

# **Guía Técnica de Trazabilidad Metrológica e Incertidumbre de Medida en Metrología Dimensional**

**México, diciembre de 2013**

**Derechos reservados ©**

## PRESENTACIÓN

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

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

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

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

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

acreditados de calibración y ensayo, encontrarán en las Guías una referencia técnica de apoyo para el aseguramiento de las mediciones.

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

Diciembre 2013

**Dr. Héctor O. Nava Jaimes**

Director General

Centro Nacional de Metrología

**María Isabel López Martínez**

Directora Ejecutiva

entidad mexicana de acreditación, a.c.

## AGRADECIMIENTOS

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

## GRUPO DE TRABAJO

### QUE PARTICIPÓ EN LA ELABORACIÓN DE ESTA GUÍA TÉCNICA

|                                |                                 |
|--------------------------------|---------------------------------|
| Dr. Miguel Viliesid Alonso     | CENAM                           |
| Ing. Ramón Zeleny Vázquez      | MITUTOYO Mexicana, S.A. de C.V. |
| Ing. René Pichardo Vega        | CENAM                           |
| Ing. Mario Díaz Orgaz          | CIDESI                          |
| Ing. Carlos Colín Castellanos  | CENAM                           |
| M. en C. Héctor González Muñoz | CENAM                           |

Revisión de la presente versión:

|                                   |                                 |
|-----------------------------------|---------------------------------|
| Ing. René Pichardo Vega           | CENAM                           |
| Dr. Miguel Viliesid Alonso        | CENAM                           |
| M. en C. Martha Gutiérrez Munguía | KALIBRIX Mexicana, S.A. de C.V. |
| Ing. David Correa Jara            | ema, a.c.                       |
| Ing. Carlos Rangel Herrera        | ema, a.c.                       |

## ÍNDICE

|  |    |
|--|----|
| PRESENTACIÓN.....  | 2  |
| AGRADECIMIENTOS .....  | 4  |
| GRUPO DE TRABAJO .....   | 4  |
| 1. PROPÓSITO DE LA GUÍA TÉCNICA.....   | 6  |
| 2. ALCANCE DE LA GUÍA TÉCNICA.....   | 7  |
| 3. PARTE A.....  | 7  |
| 4. PARTE B .....   | 15 |
| 5. REFERENCIAS .....   | 34 |
| ANEXO A. ESTIMACIÓN DE LA INCERTIDUMBRE DE MEDIDA CUANDO NO SE HACEN CORRECCIONES..... | 36 |
| ANEXO B. EXPRESIÓN DE LA INCERTIDUMBRE DE MEDIDA EN METROLOGÍA DIMENSIONAL .....       | 38 |

## 1. PROPÓSITO DE LA GUÍA TÉCNICA

La presente Guía Técnica se ha dividido en dos partes, cada una con un propósito distinto:

### **Parte A - Requisitos Específicos para la Calibración y Estimación de Incertidumbres en Metrología Dimensional**

Esta parte establece requisitos técnicos específicos aplicables a la calibración de instrumentos y patrones en Metrología Dimensional (MD) adicionales a los requisitos generales que establece la norma NMX-EC-17025-2006 [12] en su capítulo 5 referente a requisitos técnicos. Se estima que estos requisitos son los mínimos necesarios para aplicarse en forma general a cualquier laboratorio que calibre instrumentos o patrones de MD.

Los requisitos son complementarios, en el sentido que precisen o interpretan algún requisito de la NMX-EC-17025-IMNC-2006 [12] para el campo de calibración en MD; o bien, suplementarias para el caso que se estime necesario algún requisito adicional. Estos últimos se mantienen en un estricto mínimo que se creen necesarios y de ninguna manera el presente documento pretende suplantar a la NMX-EC-17025-IMNC-2006 [12] sino más bien, crear un apéndice a la misma.

Adicionalmente, el presente documento favorecerá la consistencia y uniformidad de los balances de incertidumbre<sup>1</sup> de los laboratorios que solicitan acreditación ante la ema.

Asimismo, pretende homologar los criterios técnicos para la estimación de incertidumbre de las mediciones entre los evaluadores y así facilitar y evitar conflictos durante los procesos de evaluación.

Esta Parte A, da respuesta al requisito que establece al respecto el punto 7.1.2 b) de la norma NMX-EC-17011-IMNC-2005 [18] aplicado al campo específico de la MD y se elabora bajo los lineamientos y requisitos del Anexo B de la NMX-EC-17025-IMNC-2006 [12].

### **Parte B - Guía Técnica sobre Trazabilidad Metrológica y Estimación de la Incertidumbre de Medida en MD**

En esta parte se emiten comentarios, lineamientos, requisitos e incluso se ilustra con algunos ejemplos aspectos relacionados con la trazabilidad metrológica y la estimación de incertidumbres con el fin de aclarar conceptos, simplificar cálculos, emitir advertencias y capacitar en estos dos temas a las personas relacionada con las actividades de calibración en MD.

---

<sup>1</sup> También llamado presupuesto de incertidumbre.

Esta “Guía Técnica sobre Trazabilidad Metrológica e Incertidumbre de Medida en Metrología Dimensional” pretende facilitar la aplicación de las normas NMX-EC-17025-IMNC-2006 [12] y NMX-CH-140-IMNC-2002 [1], sin sustituirlas ni modificarlas.

