efecto de interacción, el rango de trabajo de cada patrón de transferencia no debe comenzar por debajo del 40 % de su alcance máximo. Esto normalmente requiere el uso de entre tres y cinco patrones de transferencia siendo también necesarios distintos transductores de transferencia para tracción y compresión. Se supone que se utilizará una instrumentación de alta calidad con los patrones de transferencia, con una resolución mejor de 1 parte en 200 000 en cada fuerza de calibración, si es el caso podría no ser necesario incluir una componente debida a la resolución en los cálculos de incertidumbre (ésta es la suposición hecha en el siguiente análisis). Si el tamaño de la resolución es significativo respecto a la incertidumbre de la fuerza aplicada o a la repetibilidad de los resultados, se debe incluir una componente de incertidumbre de resolución.
- Calibración de estos patrones de transferencia en una máquina patrón nacional de fuerza. Las mediciones deben llevarse a cabo por lo menos en tres posiciones de rotación y deben incluir mediciones de histéresis. Para determinar la repetibilidad, las mediciones se deben repetir una vez por lo menos en una de la posiciones de rotación.
- Calibración de los patrones de transferencia en la máquina de calibración de fuerza. El procedimiento de medida será similar a la calibración de patrones de transferencia en la máquina patrón nacional de fuerza.
- Recalibración de los patrones de transferencia en la máquina patrón nacional de fuerza para determinar los valores globales de referencia y la magnitud de cualquier deriva durante todo el ejercicio.
- Determinación de la desviación relativa entre el valor de referencia y el valor obtenido en la máquina de calibración de fuerza para cada patrón de transferencia en cada valor nominal de fuerza.

La CMC de la máquina se puede ahora determinar en un proceso de 5 pasos:

- Paso 1 – Determinación de la incertidumbre de la fuerza generada por la máquina patrón nacional de fuerza.
- Paso 2 – Determinación de la incertidumbre de calibración del patrón de transferencia en la máquina patrón nacional de fuerza.
- Paso 3 - Determinación de la incertidumbre del valor de referencia del patrón de transferencia.
- Paso 4 - Determinación de la incertidumbre de la generación de fuerza en la máquina de calibración.
- Paso 5 - Determinación de la CMC de la máquina de calibración.

Paso 1 – Determinación de la incertidumbre de la fuerza generada por la máquina patrón nacional de fuerza

La incertidumbre relativa expandida, W_{nfsm} , con la que la unidad de fuerza se realiza por una máquina patrón nacional típica de fuerza, se calcula siguiendo las directrices del apartado 4 (en la tabla 5.2 se presentan valores típicos).

Paso 2 – Determinación de la incertidumbre de calibración del patrón de transferencia en la máquina patrón nacional de fuerza

La magnitud que se determina en la calibración de un transductor de fuerza usado como patrón de transferencia para los escalones elegidos de fuerza es su coeficiente de calibración K_{ts} , que es el cociente entre la fuerza aplicada F_{nfsm} y la deformación X indicada por el transductor de fuerza:

$$K_{\text{ts}} = \frac{F_{\text{nfsm}}}{X}. \quad (5)$$

Para eliminar la influencia del efecto de rotación, la deformación X es el valor medio de n posiciones de rotación del transductor uniformemente espaciadas alrededor de su eje:

$$X = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i \quad (6)$$

donde X_i son las deformaciones indicadas por el transductor de fuerza en las diferentes posiciones de rotación.

La varianza relativa de la deformación media es:

$$w^2(X) = \frac{1}{n(n-1)} \times \sum_{i=1}^n ((X_i - X)/X)^2. \quad (7)$$

Como alternativa, si el número de posiciones de rotación es suficientemente alto ($n > 3$) y las posiciones están en orientaciones igualmente distribuidas, la varianza relativa de la deformación media puede ser obtenida de los residuos de un ajuste sinusoidal de la deformación media respecto a la orientación.

La incertidumbre típica relativa combinada del valor de fuerza indicado por el patrón de transferencia $w(K_{\text{ts}})$ y su incertidumbre relativa expandida W_{ts} pueden ser determinadas por las siguientes ecuaciones:

$$w(K_{\text{ts}}) = \sqrt{w^2(X) + w^2(F_{\text{nfsm}})} \quad (8)$$

$$W_{\text{ts}} = k \times w(K_{\text{ts}}) \quad (9)$$

donde k es el factor de cobertura requerido para dar un nivel de confianza de 95 %. Este valor dependerá de las contribuciones relativas de incertidumbre tipo A y tipo B, pudiéndose calcular usando la ecuación Welch-Satterthwaite.

Paso 3 - Determinación de la incertidumbre del valor de referencia del patrón de transferencia

Como el patrón de transferencia se utiliza durante un período finito de tiempo, la influencia de cualquier deriva D debe ser considerada, incorporando otra contribución de incertidumbre relativa como sigue:

$$w^2(D) = \frac{a_{\text{drift}}^2}{3} \quad (10)$$

donde su valor está estimado por una distribución de probabilidad rectangular de semiapertura a_{drift} de la variación relativa de sensibilidad. Si se puede demostrar que la deriva es dependiente del tiempo, la distribución rectangular puede ser sustituida por una distribución triangular (usando un divisor de 6 en lugar de de 3). Esta sustitución sólo está justificada si las mediciones de comparación se realizan en un corto período de tiempo (típicamente alrededor de un mes) y la calibración de la máquina de calibración de fuerza está hecha aproximadamente en medio de las dos calibraciones del patrón de transferencia en la máquina patrón nacional de fuerza.

