

DOCUMENTOS DE REFERENCIA PARA LA DETERMINACIÓN DE INCERTIDUMBRE EN METROLOGÍA DIMENSIONAL

José R. Zeleny V.

Instituto de Metrología Mitutoyo - Mitutoyo Mexicana, S.A. de C.V.

Prol. Industria Eléctrica No. 15 Col. Parque Industrial Naucalpan C.P. 53370 Naucalpan Estado de México

Teléfono: 5312 5612, Fax: 5312 3660 correo electrónico: imm@mitutoyo.com.mx

Se presentan los puntos relevantes de las normas NMX-CH-14253-2-IMNC-2004 [1] Guía para la determinación de la incertidumbre en medición de GPS (Especificaciones geométricas del producto), en la calibración de equipo de medición y en verificación del producto así como el proyecto de norma PROY-CH-16015-IMNC-2004 [2] Errores sistemáticos y contribuciones a la incertidumbre de medición de mediciones de longitud debidas a influencias térmicas.

Estos dos documentos contribuyen en gran medida a la necesidad de información adicional a la presentada en la NMX-CH-140:2002 IMNC [3] para la determinación de la incertidumbre en metrología dimensional, con ejemplos más prácticos y guías para determinar apropiadamente el efecto de la temperatura en mediciones y calibraciones así como mejorar su entendimiento.

1. INTRODUCCIÓN

Desde la aparición en 1993 de La guía para la expresión de incertidumbre en medición (NMX-CH-140:2002 IMNC) en la que el tratamiento matemático y estadístico parece muy riguroso y formal (muchas veces difícil) las personas trabajando en mediciones y calibraciones han estado pidiendo documentos adicionales en los cuales basarse para elaborar sus presupuestos de incertidumbre por lo que se considera de interés difundir la existencia de los siguientes documentos:

ISO/TS 14253-2:1999 (PROY-NMX-CH-14253-2-IMNC-2003). Guía para la estimación de incertidumbre en medición de (GPS), en la calibración de equipo de medición y en verificación del producto, que presenta varios ejemplos que lucen más accesibles que los presentados en NMX-CH-140:2002 IMNC

ISO/TR 16015:2003 (PROY-NMX-CH-16015-IMNC-2004) que trata de errores sistemáticos y contribuciones a la incertidumbre de medición de longitud debidas a influencias térmicas

Estos documentos están disponibles actualmente a través del Instituto mexicano de Normalización y Certificación, A.C. (IMNC).

Estos dos documentos son referenciados en los requisitos específicos para la estimación de incertidumbres en metrología dimensional y la guía para la estimación de las incertidumbre en

metrología dimensional a ser publicados por la entidad mexicana de acreditación, A.C. (ema).

2. ANTECEDENTES

En varios de los documentos relacionados con la Metrología Dimensional que están siendo publicados por el Comité Técnico 213 de la ISO existen cuatro referencias básicas:

El Vocabulario Internacional de Metrología (NMX-Z-055:1996 IMNC) [4], la Guía para la expresión de incertidumbre en medición (NMX-CH-140:2002 IMNC), ISO/TS 14253-1:1998. [5] e ISO/TS 14253-2:1999 (PROY-NMX-CH-14253-2-IMNC-2003).

Las dos primeras referencias son ampliamente conocidas y no serán comentadas aquí.

ISO 14253-1:1998 establece las reglas de decisión para probar la conformidad o no conformidad con especificaciones; considerando la incertidumbre como parte integral del resultado de una medición se obtiene un intervalo de valores en vez de un sólo valor. Si todos los valores del intervalo cumplen la especificación, o si ninguno la cumple, la situación es clara, la pieza cumple o no la especificación; sin embargo, si algunos de los valores cumplen la especificación pero otros no, entonces se presenta una situación ambigua en la que no es posible decidir la conformidad o no conformidad con la especificación. Este documento tampoco se discute aquí pero implica un reto importante para todas las personas que realizan mediciones y calibraciones que debe irse

resolviendo gradualmente ya que tiene impacto económico muy importante si se desean mediciones y calibraciones con alto nivel de exactitud y baja incertidumbre.