## 2. ALCANCE DE LA GUÍA TÉCNICA

El presente documento aplica a todo servicio de calibración o medición de MD ofrecido por un laboratorio de calibración acreditado o en proceso de acreditación por la EMA. Se entiende por calibración o medición de MD a toda acción que involucre la calibración de instrumentos o patrones de longitud, distancia, posición en el plano o el espacio, forma o ángulo; así como todos los parámetros relativos que se pudiesen definir como redondez, alabeo, concentricidad, etc., así como los utilizados en acabado superficial.

La Parte A es aplicable a todos los servicios de calibración que pueden ser acreditados en MD. La Parte B es una guía para los laboratorios que calibran instrumentos y está basada en la aproximación simplificada planteada en la referencia [2]. Para los laboratorios que calibran patrones de alta exactitud<sup>2</sup> se recomienda recurrir a información más especializada, como las referencias [6] y [7]; y que traten de apegarse más a los métodos de mayor rigor planteados en la referencia [1]. Para ambos se recomienda estudiar y aplicar los conceptos de la referencia [3].

## 3. PARTE A

A continuación se enuncian los requisitos técnicos específicos complementarios o suplementarios que deben cumplir los laboratorios acreditados o en proceso de acreditación. Entre paréntesis se indican los puntos del capítulo 5 de la NMX-EC-17025-IMNC-2006 [12] a los que se refiere<sup>3</sup>.

### 3.1. Personal (5.2)

El laboratorio debe distinguir entre al menos dos tipos de personal: el primero, que se puede llamar, técnico, es quien realiza las operaciones rutinarias de calibración; el segundo, que se puede llamar, gerente técnico, quien es responsable de los procedimientos de calibración utilizados, de los balances de incertidumbres, de los informes emitidos y de todas las actividades relacionadas con el servicio de calibración de cara al cliente. Una sola persona puede tener ambas responsabilidades dependiendo de cada organización y del tamaño de la misma. En cuanto a los conocimientos de cada una de las categorías se recomienda:

- Técnico: Debe manejar los equipos e instrumentos de medida con destreza; saber limpiarlos, empacarlos, inspeccionarlos y tomar lecturas. Debe estar perfectamente familiarizado con las

<sup>2</sup> Como bloques patrón, anillos patrón, etc.

<sup>3</sup> No todos los incisos del capítulo 5 requieren de requisitos complementarios o suplementarios.

técnicas de medida y los instrumentos utilizados. Debe apegarse a los procedimientos hechos para la operación rutinaria del laboratorio. Debe haber recibido el entrenamiento adecuado para estas tareas y ser capaz de identificar cuando la temperatura, las lecturas o alguna otra condición es incorrecta, inconsistente o sospechosa. Debe tener conocimientos básicos de los principios de medida aplicados, y al menos entender los conceptos de: valor nominal, error de medida, exactitud de medida, repetibilidad de medida, incertidumbre de medida y trazabilidad metrológica. Siempre debe recurrir al gerente técnico cuando surjan problemas por encima de su nivel de conocimientos.

- Gerente Técnico<sup>4</sup>: Debe comprender el proceso completo de calibración. Debe entender con claridad el principio de medida y ser responsable de los procedimientos de calibración usados por el técnico. Debe tener conocimientos de estimaciones de incertidumbres, ser responsable del balance de las incertidumbres correspondiente y poder explicarlo. Se requiere que supervise las calibraciones, revise los informes expedidos y debe ser responsable de los resultados asentados en ellos ante el cliente. Debe tener conocimientos de sistemas de gestión de la calidad y de la NMX-EC-17025-IMNC-2006 [12]. Debe apoyar al técnico cuando éste encuentre dificultades, así como ser capaz de confrontar los problemas que surjan y tomar decisiones al respecto. Debe haber recibido entrenamiento para las actividades antes mencionadas y mantenerse actualizado en el estado del arte de las calibraciones bajo su responsabilidad.

### 3.2. Instalaciones y condiciones ambientales (5.3)

Se debe contar con un área suficiente para poder operar con comodidad los equipos, patrones e instrumentos sin riesgo para ellos ni para los operarios. Asimismo, el volumen del recinto debe ser lo suficientemente grande para que el calor humano y de los equipos no afecte mayormente la temperatura de las áreas donde se trabaja. Es recomendado no tener ventanas al exterior y, de haberlas, la luz no debe incidir directamente sobre el área de calibración. El acceso al laboratorio debe permanecer cerrado durante la calibración. Si hay poco espacio, la presencia de más de dos personas durante la calibración debe evitarse para prevenir accidentes al manipular los equipos y para evitar perturbaciones de temperatura. Por supuesto, se puede trabajar en un área más grande siempre y cuando el resto de los requisitos se cumplan.

Si se llevan a cabo otras actividades en el mismo lugar, éstas no deben interferir con la calibración en cuestión.

La temperatura es la variable de influencia más relevante en MD. La temperatura de referencia normalizada [17] es de 20 °C y en general, cualquier laboratorio de MD deberá garantizar esta temperatura en  $\pm 2$  °C dentro del recinto del laboratorio y a lo largo del día. Para esto el laboratorio debe contar con instrumentación para monitorear la temperatura ambiente con una resolución de al

---

<sup>4</sup> O como se le denomine.

menos 0.5 °C, y para demostrarlo que guarde un registro de varias lecturas por hora que permita elaborar gráficas.