La incertidumbre relativa expandida del valor de referencia se evalúa como:

$$W_{rv} = k \times \sqrt{w^2(K_{ts}) + w^2(D)} . \tag{11}$$

La tabla 5.2 muestra ejemplos típicos de la incertidumbre relativa expandida de valores de referencia de cuatro calidades diferentes de patrones de transferencia de fuerza en relación con distintos tipos de máquinas patrón de fuerza. Los patrones de transferencia con la incertidumbre relativa más baja alcanzable hasta ahora, como se ve en la columna 2, son los transductores de fuerza para el rango entre 100 kN y 500 kN. Para rangos menores a 2 kN (columna 3), puede ser muy difícil encontrar patrones de transferencia con incertidumbre relativa baja. Si las máquinas patrón de fuerza no son máquinas de carga directa, las incertidumbres de los patrones de transferencia pueden ser de menor importancia, como se ve en las columnas 4 y 5. Sin embargo, en el caso de fuerzas por encima de 3 MN, se deben llevar a cabo investigaciones para determinar los patrones de transferencia apropiados.

Tabla 5.2: Ejemplos de incertidumbre relativa expandida de valores de referencia

	Tipo de máquina patrón nacional de fuerza			
	Carga directa > 2 kN	Carga directa < 2 kN	Amplificación por palanca	Amplificación hidráulica
$w(F_{nfsm})$	$1,0 \times 10^{-5}$	$1,0 \times 10^{-5}$	$5,0 \times 10^{-5}$	$1,0 \times 10^{-4}$
W_{nfsm}	$2,0 \times 10^{-5}$	$2,0 \times 10^{-5}$	$1,0 \times 10^{-4}$	$2,0 \times 10^{-4}$
$w(\chi)$	$0,3 \times 10^{-5}$	$0,5 \times 10^{-5}$	$0,8 \times 10^{-5}$	$1,7 \times 10^{-5}$
W_{ts}	$2,1 \times 10^{-5}$	$2,2 \times 10^{-5}$	$1,0 \times 10^{-4}$	$2,0 \times 10^{-4}$
a_{drift}	$3,0 \times 10^{-5}$	$5,0 \times 10^{-5}$	$5,0 \times 10^{-5}$	$1,0 \times 10^{-4}$
$w(D)$	$1,2 \times 10^{-5}$	$2,0 \times 10^{-5}$	$2,0 \times 10^{-5}$	$4,1 \times 10^{-5}$
W_{rv}	$3,2 \times 10^{-5}$	$4,7 \times 10^{-5}$	$1,1 \times 10^{-4}$	$2,2 \times 10^{-4}$

Después de terminar la calibración de la máquina de calibración de fuerza, su capacidad de medida y calibración en términos relativos puede ser determinada siguiendo los dos pasos descritos a continuación. Este cálculo está basado en la suposición de que el transductor de fuerza, que debe ser calibrado, no introducirá otras componentes significativas en la incertidumbre.

Paso 4 – Determinación de la incertidumbre de generación de fuerza en la máquina de calibración

El resultado de la calibración de la máquina de calibración de fuerza será, en cada fuerza calibrada, una desviación creciente del valor de referencia y una desviación decreciente del valor de referencia, ambas con valores asociados de repetibilidad y reproducibilidad. La máquina puede o bien ser calibrada separadamente para fuerzas crecientes o decrecientes, en cuyo caso, el siguiente análisis debe ser aplicado sólo en el sentido de carga de interés, o bien la máquina puede ser calibrada para ambas fuerzas, crecientes y decrecientes, en cuyo caso, todos los resultados de calibración deben tomarse en consideración.

Es muy probable que una máquina de calibración de fuerza se calibre usando un rango de patrones de transferencia de diferentes capacidades. Si es el caso, tienen que existir puntos comunes en los que la fuerza generada se mida por dos patrones de transferencia. Cualquier diferencia en la fuerza medida por esos dos patrones de transferencia probablemente se deba a efectos de interacción diferentes entre los patrones de transferencia y las máquinas y se debería evaluar cuidadosamente antes de incorporarla como una componente separada en el balance de incertidumbre.

Según la GUM [5] (véase la nota en 6.3.1), se deberían aplicar correcciones para todos los efectos sistemáticos significativos conocidos. Si las mediciones hechas en la máquina de calibración de fuerza muestran desviaciones significativas entre la fuerza generada y la fuerza generada en la máquina patrón nacional de fuerza, se debería realizar entonces una corrección para esta desviación y además, se debería considerar que la desviación decreciente puede ser una función de la fuerza máxima aplicada (cualquier incertidumbre asociada con estas correcciones debería ser incorporada en el balance de incertidumbre). Como parte del proceso, las desviaciones en fuerzas que no fueron aplicadas durante la calibración, pero están dentro del rango de la máquina, deberán ser estimadas para permitir determinar valores de corrección. Dependiendo del tipo de la máquina y de los resultados obtenidos, un ajuste polinomial de la desviación respecto a la fuerza puede ser adecuado (en tal caso, los residuos

de este ajuste permitirán hacer una estimación de la incertidumbre asociada a las correcciones calculadas). La incertidumbre típica relativa asociada al valor de corrección en cada fuerza de calibración se denota como w_{corr} .

Si no se hacen correcciones para las desviaciones medidas, estando estrictamente recomendado hacerlas, las desviaciones no pueden simplemente ser tratadas como componentes de incertidumbre porque son efectos sistemáticos conocidos. En estos casos, la peor estimación para la incertidumbre expandida en cada fuerza de calibración puede ser determinada añadiendo la magnitud de la desviación relativa más grande (creciente (Δd) o decreciente (Δd_i)) a la incertidumbre expandida calculada de otras fuentes (el valor absoluto de esta magnitud se denota como Δd_{max}). Nótese que este enfoque no es el que se usa en el apartado F.2.4.5 de la GUM, donde se calcula una desviación media de todo el rango, y la incertidumbre expandida incorpora contribuciones debidas a la varianza de esta desviación media y a la varianza media asociada a la determinación de valores individuales de desviación. Esto resulta en una incertidumbre expandida asociada al valor obtenido en cada fuerza cuando se usa una corrección igual a la desviación media.