La cuarta referencia es comentada aquí junto con PROY-NMX-CH-16015-IMNC-2004 que trata de errores sistemáticos y contribuciones a la incertidumbre de medición de mediciones lineales debidas a influencias térmicas

3. PROY-NMX-CH-14253-2-IMNC-2003

En la parte 3 se dan 17 definiciones entre las que destacan la de incertidumbre objetivo que es la considerada optima para un trabajo de medición y la de gestión de incertidumbre que es un proceso que consiste en establecer un procedimiento de medición adecuado a partir de un trabajo de medición y de la incertidumbre objetivo, utilizando las técnicas de balance de incertidumbre.

En la parte 5 se dan las bases del método iterativo propuesto en esta norma. Este procedimiento consiste en que para un trabajo de medición dado, se establecen el principio de medición a usar, el método de medición, el procedimiento de medición y las condiciones de medición, procediendo luego a la estimación de la incertidumbre para ese proceso de medición, estableciendo un balance de incertidumbre obtenido sobreestimando los contribuyentes; el valor obtenido de la incertidumbre expandida (primera iteración) es comparado con la incertidumbre requerida u objetivo para ese proceso de medición, si la incertidumbre obtenida es menor que la incertidumbre objetivo se decide que el proceso de medición es adecuado, si por el contrario la incertidumbre obtenida es mayor que la incertidumbre requerida una nueva estimación (segunda iteración) será necesaria.

Antes de realizar la segunda iteración se requiere reconsiderar las hipótesis o mejorar el conocimiento del proceso de medición con el propósito de obtener una estimación inferior más exacta, nuevamente el resultado obtenido es comparado con la incertidumbre objetivo y si esta se ha alcanzado el proceso termina; de lo contrario una tercera y eventualmente más iteraciones serán necesarias. Un proceso de medición adecuado es aquel que resulta en una incertidumbre estimada de medición inferior o igual a la incertidumbre objetivo.

Cuando han sido agotadas las posibilidades de minimizar la incertidumbre con el proceso de

medición actual puede recurrirse a modificar las condiciones de medición y/o el procedimiento y/o el método, eventualmente el principio de medida o la incertidumbre objetivo, cambios que pueden ayudar a reducir la incertidumbre pero incrementan el costo del proceso de medición. Indudablemente la definición del trabajo de medición y de la incertidumbre objetivo son decisiones de la empresa que deben ser tomadas a un nivel de dirección apropiado. El deseo de una incertidumbre objetivo pequeña incrementa el costo pero también la confiabilidad. Por el contrario, una incertidumbre objetivo grande disminuye el costo pero también la confiabilidad de las mediciones.

En la parte 6 introduce el concepto PUMA (Procedure for Uncertainty Management) que es un método simplificado e iterativo para la estimación de la incertidumbre a nivel industrial. Está diseñado para probar que la incertidumbre actual es menor que la incertidumbre objetivo y no para encontrar la incertidumbre actual. Presenta varios ejemplos que lucen más accesibles que los presentados en NMX-CH-140:2002 IMNC.

La parte 7 presenta una lista de más de 110 posibles contribuyentes a la incertidumbre de la medición de longitud clasificándolos en 10 categorías.

La parte 8 presenta las herramientas para la estimación de los componentes de la incertidumbre, incertidumbre estándar y de la incertidumbre expandida.

Para las evaluaciones de tipo "A" cuando se hacen muy pocas mediciones repetidas multiplica la desviación estándar de la muestra por un factor de seguridad t en vez de la comúnmente usada "t" de student (el valor resultante es un poco mayor).

La parte 9 presenta la estimación práctica de la incertidumbre - Balance de incertidumbre con PUMA

La parte 10 presenta de manera general las siguientes aplicaciones:

Documentación y evaluación del valor de la incertidumbre, diseño y documentación del procedimiento de medición o de calibración, diseño optimización y documentación de la jerarquía de calibración (jerarquía de trazabilidad), diseño y documentación de un nuevo equipo de medición, requerimientos para la calificación del medio ambiente y requerimientos para la calificación del personal de medición.

El anexo A (informativo) presenta un ejemplo de balance de incertidumbre para la calibración de un anillo de ajuste.