En caso de que el laboratorio apague la climatización durante los fines de semana u otro periodo, debe especificar en sus procedimientos el tiempo de estabilización necesario para poder comenzar a calibrar. Este tiempo no podrá ser inferior a dos horas y en caso de utilizar instrumentos de grandes dimensiones o mayor exactitud, especificará tiempos mayores.

En caso de calibración de patrones o instrumentos de alta exactitud, como bloques o anillos patrón, por ejemplo, es necesario un control de temperatura en la zona de calibración mejor que  $\pm 0.5$  °C; requiriéndose además monitorear este control con un instrumento calibrado con resolución de 0.05 °C, de acuerdo al tipo de instrumento o patrón bajo calibración y a la incertidumbre que de dicho servicio se declare.

Existen equipos que se instalan en forma permanente en un lugar como son las máquinas universales unidimensionales de medición en sitio, los rugosímetros de banco, los calibradores de indicadores, las CMM, comparadores de bloques patrón, etc. Todos estos equipos, que en su mayoría son de alta exactitud, deben estar instalados en lugares con control de temperatura y evidentemente la calibración siempre se debe efectuar en sitio. Sin embargo, el prestador de servicio de calibración debe efectuarlo midiendo en forma independiente la temperatura al momento de la calibración mediante un termómetro calibrado de su propiedad con resolución de 0.05 °C. De hacerse la calibración por interferometría, deberá además corregir por presión atmosférica y humedad con la instrumentación que emplee.

Por otro lado sólo se podrán calibrar en sitio instrumentos de tipo industrial como micrómetros, calibradores, indicadores de carátula y otros instrumentos de esta índole y será indispensable utilizar un termómetro calibrado con resolución de 0.1 °C, para registrar durante el proceso de calibración la temperatura.

El laboratorio debe mantenerse siempre limpio y debe cuidarse que el sistema de aire acondicionado inyecte aire limpio<sup>5</sup>. El aire al interior del laboratorio no debe contener polvo abrasivo ni elementos corrosivos y la humedad debe mantenerse entre 35 % y 65 % HR<sup>6</sup>.

Para el monitoreo de la humedad, bastará con un higrómetro con una resolución 5 % HR.

La iluminación debe ser suficientemente buena para llevar a cabo las operaciones con facilidad. Se prefiere la luz fluorescente respecto a la incandescente pues produce menos calor.

<sup>5</sup> Sin embargo, no se requiere de ningún tipo de filtrado especial a parte del que comúnmente incorporan los sistemas de aire acondicionado.

<sup>6</sup> El control de humedad solamente es necesario para evitar oxidación de equipo de acero o cuando se hacen mediciones interferométricas. En este último caso, la HR deberá ser medida.

Se debe trabajar sobre mesas de trabajo robustas o, en caso de ser necesario, mesas masivas libres de perturbaciones como golpes o vibraciones<sup>7</sup>. Por lo tanto, se recomienda establecer el laboratorio lejos de fuentes de perturbaciones como máquinas rotatorias, vías de ferrocarril o calles cercanas con tráfico pesado.

El laboratorio debe mantenerse en orden en todo momento. Se deben colocar tantas etiquetas y letreros como se requieran. Se recomienda indicar claramente el lugar donde se coloca el equipo para estabilizarse térmicamente, así como dónde colocar los patrones de referencia, para evitar confusión.

### **3.3. Validación de métodos de calibración (5.4)**

#### 3.3.1. Selección de los métodos (5.4.2)

En MD existen pocos métodos de calibración normalizados. Cuando estos existan, el laboratorio deberá apegarse a dichos métodos. No obstante, se considera como método normalizado aquel que represente la práctica común y el consenso de la especialidad para calibrar determinado tipo de instrumentos.

Por ejemplo, calibración de un micrómetro mediante bloques patrón. Cuando se utilice un método novedoso que no es parte de la práctica común, se podrá solicitar la validación del método.

#### 3.3.2. Métodos desarrollados por el laboratorio (5.4.3, 5.4.5)

Los laboratorios son libres de desarrollar sus propios métodos de calibración que pueden diferir sustancialmente de la práctica común y del consenso. Sin embargo, deberán sustentar dichos métodos en publicaciones científicas que lo validen o, en caso de no existir, en un ensayo de aptitud que lo valide como una comparación y/o una prueba por artefactos<sup>8</sup>.

#### 3.3.3. Validación de métodos no normalizados (5.4.5.2)

En caso de requerir la validación de algún nuevo método, por lo general el laboratorio puede optar por alguno de los siguientes ensayos de aptitud:

- Si es posible, una prueba por artefactos con el CENAM.
- Una comparación directa con el CENAM (en caso de tener incertidumbres muy pequeñas).

<sup>7</sup> Las lecturas inestables de un instrumento pueden ser la mejor indicación de que existen perturbaciones.

<sup>8</sup> Por ejemplo, para calibrar bloques patrón contra bloques de nominales distintos, se deberá efectuar una prueba por artefactos o comparación que demuestre que los valores obtenidos están dentro de las incertidumbres especificadas.