La contribución de incertidumbre debida a la falta de reproducibilidad de la fuerza generada por una máquina de calibración, se determina mediante las lecturas obtenidas del patrón de transferencia en un número de posiciones de rotación espaciadas igualmente alrededor del eje de medición de la máquina. Esta contribución es igual a la desviación típica de las deformaciones calculadas expresadas en términos relativos y se añade a la incertidumbre asociada a cualquier corrección para dar la incertidumbre asociada a la generación de fuerza en la máquina de calibración:

$$w^2(d_{\text{fcm}}) = \frac{1}{(n-1)} \sum_{i=1}^n ((X_{\text{fcm}_i} - X_{\text{fcm}})/X_{\text{fcm}})^2 + w_{\text{corr}}^2 \quad (12)$$

donde X_{fcm_i} son las deformaciones individuales obtenidas en n posiciones de rotación y X_{fcm} es la deformación media, en cada fuerza de calibración. Se tiene que tomar en cuenta que el valor de la desviación típica usado es el de la muestra y no el de la media, así como la estimación de incertidumbre debe considerar cómo pueden variar las aplicaciones de fuerza individuales, más que la incertidumbre asociada a su valor medio (lo contrario al caso en la ecuación (7) con la estimación de la incertidumbre asociada al valor de referencia).

Paso 5 – Determinación de la CMC de la máquina de calibración

Se calcula la capacidad de medida y calibración obtenida por máquinas de carga directa y máquinas de amplificación hidráulica o por palanca, en cada fuerza calibrada, partiendo de la siguiente ecuación:

$$W_{\text{CMC}} = k \times \sqrt{w_{\text{rv}}^2 + w^2(d_{\text{fcm}})} + \Delta d_{\text{max}} \cdot \quad (13)$$

En el cálculo de máquinas tipo comparador, deben considerarse dos componentes adicionales de incertidumbre (la incertidumbre de calibración $w_{\text{ref_tra}}$ del transductor de referencia de fuerza y su inestabilidad estimada a largo plazo $w_{\text{ref_instab}}$) y aplicarse en la siguiente ecuación:

$$W_{\text{CMC}} = k \times \sqrt{w_{\text{rv}}^2 + w^2(d_{\text{fcm}}) + w_{\text{ref_tra}}^2 + w_{\text{ref_instab}}^2} + \Delta d_{\text{max}} \cdot \quad (14)$$

La tabla 5.3 muestra finalmente los resultados típicos generales de la capacidad de medida y calibración para diferentes tipos de máquinas de calibración de fuerza, suponiendo que las correcciones no se han realizado. La incertidumbre relativa del transductor de referencia de fuerza puede ser calculada usando los procedimientos dados en los apartados 6 y 7. La inestabilidad a largo plazo del transductor de referencia de fuerza debe determinarse usando calibraciones anteriores o por estimaciones.

Tabla 5.3: Ejemplos de la capacidad de medida y calibración W_{CMC} para diferentes tipos de máquinas de calibración de fuerza

	Carga directa > 2 kN	Carga directa < 2 kN	Amplificación hidráulica o por palanca	Comparador
W_{ref_tra}	—	—	—	3×10^{-4}
W_{ref_instab}	—	—	—	2×10^{-4}
W_{FV}	$3,2 \times 10^{-5}$	$4,7 \times 10^{-5}$	$1,1 \times 10^{-4}$	$2,2 \times 10^{-4}$
$w(d_{fcm})$	$3,3 \times 10^{-6}$	$3,3 \times 10^{-6}$	$8,3 \times 10^{-6}$	$1,7 \times 10^{-5}$
Δd_{max}	$5,0 \times 10^{-5}$	$1,0 \times 10^{-4}$	$3,0 \times 10^{-4}$	$5,0 \times 10^{-4}$
W_{CMC}	$8,3 \times 10^{-5}$	$1,5 \times 10^{-4}$	$4,1 \times 10^{-4}$	$9,2 \times 10^{-4}$

6 Transductores de fuerza

Este apartado trata sobre la incertidumbre asociada a los resultados de la calibración de un transductor de fuerza en una máquina de calibración de fuerza. Muchos transductores de fuerza se calibran según la Norma ISO 376, dado que ésta es la ruta de trazabilidad de fuerza especificada en las normas ISO de ensayo de materiales, como por ejemplo la Norma ISO 7500-1 [6] (calibración de máquinas de ensayo uniaxiales) y la Norma ISO 6508-2 (calibración de máquinas de ensayo de dureza Rockwell). El apartado 6.1 trata sobre las calibraciones según la Norma ISO 376. También existen otras normas nacionales e internacionales que tratan sobre la calibración de transductores de fuerza, como ASTM E 74, BS 8422 y DKD-R 3-3. En el apartado 6.2 se dan unas breves directrices acerca del enfoque de estimación de incertidumbre utilizado en los otros métodos de calibración, aunque mucha de la información técnica del apartado 6.1 también es aplicable a estos otros métodos.

6.1 Determinación de la incertidumbre de calibración según la Norma ISO 376

La edición actual de la Norma ISO 376 no incluye directrices sobre de la estimación de incertidumbre de calibración, aunque la siguiente revisión podría hacerlo. Si se diera el caso y las directrices contradicen el enfoque del presente documento, éste se revisará y editará de nuevo. Para ser coherente con el resto del documento, las directrices que se dan se basarán en un enfoque de incertidumbre relativa, pero se debe considerar que un enfoque basado en unidades de fuerza es igualmente válido e, incluso, más sencillo tanto para esta estimación como para las demás estimaciones de incertidumbre de fuerza incluidas en este documento.

La Norma ISO 376 permite dos métodos diferentes de calibración. Uno consiste en calibrar el transductor para su uso exclusivo a fuerzas específicas y el otro método en usarlo en un rango de fuerza, con la fuerza aplicada calculada como una función de la deformación medida usando una ecuación de interpolación. La definición de la incertidumbre de calibración es diferente para estos dos métodos. En instrumentos clasificados para interpolación, la incertidumbre de calibración es la incertidumbre asociada a la fuerza media en sentido creciente aplicada en tres series (con el instrumento de medida de fuerza rotando 120° entre series e indicando la misma deformación en cada serie) calculando el valor de esta fuerza media a través de la ecuación de interpolación. Para instrumentos clasificados solamente para fuerzas específicas, la incertidumbre de calibración es la incertidumbre en el valor de la fuerza media en sentido creciente aplicada en tres series (con el instrumento de medida de fuerza girado 120° entre series) cuando la deformación en cada serie es igual a una de las deformaciones medias obtenidas durante la calibración.