El anexo B (informativo) presenta ejemplos de balances de incertidumbres para el diseño de una jerarquía de calibración (jerarquía de trazabilidad) que incluye:

- La medición del diámetro local con un micrómetro de exteriores
- La calibración de un micrómetro de exteriores
- Los requisitos de calibración de los patrones empleados en la calibración de un micrómetro de exteriores y
- La utilización de un patrón de control como complemento a la calibración.

En este ejemplo se exponen algunas consideraciones que concluyen que los planos y las paralelas ópticas no requieren calibración por un laboratorio acreditado cuando son usados para inspeccionar la planitud y paralelismo de las superficies de medición de los micrómetros de exteriores. Los planos y paralelas ópticas se deben sustituir por unos nuevos cuando estén rayados.

El Anexo C (informativo) presenta un ejemplo de balance de incertidumbre para medición de redondez.

3.1 REPETIBILIDAD Y RESOLUCIÓN

En la parte 8 también se menciona que, cuando la incertidumbre debida a la repetibilidad se obtiene de datos experimentales el efecto de la resolución se considera ya incluido, si la componente de incertidumbre de repetibilidad es mayor a la componente basada en la resolución y que, si la componente de incertidumbre basada en la repetibilidad es inferior a la componente de incertidumbre basada en la resolución entonces debe considerarse esta última y no la basada en la repetibilidad.

De lo anterior se concluye que deben determinarse las dos pero a la hora de combinarlas sólo se considera la mayor de las dos; por ejemplo si se utiliza un instrumento con resolución (d) de $1\text{ }\mu\text{m}$ se tendrá:

$$u_{\text{RES}} = d/2\sqrt{3} = 1\text{ }\mu\text{m}/2\sqrt{3} = 0,29\text{ }\mu\text{m}$$

u_{REP} obtenida de mediciones repetitivas es de $0,15\text{ }\mu\text{m}$

Entonces se considerará $u_{\text{RR}} = 0,29\text{ }\mu\text{m}$ siendo u_{RR} la mayor de u_{RES} y u_{REP} .

Si en otro caso se tiene

$$u_{\text{RES}} = d/2\sqrt{3} = 1\text{ }\mu\text{m}/2\sqrt{3} = 0,29\text{ }\mu\text{m}$$

u_{REP} obtenida de mediciones repetitivas es de $0,35\text{ }\mu\text{m}$

Entonces se considerará $u_{\text{RR}} = 0,35\text{ }\mu\text{m}$ siendo u_{RR} la mayor de u_{RES} y u_{REP} .

Lo anterior entra en conflicto con la práctica, que por más de 10 años se ha tenido, de considerar tanto la repetibilidad como la resolución al momento de combinarlas con otras fuentes. Con el propósito de tratar de explicar el enfoque adoptado en PROY-NMX-CH-14253-2-IMNC-2003 se comentan a continuación algunos puntos.

El documento discutido aquí es más reciente que NMX-CH-140:2002 IMNC y de aplicación más específica (dimensional). Llamando la atención que en este documento en general se tiende a sobreestimar la incertidumbre pero en el caso de la repetibilidad y resolución, se recomienda utilizar sólo la mayor de las dos. Tal vez se esta considerando que se cuenta 2 veces (en caso de considerar las dos) cosa que NMX-CH-140:2002 IMNC advierte en 4.3.10. Aunque sólo debe incluir uno de los componentes, frecuentemente resultan valores muy similares. Al considerar el mayor de los dos se evita subestimar si sólo se considerará siempre uno de los dos.

En 3.3.2 de NMX-CH-140-IMNC-2002 se presenta una lista de fuentes posibles de incertidumbre en una medición, considerándose en f) la resolución finita del instrumento o umbral de discriminación finito y en j) las variaciones en observaciones repetidas del mensurando bajo condiciones aparentemente iguales indicándose a continuación que estas fuentes no son necesariamente independientes y algunas de las fuentes desde a) hasta i) pueden contribuir a la fuente j).

En el apéndice D (no obligatorio) de ASME B89.7.3.1-2001 [6] se menciona que el error sistemático y la reproducibilidad del instrumento no deben incluirse en el análisis de la incertidumbre dado que estas son las características metrológicas a determinar. Sólo la raíz cuadrada de la suma de

cuadrados de la incertidumbre por la resolución del instrumento y la incertidumbre del patrón usado. Esta norma es la versión Estadounidense de ISO 14253-1:1998.