- Participación en ensayos de aptitud de nivel internacional coordinados por la ema.
- Participación en ensayos de aptitud de nivel nacional de algún proveedor de ensayos de aptitud reconocido por la ema.
- Participación en ensayos de aptitud de nivel internacional coordinados por algún otro proveedor de ensayos de aptitud reconocido.
- Comparación con resultados de otros laboratorios internacionales.
- Comparación con resultados de otros laboratorios nacionales acreditados.
- Comparación documentada con alguna otra técnica que sí esté probada y reconocida.
- Los otros puntos indicados en 5.4.5.2 de NMX-EC-17025-IMNC-2006 [12].

Se prefiere el orden mencionado debiendo estar la actividad documentada apropiadamente, los resultados obtenidos y las acciones correctivas aplicadas en caso de que los resultados no hayan sido satisfactorios, de acuerdo a la Política de Ensayos de Aptitud de la ema.

### **3.4. Estimación de la incertidumbre (5.4.6)**

3.4.1. Se establecen a continuación los requisitos mínimos indispensables para la estimación de la incertidumbre de medida.

3.4.2. Los laboratorios acreditados o por acreditarse deben contar con los balances de incertidumbres documentados de cada uno de los servicios de calibración incluidos o por incluir en el alcance de la acreditación. Estos documentos deben estar a disposición del grupo evaluador en todo momento.

3.4.3. En caso de patrones de calibración e instrumentos de alta exactitud<sup>9</sup>, se debe considerar un modelo matemático explícito del mensurando y combinar los contribuyentes de incertidumbre con los coeficientes de sensibilidad correspondientes, como lo propone la referencia [1] y concretamente el ejemplo H1 de dicha referencia. Para instrumentos de media y baja exactitud, el modelo matemático de medición se simplifica de modo que basta considerar la combinación cuadrática de los contribuyentes de incertidumbre con coeficientes de sensibilidad simplificados<sup>10</sup>, como lo propone la referencia [2].

<sup>9</sup> A manera de ejemplo, los micrómetros, calibradores, indicadores de carátula, etc. están considerados como instrumentos de media y baja exactitud, mientras que los patrones (bloques patrón, anillos, etc.) o los interferómetros láser y algunos otros sistemas de medición; como de alta exactitud. El establecimiento de un instrumento en alguna de las dos categorías se hace a criterio, conforme a las aplicaciones para las que se utilice el mismo. Sin embargo, como regla práctica se consideran de alta exactitud a los instrumentos cuyo cociente *Resolución del Instrumento / Intervalo de Medición* sea inferior a  $1 \times 10^{-5}$ .

<sup>10</sup> La forma más sencilla de combinar incertidumbres en la calibración de instrumentos supone un modelo implícito de medición de la forma:

$$l = l_p + x + \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 + \dots + \varepsilon_n$$

Donde:  $l$  es el mensurando, es decir, la longitud medida,  
 $l_p$  es la longitud del patrón con el que se compara,

3.4.4. El balance de incertidumbres debe mostrar los contribuyentes de la incertidumbre<sup>11</sup> considerados, la forma cómo se estima cada uno de ellos, cómo se combinan, cómo se calcula la incertidumbre expandida y cómo se declara la incertidumbre en el informe final (véanse secciones 4.2 y 4.3).

3.4.5. Para cada servicio especificado en el alcance de la acreditación, debe elaborarse la memoria de cálculo de la estimación de la incertidumbre con valores reales (véanse ejemplos en la sección 4.3).

3.4.6. Al final de cada estimación, debe presentarse un resumen del balance de incertidumbre en forma tabular que contenga, para los instrumentos de media y baja exactitud, como mínimo, las columnas especificadas en la siguiente tabla:

**Balance de incertidumbres de medida**

| No.  | Contribuyente incertidumbre | Tipo de distribución | Contribución $u_{Labi}(y) \mu m$ | Contribución $u_i(y) \mu m$ | $[u_i(y)]^2$ | Contribución (%) <sup>12</sup> |
|--|-----------------------------|----------------------|----------------------------------|-----------------------------|--------------|--------------------------------|
| 1  |                             |                      |                                  |                             |              |                                |
| 2  |                             |                      |                                  |                             |              |                                |
| ...  |                             |                      |                                  |                             |              |                                |
| n  |                             |                      |                                  |                             |              |                                |
| Suma de varianzas ( $\sum u_i^2$ ) =       |                             |                      |                                  |                             |              | 100 %                          |
| Incertidumbre Estándar Combinada ( $u$ ) = |                             |                      |                                  |                             |              | $U$                            |
| Incertidumbre Expandida ( $U$ ) =          |                             |                      |                                  |                             |              | redondeada                     |

Tabla 1.- En la primera columna se enumeran los contribuyentes de incertidumbre. En la segunda columna se describe claramente el contribuyente considerado (patrón de calibración utilizado, paralelismo, expansión térmica, etc.). En la tercera columna aparece el tipo de distribución (normal, rectangular, U, etc.). En la cuarta columna aparecen los contribuyentes del laboratorio, esto es, son aquellos contribuyentes que son inherentes o fijos del laboratorio. En la quinta columna, el valor numérico de la contribución a la incertidumbre de cada contribuyente expresada como

$x$  es el error de medida determinado, es decir, la diferencia entre el mensurando y la longitud del patrón determinada al hacer la calibración;

las  $\varepsilon_i$  son los errores correspondientes a cada uno de los contribuyentes considerados.