En cada fuerza de calibración se calcula una incertidumbre típica relativa combinada w_c de las lecturas obtenidas durante la calibración. A continuación, estas incertidumbres típicas relativas combinadas se representan gráficamente frente a la fuerza y se calcula un ajuste por mínimos cuadrados para estos valores. Después estos coeficientes de ajuste se multiplican por un factor de cobertura k (tomado para ser igual a 2) para dar un valor de incertidumbre expandida W para cualquier fuerza dentro del rango de calibración:

$$w_c = \sqrt{\sum_{i=1}^8 w_i^2} \quad \text{y} \quad W = k \times w_c \quad (15)$$

donde:

- w_1 = incertidumbre típica relativa asociada a la fuerza aplicada de calibración;
- w_2 = incertidumbre típica relativa asociada a la reproducibilidad de los resultados de calibración;
- w_3 = incertidumbre típica relativa asociada a la repetibilidad de los resultados de calibración;
- w_4 = incertidumbre típica relativa asociada a la resolución del indicador;
- w_5 = incertidumbre típica relativa asociada a la fluencia del instrumento;
- w_6 = incertidumbre típica relativa asociada a la deriva en la salida en cero;
- w_7 = incertidumbre típica relativa asociada a la temperatura del instrumento;
- w_8 = incertidumbre típica relativa asociada a la interpolación.

Incertidumbre de la fuerza de calibración, w_1

La incertidumbre típica relativa asociada a las fuerzas aplicadas por la máquina de calibración es w_1 . Por lo general, será igual a la CMC de la máquina, expresada en términos relativos, dividida por el valor de k especificado en el certificado de calibración de la máquina (probablemente igual a 2).

En aquellas máquinas para las que la CMC está determinada a partir de correcciones no realizadas (es decir, un valor diferente de cero de Δd_{\max} en las expresiones (13) o (14)), este enfoque no es estrictamente correcto, pero el valor determinado podría ser una estimación razonable de la incertidumbre típica de la fuerza de calibración.

Incertidumbre de reproducibilidad, w_2

En cada escalón de fuerza aplicada w_2 es la desviación típica de la deformación media en sentido creciente obtenida en orientaciones igualmente espaciadas en la calibración, expresada como un valor relativo:

$$w_2 = \frac{1}{|\bar{X}_r|} \times \sqrt{\frac{1}{6} \times \sum_{i=1,3,5} (X_i - \bar{X}_r)^2} \quad (16)$$

donde X_i son las deformaciones obtenidas en las series crecientes 1, 3 y 5, siendo \bar{X}_r el valor medio de estos tres valores.

Incertidumbre de repetibilidad, w_3

En cada escalón de fuerza aplicada w_3 es la contribución debida a la repetibilidad de la deformación medida en una sola orientación, expresada como valor relativo. Se calcula a partir de:

$$w_3 = \frac{b'}{100 \times \sqrt{3}} \quad (17)$$

donde b' es el error relativo de repetibilidad del instrumento definido en la Norma ISO 376 como:

$$b' = 100 \times \left| \frac{X_2 - X_1}{(X_1 + X_2)/2} \right| \quad (18)$$

donde X_1 y X_2 son las deformaciones obtenidas en el nivel de fuerza dado en las series 1 y 2.

Incertidumbre de resolución, w_4

Cada valor de deformación se calcula como la diferencia entre dos lecturas (la lectura en la fuerza cero se resta de la lectura en una fuerza aplicada). Por lo tanto, la resolución del indicador debe incluirse dos veces como dos distribuciones rectangulares, cada una con una incertidumbre típica de $r/(2\sqrt{3})$, donde r es la resolución expresada en unidades de fuerza. Esto equivale a una distribución triangular con una incertidumbre típica de $r/\sqrt{6}$ y se debe expresar en cada nivel de fuerza como un valor relativo:

$$w_4 = \frac{1}{\sqrt{6}} \times \frac{r}{F} \quad (19)$$

Incertidumbre de fluencia, w_5

Esta componente de incertidumbre se debe a la posibilidad de que la deformación del instrumento pueda verse influenciada por su historial previo de carga a corto plazo. Una medida de esta influencia es el cambio de señal de salida en el intervalo de 30 s a 300 s después de la aplicación o supresión de la fuerza máxima de calibración. Este cambio de señal de salida no está incluido en la componente de reproducibilidad porque la misma máquina de calibración se suele utilizar en todas las series y el procedimiento de tiempo de carga será el mismo. La magnitud de esta componente de incertidumbre puede estimarse como:

$$w_5 = \frac{c}{100 \times \sqrt{3}} \quad (20)$$

donde c es el error relativo de fluencia del instrumento definido como:

$$c = 100 \times \left| \frac{i_{300} - i_{30}}{X_N} \right| \quad (21)$$

donde i_{30} e i_{300} son las salidas del instrumento a 30 s y 300 s respectivamente, después de la aplicación o supresión de la fuerza máxima de calibración, siendo X_N la deformación a la fuerza máxima de calibración.

Si el ensayo de fluencia no se realiza durante la calibración, esta contribución de incertidumbre podría estimarse como la contribución debida a la reversibilidad, dada en la expresión (26), dividida por un factor de tres.

Incertidumbre por deriva del cero, w_6

Esta componente de incertidumbre se debe a la posibilidad de que la salida en cero del instrumento podría variar entre series de medida. Por lo tanto, las posteriores deformaciones medidas podrían ser una función del tiempo transcurrido en fuerza nula. Este efecto no está incluido en la componente de reproducibilidad porque, por lo general, será el mismo para todas las series. Una medida de esta variación es el error de cero f_0 según la Norma ISO 376, así este efecto se puede estimar como:

$$w_6 = \frac{f_0}{100} \quad (22)$$

donde $f_0 = 100 \times \frac{i_f - i_0}{X_N}$, i_0 e i_f son las lecturas del indicador antes y después de la aplicación de la fuerza respectivamente, siendo X_N la deformación en la máxima fuerza de calibración.