La idea de que, cuando la repetibilidad o la resolución es muy pequeña comparada con la otra, la menor puede dejar de considerarse no se discute.

Consideremos el caso de la calibración de cintas métricas con valor de mínima división (resolución) de 1 mm que puede calibrarse utilizando una lente de aumento 10X con retícula graduada en 0,1 de mm, también pueden calibrarse con ayuda de un cabezal de microscopio o una cámara CCD y una escala con resolución de 0,001 mm y eventualmente pueden calibrarse con una cámara CCD y un láser. En cada caso la componente de incertidumbre por resolución se hace cada vez más pequeña y puede omitirse sin mayor problema. Una situación como la anterior rara vez ocurre en la práctica, no disponemos de equipos con mejor resolución y exactitud.

El caso contrario, cuando la repetibilidad se hace pequeña comparada con la resolución, implica que la resolución del patrón no es la apropiada. Por ejemplo, en la calibración de reglas con división mínima de 1 mm si se utilizan los mismos equipos mencionados antes para las cintas, pueden obtenerse desviaciones de cero y repetibilidad cero si se utiliza la lente de aumento de 10X con retícula graduada en 0,1 de mm. Se requiere utilizar un equipo con mejor resolución, lo anterior resulta más cierto conforme la exactitud de la regla aumenta aún cuando la mínima división siga siendo de 1 mm.

En ocasiones la repetibilidad parece hacerse mayor con respecto a la resolución, debiendo en estos casos, examinar especialmente en medición la variación de forma del mensurando. Si la variación de forma esta presente, debe evaluarse por separado y combinarse con las otras componentes.

El caso más conflictivo y más frecuente es que las componentes de incertidumbre derivadas de la resolución y la repetibilidad tengan valores muy similares. En este caso la relación repetibilidad/resolución es cercana a 1. Si la relación se hace menor que 1 quiere decir que el equipo de calibración/medición no es apropiado (caso de las reglas) y necesita emplearse un equipo con mejor resolución. Si la relación se hace mayor que 1 (caso de las cintas) quiere decir que se esta empleando un equipo con resolución y exactitud mejor que la

estrictamente necesaria. Los ejemplos anteriores sólo se han utilizado para tratar de ilustrar el punto de que cuando el equipo es apropiado la repetibilidad y la resolución tienden a ser iguales.

El diseño de instrumentos de medición generalmente implica que su resolución este acorde con la repetibilidad que puede proporcionar. Así por ejemplo un calibrador digital con resolución de 0,01 mm tendrá una repetibilidad de 0,01 mm y esto por lo tanto resulta apropiado para medir piezas con tolerancia de 0,1 mm o mayor. Cuando en una medición se obtienen valores de repetibilidad por arriba del especificado debe investigarse la razón de esto, por ejemplo, la variación de forma de la pieza a medir o el desgaste de un patrón bajo calibración e incluso la habilidad del operador haciendo las mediciones.

4. PROY-NMX-CH-16015-IMNC-2004

El efecto de la temperatura en medición dimensional es generalmente subestimado por las personas que realizan mediciones a nivel industrial. Algunos factores tales como: el costo de mantener la temperatura controlada en los lugares en que se realizan las mediciones, la dificultad para monitorear temperaturas mientras se mide, la falta de conocimiento para hacer correcciones y la contribución de la temperatura a la incertidumbre de medición son causas comunes de la subestimación de los efectos de la temperatura.

La decisión de hacer o no correcciones a los resultados de mediciones es una decisión administrativa basada en costos y riesgos, pero dado que las tolerancias se han ido reduciendo con el paso del tiempo, se hace actualmente necesario el medir temperaturas, conocer coeficientes de expansión térmica y efectuar correcciones para lo cual la información proporcionada en PROY-NMX-CH-16015-IMNC-2004 es muy útil.

La parte 3 de este documento contiene la definición de casi 30 términos relacionados con coeficientes de expansión térmica, la expansión térmica, consecuencias dimensionales de la variación de temperatura, instrumentos de medición, procedimientos de medición y metrología.