Usualmente, se considera que estos errores no identificados tienen una determinada distribución simétrica en torno a cero por lo que no se hacen correcciones adicionales. Al aplicar la ecuación para el cálculo de la incertidumbre estándar combinada,  $u_c$ , se obtienen una expresión con coeficientes de sensibilidad iguales a uno de la forma:

$$u_c^2 = u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 + \dots + u_n^2$$

donde:  $u_c$  es la incertidumbre estándar combinada y

las  $u_i$  son las incertidumbres correspondientes a los errores  $\varepsilon_i$ .

<sup>11</sup> A los contribuyentes de la incertidumbre también se les llama componentes, fuentes de incertidumbre, variables de influencia o magnitudes de entrada.

<sup>12</sup> La varianza se define como el cuadrado de la desviación estándar  $u_i$ .

incertidumbre estándar<sup>13</sup>. En la sexta columna la varianza del contribuyente. La séptima columna indica el porcentaje de contribución de cada varianza a la suma de las varianzas. En la parte inferior se mostrará la suma de las varianzas (correspondiente al 100 %) seguido verticalmente de la incertidumbre estándar combinada y de la incertidumbre expandida obtenida; y al lado derecho de estos valores el valor redondeado de la incertidumbre expandida como resultado.

3.4.7. Corrección de Errores. Hay algunos casos de calibración en las cuales, por razones prácticas o porque no son muy relevantes, no se efectúan correcciones de errores que puedan identificarse o incluso estén identificados. Esto es una práctica establecida y se puede hacer siempre y cuando se considere este hecho al estimar la incertidumbre. A la incertidumbre expandida de la medición correspondiente, estimada como si se hiciese dicha corrección se le debe sumar aritméticamente<sup>14</sup> el error máximo que no se está corrigiendo. Esto dará un valor mayor de la incertidumbre que compensa precisamente el hecho de no haber efectuado la corrección. En el anexo A se da una explicación justificativa gráfica.

3.4.8. Repetibilidad y Resolución. Para instrumentos de baja resolución y en buen estado de funcionamiento, puede ocurrir que la repetibilidad sea nula o casi nula. En estos casos se considerará la resolución del instrumento<sup>15</sup> en el lugar de la repetibilidad en el balance de incertidumbres. Para instrumentos de mayor resolución que permitan obtener valores de repetibilidad distintos de cero, se deberá calcular ésta, comparar su contribución con la de la resolución y considerar únicamente la mayor de las dos en el balance de incertidumbres.

3.4.9. Calibración contra nominales. Una situación común también es la calibración de instrumentos contra los valores nominales de patrones utilizados<sup>16</sup>. Esto se puede hacer y existen dos maneras de considerar la incertidumbre del patrón de calibración:

a. Considerar la tolerancia de la clase o grado del patrón de calibración utilizado para su estimación y suponer una distribución rectangular<sup>17</sup>, es decir:

$$U'_p = \frac{T}{\sqrt{3}}$$

Donde:

$U'_p$  es la incertidumbre expandida sin corrección

$T$  es la tolerancia de clase o grado.

<sup>13</sup> En el caso de instrumentos de alta exactitud en los que se considera los coeficientes de sensibilidad de cada contribuyente, se recomienda insertar dos columnas más después de la del la incertidumbre del contribuyente. En la primera donde aparezca el valor numérico del coeficiente de sensibilidad y en la segunda el producto de dicho coeficiente con la incertidumbre del contribuyente.

<sup>14</sup> Este acuerdo de tipo práctico no está en estricto apego a [1] ni es matemáticamente consistente pero [3] así lo recomienda.

<sup>15</sup> Es el caso de calibración de un micrómetro con bloques patrón, por ejemplo.

<sup>16</sup> Es el caso de calibración de un micrómetro con bloques patrón, por ejemplo.

<sup>17</sup> Es la más conservadora pero más sencilla de calcular.

- b. Considerar la incertidumbre de calibración y los errores obtenidos del patrón de calibración de calibración y calcular las incertidumbres sin aplicar correcciones como se describe en el punto 3.4.7.

En el anexo A se da una explicación gráfica de ambos métodos.

### **3.5. Trazabilidad metrológica de las mediciones (5.6)**

3.5.1. Toda calibración debe efectuarse con patrones e instrumentos calibrados y con trazabilidad a la definición de la unidad de longitud del SI, el metro, siempre que sea posible<sup>18</sup>.

3.5.2. La trazabilidad metrológica será demostrada mediante certificados emitidos por el CENAM o informes de calibración de un laboratorio con acreditación vigente al momento de realizar la calibración o en su caso ilustrada con cartas de trazabilidad, pero deberán existir los documentos probatorios.