Incertidumbre por temperatura, w_7

Esta contribución se debe a la variación de temperatura a lo largo de la calibración, junto con la incertidumbre en la medición de este intervalo de temperatura de calibración. La sensibilidad del instrumento de medida de fuerza respecto a la temperatura debe estar determinada ya sea por ensayos o, más frecuentemente, por las especificaciones del fabricante. Esta componente toma el mismo valor en cada nivel de fuerza y, expresado como un valor relativo, es igual a:

$$w_7 = K \times \frac{\Delta T}{2} \times \frac{1}{\sqrt{3}} \quad (23)$$

donde K es el coeficiente de temperatura del instrumento, en $^{\circ}\text{C}^{-1}$, siendo ΔT el intervalo de temperatura de calibración permitido para la incertidumbre en la medición de la temperatura. Cabe señalar que en instrumentos con compensación en temperatura, esta componente generalmente será insignificante (es improbable que ΔT exceda 2°C y un valor típico para K es $0,000\ 05^{\circ}\text{C}^{-1}$, dando $w_7 = 0,003\ \%$, valor menor que la contribución de incertidumbre de fuerza de calibración de la Clase 00).

Incertidumbre por interpolación, w_8

Esta componente de incertidumbre solamente se considera para instrumentos clasificados para interpolación, ya que una ecuación de interpolación no es aplicable a instrumentos clasificados solamente para fuerzas específicas. Es la contribución debida a la curva de ajuste que no pasa exactamente por todos los puntos de "fuerza aplicada" frente a los de "deformación media" representados gráficamente y se puede calcular con un método residual o un de desviación:

Método residual

Este método estima la componente usando teoría estadística. Si se supone que las fuerzas de calibración se distribuyen equitativamente, esta componente puede calcularse con la siguiente ecuación:

$$w_8 = \frac{F_N}{F \times X_N} \sqrt{\frac{\delta_r}{n-d-1}} \quad (24)$$

donde F_N es la fuerza máxima de calibración, F la fuerza aplicada, X_N la deformación a fuerza máxima de calibración, δ_r la suma cuadrática de las desviaciones entre la deformación media y el valor calculado por la ecuación de interpolación, n el número de escalones de la calibración de fuerza y d el grado de la ecuación.

Método de desviación

Este método estima la componente en cada fuerza de calibración como la diferencia entre la deformación media medida, \bar{X}_r , y el valor calculado de la ecuación de interpolación, X_a , expresado como valor relativo:

$$w_8 = \left| \frac{X_a - \bar{X}_r}{\bar{X}_r} \right| \quad (25)$$

Incertidumbre típica combinada e incertidumbre expandida

En cada fuerza de calibración, la incertidumbre típica combinada w_c se calcula según la expresión (15).

Se realiza un gráfico de w_c en relación a la fuerza y se determinan los coeficientes de la mejor curva de ajuste por mínimos cuadrados de todos los puntos. La forma de la curva de ajuste (es decir, lineal, polinomial, exponencial) dependerá de los resultados de la calibración. Si resulta en valores significativamente más pequeños que los valores calculados de w_c en cualquier parte del rango de fuerza de calibración, se debe aplicar un ajuste más conservador o debe especificarse un valor mínimo para la incertidumbre en las partes relevantes del rango de fuerza.

Entonces, la incertidumbre expandida W se calcula a partir de este ajuste multiplicando su valor para una fuerza dada por un factor de dos. En tal caso, para cualquier fuerza dentro del rango de calibración se puede calcular una incertidumbre expandida como valor relativo o en unidades de fuerza.

La tabla 6.1 presenta los valores de la incertidumbre relativa expandida para instrumentos de medida de fuerza que cumplen todos los criterios de clasificación dados en la Norma ISO 376, de este modo proporciona los límites de incertidumbre en sentido creciente en el peor caso para instrumentos de medida de fuerza clasificados para interpolación (aunque el término de la incertidumbre por temperatura se considera despreciable, pues es difícil determinar un valor para el peor caso porque la norma no limita la sensibilidad de temperatura del instrumento y, en la práctica, es probable que sea despreciable).

Tabla 6.1: Incertidumbres relativas expandidas para los casos más desfavorables para instrumentos clasificados según la Norma ISO 376

Clase	w_1	w_2	w_3	w_4	w_5	w_6	w_8	Incertidumbre relativa expandida
00	0,005 %	0,017 %	0,014 %	0,010 %	0,014 %	0,012 %	0,025 %	0,08 %
0,5	0,010 %	0,033 %	0,029 %	0,020 %	0,029 %	0,025 %	0,050 %	0,16 %
1	0,025 %	0,067 %	0,058 %	0,041 %	0,058 %	0,050 %	0,100 %	0,32 %
2	0,050 %	0,133 %	0,115 %	0,082 %	0,115 %	0,100 %	0,200 %	0,64 %

6.2 Determinación de la incertidumbre según otros procedimientos de calibración

Existen muchos otros procedimientos para la calibración estática o cuasi estática de transductores de fuerza. Sin embargo, el método para estimar la incertidumbre de los resultados de calibración debería ser similar al método utilizado en el apartado 6.1. El principio que debe tenerse en cuenta es que la diferencia entre los resultados de calibración de un transductor calibrado con el mismo procedimiento en diferentes máquinas de calibración de fuerza (dentro de un período de tiempo corto) no debería ser grande cuando se compare con la combinación de las dos incertidumbres de calibración. En otras palabras, las incertidumbres estimadas deben incluir todas las diferencias posibles entre las formas en que se puede calibrar un transductor, pero todavía debe seguir dentro de los criterios especificados en el procedimiento. Un corolario de esto es que, para obtener una incertidumbre de calibración muy baja, el procedimiento de calibración debe estar muy bien definido. Un ejemplo es el procedimiento estrictamente controlado usado en las comparaciones clave del CIPM y de las Organizaciones Regionales de Metrología (ORM), que se ha desarrollado especialmente para minimizar las diversas contribuciones de incertidumbre.