La parte 4 lista símbolos y términos abreviados.

La parte 5 describe el procedimiento a seguir cuando se hacen mediciones de longitud incluyendo entre otras cosas la determinación de temperaturas relevantes y su incertidumbre, evaluar los

coeficientes de expansión térmica y sus incertidumbres, determinar la incertidumbre debida a la variación de la temperatura del medio ambiente, la determinación de si se hará la corrección por los efectos térmicos o no, como se reportara el resultado de la medición y la componente de incertidumbre estándar debida a los efectos térmicos.

El anexo A (informativo) analiza temas tales como la estimación de las consecuencias de temperaturas promedio del medio ambiente diferentes de 20 °C, las consecuencias de las incertidumbres de los coeficientes de expansión térmica y temperatura, estimación de las consecuencias de la variación de la temperatura. Se describe un procedimiento para llevar a cabo ensayos de deriva considerando el equipo de ensayo, sistemas de registro de temperatura dando un ejemplo de resultados de ensayo de deriva.

En este anexo también se establece el concepto de sistema de tres elementos como algo muy común en metrología dimensional cuando se hacen mediciones por comparación, ilustrando gráficamente las variaciones de temperatura de cada uno de los tres elementos a través del tiempo. Con el propósito de analizar la importancia de los efectos térmicos en cualquier aplicación particular se introduce el concepto de índice de error térmico (TEI).

El anexo B (informativo) presenta un ejemplo de la incertidumbre en la medición de longitud debida a efectos térmicos que incluye la medición de una pieza usando un comparador, el modelo matemático, la evaluación de la incertidumbre, la incertidumbre de la calibración de la longitud del patrón de trabajo, la incertidumbre de la diferencia en longitudes medida, la incertidumbre de los coeficientes de expansión térmica, la incertidumbre en las temperaturas, la incertidumbre en la medición de longitud debida a efectos térmicos y la determinación del índice de error térmico (TEI).

4.1 CORRECCIONES

Las correcciones para efectos sistemáticos significativos conocidos deben siempre aplicarse a los resultados de las mediciones antes de proceder a estimar la incertidumbre para ese proceso de medición.

Las correcciones en la calibración de instrumentos se dificulta porque se requiere contar con

termómetros de exactitud apropiada que permitan medir en tiempo real las temperaturas del patrón, del instrumento bajo calibración y la del aire (véase la fig. 1). Sin embargo esto es estrictamente necesario en la calibración de patrones de alta exactitud, por ejemplo, la calibración de bloques patrón largos haciéndose necesario además de controlar apropiadamente la temperatura del medio ambiente alrededor de la temperatura de referencia, el hacer correcciones utilizando sensores de temperatura apropiados (véase la fig. 2).



Fig. 1 Ejemplo de medición de temperaturas en la calibración de un calibrador vernier.

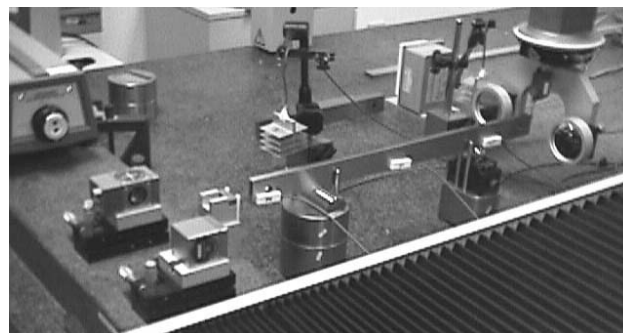


Fig. 2 Ejemplo de medición de temperatura para hacer correcciones en la calibración de bloques patrón largos.

En mediciones industriales las correcciones se dificultan aún más; afortunadamente, en la actualidad, equipos de medición como las máquinas de medición por coordenadas y otros están provistos de sensores de temperatura que toman la temperatura de las escalas de lectura y otros que se colocan sobre la pieza a medir haciendo las correcciones necesarias para que las mediciones sean reportadas como si se hubieran hecho a 20 °C. El coeficiente de expansión térmica

de la pieza a medir, debe ser conocido y alimentado al sistema de procesamiento de datos.