3.5.3. La trazabilidad puede ser alcanzada de varias maneras:

- Calibrando directamente el patrón de calibración utilizado en la calibración en el CENAM.
- Calibrando en otro Instituto Nacional de Metrología (NMI<sup>19</sup>) extranjero que haya firmado el Arreglo de Reconocimiento Mutuo (MRA<sup>20</sup>) [6] del CIPM<sup>21</sup> y que tenga dicho servicio específico de calibración en el Apéndice “C” del MRA.
- Calibrando el patrón de calibración utilizado en un laboratorio de calibración acreditado por la ema para ese servicio específico.
- Calibrando el patrón de calibración utilizado en un laboratorio de calibración acreditado para ese servicio específico, nacional o extranjero, por un organismo acreditador que figure como signatario del MRA de la Cooperación Internacional sobre la Acreditación de Laboratorios (ILAC<sup>22</sup>) y de la Cooperación sobre la Acreditación de Laboratorios de Asia Pacífico (APLAC<sup>23</sup>).

3.5.4. Todas las calibraciones en MD, exceptuando las calibraciones que se realizan por interferometría, se hacen por comparación contra un patrón de calibración o instrumento “metrológicamente superior”, es decir, de mayor exactitud y con menor incertidumbre. Para las calibraciones típicas más conocidas, en general está bien establecida la superioridad metrológica del patrón de calibración utilizado respecto del instrumento calibrado. Por ejemplo, en el caso de la calibración de un micrómetro con bloques patrón. Sin embargo, para casos menos comunes, esta superioridad no es clara y se debe demostrar.

<sup>18</sup> Un ejemplo claro en MD es el de medición de planitud de superficies de contacto, por ejemplo las de un micrómetro, donde la *trazabilidad* es muy difícil de alcanzar. Ver referencia [19] para una explicación detallada del problema.

<sup>19</sup> Del inglés, *National Metrology Institute*.

<sup>20</sup> Del inglés, *Mutual Recognition Arrangement*.

<sup>21</sup> Conferencia Internacional de Pesas y Medidas.

<sup>22</sup> Del inglés. *International Laboratory Accreditation Cooperation*.

<sup>23</sup> Del inglés, *Asia Pacific laboratory Accreditation Cooperation*.

3.5.5. Puede suceder que el CENAM no cuente con un determinado servicio de calibración o no pueda ofrecer la incertidumbre requerida por el cliente<sup>24</sup>. En este caso deberá buscarse un NMI extranjero que cumpla con los requisitos del segundo punto del inciso 3.5.2 de este documento que sí lo ofrezca.

3.5.6. Puede suceder también que ningún laboratorio ofrezca un determinado servicio de calibración. En este caso deberá procederse al menos, a comparaciones de la misma medición por distintas técnicas para demostrar compatibilidad de resultados. Esto debe quedar debidamente documentado.

3.5.7. Los instrumentos que midan variables de influencia significativas cuyas lecturas sean utilizadas para efectuar correcciones deben ser calibrados con trazabilidad. Es el caso particular de la temperatura en MD. Los termómetros deben estar calibrados con trazabilidad.

3.5.8. No es imprescindible que los instrumentos de monitoreo, en particular los higrómetros, estén calibrados y, en menor medida, los termógrafos a menos que de ellos se estén tomando lecturas para efectuar correcciones. No obstante, se debe verificar que estén funcionando correctamente (que registren)<sup>25</sup>.

3.5.9. Existen otros contribuyentes a la incertidumbre cuya influencia es pequeña o despreciable y, por lo tanto, no es imprescindible que los patrones de los que dependen, estén calibrados con trazabilidad. Es el caso de los planos y paralelas ópticas para la verificación de las caras de medición de micrómetros (ver [18])<sup>26</sup>.

## 4. PARTE B

### 4.1. Comentarios Generales

Los contribuyentes de incertidumbre típicos en MD para calibración por comparación contra un patrón de calibración o instrumento de referencia son los siguientes<sup>27</sup>:

- a. Incertidumbre por resolución o por repetibilidad.
- b. Incertidumbre del patrón de calibración o instrumento de referencia.
- c. Incertidumbres por “Error de Abbe”
- d. Incertidumbre por “Error de Coseno”.
- e. Incertidumbre por “Error de Paralaje”.
- f. Incertidumbres por efectos de temperatura.
- g. Incertidumbre debida a la fuerza de contacto.

<sup>24</sup> E el caso, por ejemplo, de calibración de regletas de vidrio que requieran de incertidumbres mejores que 1,5  $\mu\text{m}$  en 150 mm ( $k = 2$ ).

<sup>25</sup> Exceptuado las mediciones interferométricas, la humedad no es una variable de influencia y se requiere controlar única y exclusivamente para que no sufran de oxidación los patrones e instrumentos de acero.

<sup>26</sup> El acuerdo al que se llegó, es que estos dispositivos deberán ser calibrados al menos una vez durante su vida útil, y deberán ser desechados cuando se observe que estén rayados o despostillados.

<sup>27</sup> En casos particulares pueden existir otras fuentes de incertidumbre no consideradas en esta lista.

- h. Incertidumbres debidas a la planitud y paralelismo entre caras de medición.
- i. Incertidumbre por apilamiento de patrones de calibración.

No todas ellas aplican para todos los instrumentos. Por ejemplo, un micrómetro común no presenta “Error de Abbe” y un instrumento digital no presenta “Error de Paralaje”. Por otro lado, algunos de estos contribuyentes pueden ser despreciados de antemano por tener un valor muy pequeño en relación con otros contribuyentes. Por ejemplo, la incertidumbre por fuerza de contacto en el caso de un micrómetro.