Las posibles fuentes de incertidumbre incluirán, entre otros, los siguientes parámetros:

- Fuerza de calibración.
- Resolución del indicador.
- Reproducibilidad/repetibilidad de la deformación medida.
- Fluencia (*creep*) del transductor.
- Efecto de la deriva del cero.
- Efecto de la temperatura.
- Adecuación de la ecuación de interpolación a los datos (si procede).

NOTA: La Norma ASTM E 74 incluye un método obligatorio para calcular el valor de incertidumbre que define como: "una estimación estadística del error para las fuerzas calculadas a partir de la ecuación de calibración de un instrumento de medida de fuerza cuando el instrumento está calibrado de acuerdo con esta práctica". Este cálculo de incertidumbre incluye solamente contribuciones debidas a la reproducibilidad y a la desviación respecto de la ecuación de interpolación, aunque el valor se incrementa para ser igual a la resolución si el valor original que se calcule es más bajo y la incertidumbre de la fuerza de calibración aplicada está también especificada dentro de ciertos límites. El método aporta un valor de incertidumbre, en unidades de fuerza, que se aplica a todo el rango de fuerzas de calibración y que se utiliza para determinar los límites de fuerza más pequeños para los dos rangos normalizados de carga (2 000 veces la incertidumbre para clase AA y 400 veces la incertidumbre para clase A). La incertidumbre calculada por este método ignora algunas de las componentes incluidas en el apartado 6.1 y, como tal, es probable que resulten valores diferentes y posiblemente menores. Se debe evitar usar solamente el valor calculado de incertidumbre asociado a la calibración, cuando se desarrolle un balance de incertidumbre para el empleo posterior del instrumento de medida de fuerza. También deberían incluirse las contribuciones debidas a las otras componentes de incertidumbre presentes durante la calibración.

7 Mediciones industriales de fuerza

7.1 Contribuciones a la incertidumbre que deben ser consideradas

Cuando el transductor de fuerza se utilice después de su calibración, la incertidumbre de la fuerza calculada de su valor indicado dependerá, en parte, de su incertidumbre de calibración; pero existen también otros factores que se deben tomar en consideración. Estas fuentes de incertidumbre incluirán, entre otras, las siguientes:

- Resolución.
- Contribución debida a la reversibilidad.
- Deriva de la sensibilidad desde la calibración.
- Efecto por ser utilizado a una temperatura diferente.
- Efecto por ser utilizado con diferentes condiciones de carga final.
- Efecto por ser utilizado con diferentes componentes parásitas.
- Efecto por ser utilizado con un esquema diferente de tiempo de carga.
- Efecto de aproximaciones lineales en la ecuación de interpolación.
- Si procede, el efecto de sustitución del indicador.
- Carácter dinámico de la fuerza bajo medición.

Si se puede suponer que ninguno de estos efectos está correlacionado, sus incertidumbres típicas pueden sumarse cuadráticamente, junto con la incertidumbre de calibración del instrumento, para calcular una incertidumbre típica combinada en cada fuerza. Todo ello suponiendo que cualquiera de los errores conocidos haya sido corregido. Por ejemplo, si se conoce tanto la sensibilidad respecto a la temperatura del transductor como la diferencia de temperatura (entre calibración y uso posterior), se debe hacer una corrección a la fuerza calculada, o bien se debe añadir linealmente el valor del efecto a la incertidumbre expandida combinada, en vez de combinarla cuadráticamente con las otras contribuciones de incertidumbre.

Incertidumbre por resolución

La fuerza medida se obtiene de nuevos valores de deformación. Por ello, la resolución del indicador debe incluirse de nuevo de manera similar a la descrita en el apartado 6.1. Si las lecturas fluctúan más que la resolución del indicador, la resolución se toma como la mitad del intervalo de fluctuación.

Cálculo de la contribución debida a la reversibilidad

El error de reversibilidad definido en la Norma ISO 376 no se aborda como una componente de la incertidumbre de calibración. La manera de tomar en consideración esta contribución dependerá de cómo se utilice el instrumento después de su calibración.

Si se usa solamente para hacer mediciones crecientes, no se debe incluir ninguna componente debida a la reversibilidad en la incertidumbre de la fuerza medida. Sin embargo, si se hacen mediciones decrecientes de valores de fuerza, sin ninguna corrección basada en los resultados de calibración, la incertidumbre de la fuerza medida debe considerar la reversibilidad incluyendo la siguiente componente:

$$w_{\text{rev}} = \frac{v}{100 \times \sqrt{3}} \quad (26)$$

donde v es el error relativo de reversibilidad definido en la Norma ISO 376.

Esta componente se obtiene puramente de los resultados de calibración y, por lo tanto, podría especificarse en el certificado de calibración del instrumento. Si es necesario, se puede añadir cuadráticamente a las componentes de incertidumbre de calibración para obtener una incertidumbre expandida de calibración que incluya la reversibilidad del instrumento.

Las características de reversibilidad de un instrumento específico de medida de fuerza generalmente se pueden repetir de forma adecuada. Por ello, si las mediciones decrecientes se realizan después de aplicar la fuerza máxima de calibración, probablemente resultaría más efectivo hacer correcciones basándose en datos de calibración que incluir el efecto total de reversibilidad como una contribución a la incertidumbre.

Deriva de la sensibilidad desde la calibración

Esta contribución se puede estimar por el historial de la sensibilidad del instrumento, basándose en los resultados de calibración anteriores. La distribución exacta de incertidumbre (e incluso posiblemente una corrección estimada del error) dependerá del instrumento individual, pero se sugiere una distribución rectangular con una incertidumbre expandida de \pm la mayor variación obtenida entre dos calibraciones consecutivas anteriores. Si tal información no está disponible, se puede hacer una estimación basándose en el historial del comportamiento de dispositivos similares.