En la actualidad la incertidumbre asociada con los coeficientes de expansión térmica es de aproximadamente 10% requiriéndose en el futuro que esta sea cuando más del 1%. Diversos laboratorios en el mundo están trabajando para determinar con incertidumbres bajas los coeficientes de expansión térmica de bloques patrón y otros patrones. En el futuro, para obtener incertidumbres de calibración bajas, deberá calibrarse el coeficiente de expansión térmica además de la longitud del patrón.

5. CONCLUSIONES

La determinación de la incertidumbre de las mediciones se ha estado incluyendo como requerimiento en diversos documentos, por ejemplo, en el VIM (NMX-Z-055) [4] se incluye como parte de la definición de trazabilidad es decir no puede demostrarse la trazabilidad, si no esta asociada la incertidumbre en cada comparación de la cadena ininterrumpida. Aunque en ISO 9000 de 1994 [7] se incluía el requisito de determinar la incertidumbre de medición para todas las mediciones y en la versión ISO 9000-2000 [8] parece no estar incluida sin embargo este requerimiento se ha trasladado a diversos documentos de carácter técnico, por ejemplo todas las normas desarrolladas por el comité técnico 213 de ISO que invariablemente mencionan las 4 referencias básicas. En otros casos; por ejemplo, para los laboratorios de proveedores de la industria automotriz en su documento ISO/TS 16949 [4] recomienda usar ISO 17025 [4] que implica la determinación de la incertidumbre y todos los laboratorios que mantienen acreditación con ISO 17025 deben determinar la incertidumbre de todos las calibraciones y ensayos cubiertos por el alcance de la acreditación.

Ante la creciente necesidad de estimar la incertidumbre de medición desde mediciones simples hechas en la industria, calibraciones o ensayos realizados por laboratorios acreditados, hasta calibraciones realizadas por Institutos Nacionales de Metrología, diferentes documentos son necesarios para guiar a quienes tienen necesidad de estimar incertidumbres de medición. Cada uno de los documentos como los comentados aquí encuentran su campo de aplicación dependiendo de la aplicación en cuestión, el rigor necesario y el inevitable costo asociado.

Las personas haciendo calibraciones o mediciones en el área de la metrología dimensional sin duda encontraran respuestas a muchas de las dudas que actualmente se tienen sobre el efecto de la temperatura en la incertidumbre de medición y como elaborar un presupuesto completo de incertidumbre al estudiar y aplicar los documentos comentados aquí.

La 16015 ayudara a entender mejor los efectos térmicos en la calibración y medición dimensional así como a lograr estimaciones más apropiadas de la incertidumbre, la 14253-2 requiere mayor discusión.

REFERENCIAS

- [1] NMX-CH-14253-2-IMNC-2004 Especificaciones geométricas del producto (GPS) - Inspección por medición de piezas de trabajo y de equipo de medición.
- [2] PROY- NMX-CH-16015 Errores sistemáticos y contribuciones a la incertidumbre de medición de mediciones de longitud debidas a influencias térmicas.
- [3] NMX-CH-140-IMNC-2002 (ISO 10360-1:2000) Especificaciones geométricas de producto (GPS) - Verificación periódica para máquinas de medición por coordenadas (CMM) - Parte 1: Vocabulario
- [4] NMX-Z-055:1996 IMNC Metrología-Vocabulario de términos fundamentales y generales (Metrology-vocabulary of basic and general terms)
- [5] ISO 14253-1:1998 Geometrical Product Specifications (GPS) - Inspection by measurement of workpieces and measuring equipment Part 1: Decision rules for proving conformance or non conformance with specifications.
- [6] ASME B89.7.3.1-2001 Guidelines for decision rules: considering measurement uncertainty in determining conformance to specifications.
- [7] NMX-CC-003:1995 IMNC (ISO 9001:1994) Sistemas de calidad – Modelo para el aseguramiento de la calidad en diseño, desarrollo, producción, instalación y servicio.
- [8] ISO/TS 16949 Quality management systems – Particular requirements for the application of ISO 9001:2000 for automotive production and relevant service part organizations.
- [9] NMX-EC-17025-IMNC-2000 (ISO/IEC 17025:1999) Requisitos generales para la competencia de los laboratorios de ensayo y de calibración.