- La **incertidumbre por repetibilidad** se evalúa con el estimador estadístico de la desviación estándar de la media a partir de mediciones repetidas en un punto, considerando que la distribución es normal:

$$u_{rep} = \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (1)$$

Donde:

$n$  es el número de mediciones realizadas en un punto y  
 $s$  es la desviación estándar de las  $n$  mediciones<sup>28</sup>

Si el número de repeticiones es bajo debe darse un tratamiento estadístico apropiado véanse por ejemplo las referencias [2] y [8].

Se debe considerar que al sumar los contribuyentes de incertidumbres en forma cuadrática (varianzas), algunos sumandos resultan con valores muy pequeños respecto a los que tienen los valores más grandes por lo que pueden no ser considerados antes de combinarse, así como en cálculos subsecuentes. Por lo general, entre tres y seis contribuyentes de incertidumbre “dominan” el balance, es decir, contribuyen en conjunto con más del 90 % del valor de la incertidumbre estándar combinada. No obstante conviene documentar que se han considerado tales efectos, aun cuando en el cálculo no sean relevantes, con la finalidad de conservar dicho conocimiento.

La temperatura es de primordial relevancia como contribuyente a la incertidumbre en MD<sup>29</sup>. En mediciones de media y baja exactitud la temperatura ambiente simplemente se monitorea, no se mide la temperatura de los instrumentos y patrones y no se efectúan correcciones debidas a las dilataciones térmicas. Sin embargo, esto no significa que las incertidumbres correspondientes a dichos efectos no se consideren.

---

<sup>28</sup> La desviación estándar de una muestra de  $n$  mediciones se define cómo  $s = \sqrt{\frac{\sum(x_i - \bar{x})^2}{n-1}}$ . Este es el valor que por lo general calculan las calculadoras de bolsillo o las hojas de cálculo.

<sup>29</sup> Cuando es necesario hacer correcciones por efectos térmicos, la temperatura debe ser medida y monitoreada.

Existen al menos dos contribuciones a la incertidumbre por efectos térmicos que no pueden pasarse por alto y deben considerarse: la incertidumbre debida a la expansión térmica por llevar a cabo la calibración a una temperatura  $T$  distinta a la temperatura de referencia  $T_0$ ; y la incertidumbre debida a la diferencia de temperatura entre patrón de calibración y mensurando.

## 4.2. Ejemplo de la estimación de la incertidumbre en la calibración de un calibrador digital electrónico.

### 4.2.1. Objetivo

Determinar la incertidumbre de calibración de un calibrador digital electrónico (Fig. 1) con resolución de 0.01 mm e intervalo de medida de 0 mm a 150 mm mediante un maestro de longitudes fijas con pasos no-uniformes (Fig. 2) como patrón de calibración.

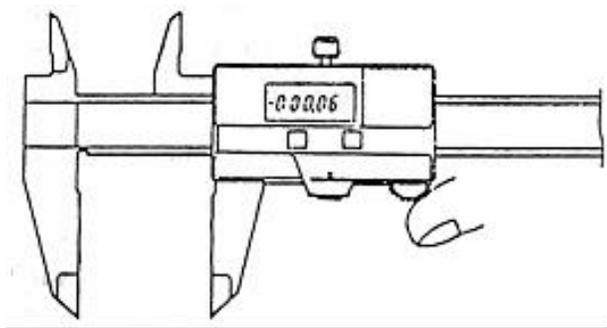


Figura 1. Calibrador digital electrónico.

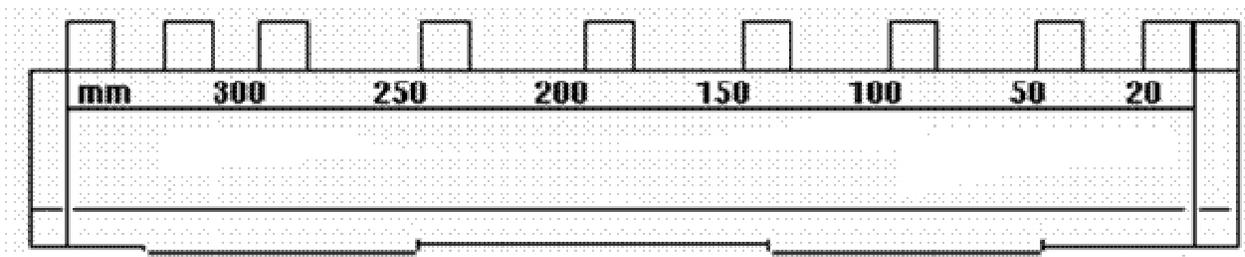


Figura 2. Maestro de longitudes fijas con pasos no - uniformes

### 4.2.2. Contribuyentes a la incertidumbre considerados

Tipo A: Incertidumbre por repetibilidad

Tipo B: Incertidumbre por resolución del calibrador digital  
Incertidumbre del patrón de calibración utilizado (maestro de longitudes fijas con pasos no-uniformes)  
Incertidumbre por “error de Abbe”  
Incertidumbres por efectos térmicos

#### 4.2.3. Incertidumbre por Repetibilidad, $u_{rep}$ .

La repetibilidad de la medida se evalúa con el estimador estadístico de la desviación estándar de la media a partir de mediciones repetidas en un punto, considerando que la distribución es normal (1):

$$u_{rep} = \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (1)$$

Este cálculo se repite en cada punto donde se calibre el instrumento y se toma la mayor contribución de todas.