Efecto de la temperatura

El efecto de la temperatura sobre la salida de cero se puede ignorar, ya que el cálculo de la deformación generalmente lo hace despreciable (excepto en ensayos de larga duración en los que la temperatura ambiente cambie significativamente), pero debe tomarse en cuenta el efecto de temperatura en la sensibilidad (o pendiente (*span*)). Si se conoce la sensibilidad real del instrumento a la temperatura, lo ideal sería hacer una corrección en la fuerza calculada. Si, como probablemente suceda, la única información es la tolerancia de especificación del fabricante, entonces se debe aplicar una componente de incertidumbre basada en esta información y la diferencia de temperatura entre la calibración del instrumento y su uso posterior a la calibración a través de una distribución rectangular recomendada. Sin embargo, el coeficiente (o la tolerancia) suele darse para una temperatura estabilizada sin ningún gradiente. Si el instrumento se utiliza en condiciones en las que está sujeto a gradientes de temperatura, se debe incorporar una contribución adicional a la incertidumbre.

Efecto de la carga final

El ensayo de cojinetes de carga especificado en la Norma ISO 376 proporciona una indicación de la sensibilidad de un instrumento de medida de fuerza a compresión a variaciones especificadas en las condiciones de carga final. Los resultados de este ensayo, junto con la información acerca de las condiciones en las que, posteriormente, se utilizará el instrumento, deberían permitir la estimación de contribuciones realistas a la incertidumbre para el uso en compresión. Para instrumentos usados a tracción, puede ser conveniente realizar ensayos adicionales para determinar la sensibilidad a posibles variaciones en la aplicación de fuerza.

Efecto de componentes parásitas

La componente de reproducibilidad incluida en la incertidumbre de calibración es, como se explica en el apartado 6.1, válida solamente para un valor medio de tres mediciones hechas en la máquina de calibración. Durante el uso posterior del instrumento suelen aplicarse componentes parásitas mayores que las existentes durante la calibración.

Se recomienda que el usuario, cuando sea posible, repita la medición de fuerza rotando entre series el instrumento alrededor del eje de fuerza. Entonces, puede tomarse en cuenta una componente relacionada con cualquier variación observada.

Si no es posible repetir las mediciones con rotación, debe estimarse el valor de cualquier componente parásita y se debe evaluar o estimar la sensibilidad del instrumento a tales componentes parásitas. En el balance de incertidumbre se debe incluir una componente basada en el producto del valor de la componente y la sensibilidad del instrumento.

Esquema de tiempo de carga

El método de calibración del instrumento de medida de fuerza (como se define en la Norma ISO 376) y su uso posterior para verificar una máquina de ensayo uniaxial (como se define en la Norma ISO 7500-1) especifican diferentes esquemas de tiempo de carga (una espera de 30 s antes de tomar una lectura en la Norma ISO 376, mientras la Norma ISO 7500-1 permite la calibración con una fuerza que crece lentamente). Si la célula de carga es sensible a efectos de tiempo de carga, estas diferentes metodologías darían lugar a errores en la fuerza calculada. En el balance de incertidumbre de calibración, las contribuciones de incertidumbre por fluencia (*creep*) y por deriva del cero cubrirán estos efectos hasta cierto grado, pero podría necesitarse una contribución adicional a la incertidumbre dependiendo de la aplicación particular.

Se tiene que tener cuidado si no se puede aplicar ninguna precarga antes del uso del transductor, particularmente si se utiliza en ambos modos de carga, es decir, de tracción a compresión o viceversa.

Efecto de aproximaciones a la ecuación

Si no se usa la ecuación de calibración dada en el certificado, se debe añadir una componente basada en las diferencias entre la ecuación de calibración y la ecuación que se usa en la práctica.

Algunos dispositivos de indicación permitirán introducir algunos valores de la curva de calibración, de modo que la indicación estará en unidades de fuerza, pero efectuará una interpolación lineal entre estos puntos, en vez de usar la ecuación de calibración. Si es el caso, se debe investigar el efecto de esta aproximación lineal a la curva de calibración y, si es significativa, se debe incluir una contribución a la incertidumbre.

Efecto de la sustitución del indicador

Si posteriormente se usa el transductor de fuerza con un indicador diferente al indicador con el que fue calibrado, se debe determinar la desviación entre los dos indicadores (existen varios métodos, por ejemplo la calibración de ambos indicadores y el uso de un puente simulador) y debe estimarse la incertidumbre de esta desviación (incluyendo factores como la incertidumbre de calibración del indicador y la estabilidad del puente simulador).

Si se hacen correcciones basadas en la desviación medida entre los dos indicadores, se debe tener en cuenta la incertidumbre de esta desviación. Si no se hacen correcciones, se deben considerar tanto la desviación como su incertidumbre.

Incertidumbre de calibración

Ésta es la mitad del valor de la incertidumbre expandida calculada en el apartado 6 usando la expresión de la incertidumbre expandida.

Efecto de fuerza dinámica

Si el transductor se utiliza en condiciones dinámicas, se deben considerar contribuciones adicionales. Por ejemplo, las respuestas en frecuencia del transductor de fuerza y del indicador, así como la interacción con la estructura mecánica, pueden tener una gran influencia en los resultados de medición. Esto requiere un análisis detallado de la medición dinámica que no se trata en este documento.

7.2 Calibración de máquinas de ensayo de acuerdo con la Norma ISO 7500-1

Una de las principales normas ISO que especifica el uso de instrumentos de medida de fuerza calibrados de acuerdo con la Norma ISO 376 es la Norma ISO 7500-1. Ésta describe un método para verificar las fuerzas generadas por máquinas uniaxiales de ensayo de materiales. El Anexo D de esta norma asesora sobre la estimación de la incertidumbre, información que se resume en este documento.

La Norma ISO 7500-1 permite dos maneras de calibrar la máquina. La primera consiste en configurarla para mostrar un valor nominal y utilizar el transductor para medir la fuerza generada ("fuerzas constantes indicadas"), y la segunda consiste en incrementar la fuerza hasta que el valor medido por el transductor sea un valor específico y la fuerza visualizada por el indicador de la máquina se registre ("fuerzas constantes verdaderas"). El primer método se recomienda y se discutirá en este documento, para el segundo método se puede realizar un análisis similar.

La norma especifica que, por lo menos, se deben realizar tres series de mediciones con fuerza creciente y, si es necesario, también una serie con fuerza decreciente. Para cada valor de fuerza se calculan los errores individuales de exactitud y de repetibilidad y, si es necesario, el de reversibilidad. Estos junto con la clasificación del instrumento de medida de fuerza, el error de cero y la resolución de la máquina se pueden usar para determinar la clasificación de la máquina.

La incertidumbre asociada a la calibración de la máquina para fuerzas crecientes, como se sugiere en el Anexo D, es la incertidumbre asociada a la estimación del error relativo de exactitud en cada fuerza de calibración. Todo ello está basado, como mínimo, en la repetibilidad de los resultados, la resolución del indicador de la máquina y las contribuciones debidas al patrón de transferencia (las contribuciones de patrón de transferencia incluyen su incertidumbre de calibración, su sensibilidad a la temperatura, cualquier deriva desde su calibración y cualquier efecto debido a aproximaciones a la ecuación de interpolación). Todas estas contribuciones se recogen en el apartado 7.1, los demás elementos de ese apartado también se deben considerar cuando se estime un valor de incertidumbre para la calibración de la máquina.

En el Anexo D se calcula la incertidumbre de calibración como sigue:

$$W = k \times w_c = k \times \sqrt{w_{\text{rep}}^2 + w_{\text{res}}^2 + w_{\text{std}}^2} \quad (27)$$

donde:

w_{rep} es la desviación típica de los errores a una fuerza dada, expresada como un valor relativo;

w_{res} es la contribución debida a la resolución (= resolución relativa / $\sqrt{12}$);

w_{std} es la contribución debida al patrón de transferencia, dada como:

$$w_{\text{std}} = \sqrt{w_{\text{cal}}^2 + w_{\text{temp}}^2 + w_{\text{drift}}^2 + w_{\text{approx}}^2} \quad (28)$$

donde:

w_{cal} es la incertidumbre de calibración del patrón de transferencia;

w_{temp} es la incertidumbre debida a efectos de la temperatura;

w_{drift} es la incertidumbre debida a la deriva de la sensibilidad del patrón;

w_{approx} es el efecto de aproximación a la ecuación de interpolación.

7.3 Otras aplicaciones industriales de medición de fuerza

En otras aplicaciones industriales de medición de fuerza se deben considerar contribuciones similares a la incertidumbre. La filosofía básica es que el transductor introducirá una incertidumbre específica basada en sus resultados de calibración, de este modo habrá otras contribuciones de incertidumbre debidas a la utilización del transductor en un momento diferente y bajo condiciones distintas a las experimentadas durante la calibración. Los valores de estas contribuciones se deben estimar y, si se puede demostrar que no están correlacionadas, entonces se deben combinar cuadráticamente para obtener una incertidumbre típica combinada para el resultado de la medición. Esta incertidumbre típica puede entonces multiplicarse por un factor de cobertura para dar una incertidumbre expandida al nivel de confianza requerido.

Una de las mayores diferencias entre las condiciones de calibración y de uso puede ser que el transductor haya sido calibrado en condiciones de una fuerza razonablemente estable (probablemente por no disponer de instalaciones de patrones dinámicos y/o métodos de calibración) pero que se utilice para hacer mediciones de fuerzas que cambian rápidamente o fuerzas dinámicas. Algunos ejemplos de estas aplicaciones incluyen sistemas de medida de fuerza en máquinas de ensayos dinámicos (como máquinas de fatiga), prensas industriales y equipo de recogida de datos de carga en carreteras. La incertidumbre asociada con el valor de medida de fuerza deberá incluir las componentes relacionadas con estos efectos dinámicos, pero esto se realiza mejor caso por caso. Esta área principal de análisis de incertidumbre no se puede tratar por completo en este documento, por lo que se invita a los lectores a consultar las referencias relevantes para obtener más información.

8 Referencias y lecturas adicionales

8.1 Referencias

- 1 EN ISO 376:2004. *Metallic materials. Calibration of force-proving instruments used for the verification of uniaxial testing machines.*
- 2 Sawla, A., Peters, M.: *EC – Intercomparison of Force Transducer Calibration.* Brussels, Commission of the European Communities, Bureau of Reference (1987), EUR 11324 EN.
- 3 Sawla, A., Peters, M.: *WECC Inter-laboratory Comparison F2 Force Transducer Calibration.* Braunschweig, PTB-Bericht PTB-MA-28, 1993.
- 4 Sawla, A.: *Uncertainty scope of the force calibration machines.* Proc. IMEKO World Congress. Vienna, Austria, 2000.
- 5 JCGM 100:2008 (GUM 1995 with minor corrections). *Evaluation of measurement data - Guide to the expression of uncertainty in measurement.*

- 6 EN ISO 7500-1:2004. *Metallic materials. Verification of static uniaxial testing machines. Tension/compression testing machines. Verification and calibration of the force-measuring system.*

8.2 Lecturas adicionales

JCGM 200:2008. *International vocabulary of metrology — Basic and general concepts and associated terms (VIM).*

Sawla, A.: *Guidance for the determination of the best measurement capability of force calibration machines and uncertainty of calibration results of force measuring devices.* Braunschweig, PTB-Mitteilungen 104 4/94, 1994.

Sawla, A.: *Uncertainty of measurement in the verification and calibration of the force-measuring systems of testing machines.* Proc. of the Asia-Pacific Symposium on Measurement of Force, Mass, and Torque (APMF 2000), pp 7-14. Tsukuba, Japan, November 2000.

NIPO: 706-10-010-7