#### 4.2.4. Incertidumbre debida a la Resolución del calibrador digital electrónico, $u_{res}$ .

La incertidumbre queda determinada por la mínima división del instrumento. Suponiendo una distribución rectangular, queda de la siguiente manera:

$$u_{res} = \frac{res}{2\sqrt{3}} \quad (2)$$

Donde:

$u_{res}$  es la incertidumbre estándar por resolución del calibrador

$res$  es la resolución del calibrador

Se tomará en cuenta en el balance el valor más grande entre repetibilidad y resolución.

#### 4.2.5. Incertidumbre del Maestro de Longitudes Fijas de Pasos No-Uniformes, $u_p$ .

Este es un caso típico de calibración contra nominales<sup>30</sup>. Aplicaremos la opción b del apartado 3.4.9<sup>31</sup>:

$$u_p = \frac{\text{Error Máx.}}{2} + u_{pc} \quad (3)$$

Donde:

$u_p$ <sup>32</sup> es la incertidumbre estándar ( $k = 1$ ) del maestro de longitudes fijas de pasos no uniformes

$u_{pc}$  es la incertidumbre estándar obtenida de la incertidumbre expandida ( $U_p$ ) de los informes de calibración como  $u_{pc} = \frac{U_p}{2}$ <sup>33</sup>

*Error Máx.* es el error máximo del patrón de calibración dentro del intervalo de medida del instrumento por calibrar (obtenida también del informe de calibración).

<sup>30</sup> Calibrar contra valores nominales significa no aplicar ninguna corrección del certificado de calibración del patrón.

<sup>31</sup> Este proceder de tipo práctico considera la suma de incertidumbres con errores lo cual no es rigurosamente correcto y no está en estricto apego a la NMX-CH-140-IMNC-2002.

<sup>32</sup> Este cálculo supone que la incertidumbre está expresada con  $k = 2$ .

<sup>33</sup> Suponiendo una distribución normal.

#### 4.2.6. Incertidumbre debida al “Error de Abbe”, $u_{Ab}$ <sup>34</sup>.

La incertidumbre queda determinada por la siguiente ecuación:

$$u_{Ab} = \frac{E_{Ab}}{\sqrt{3}} \quad (4)$$

Donde:

$E_{Ab} = \frac{(h \cdot a)}{L}$  es el “Error de Abbe”. Este se deduce de la Figura. 3.

Donde:

$h$  es la altura de la mordaza de medición (40 mm)

$a$  es el juego entre el cuerpo del calibrador y el cursor (0.01 mm)

$l$  es la longitud del cursor

#### 4.2.7. Incertidumbres debidas a los Efectos Térmicos

Se consideran dos contribuyentes de incertidumbre por efectos térmicos:

- a) Por diferencia de la temperatura  $T$  con respecto a la temperatura de referencia  $T_0$ <sup>35</sup>,  $u_{\Delta T}$ .

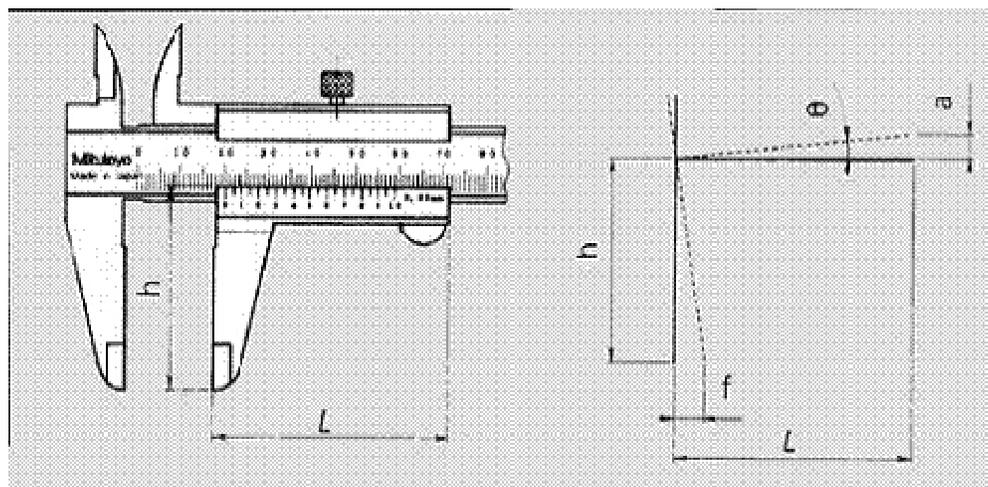


Figura 3. Ilustración del Error de Abbe.

<sup>34</sup> Para los calibradores, como para muchos otros instrumentos de medición cuya escala no se encuentra sobre la misma línea que la del objeto a medir, se genera un error llamado Error de Abbe.

<sup>35</sup> Las expresiones obtenidas aquí no corresponden a la estimación rigurosa de este contribuyente de incertidumbre ni son consistentes. Se trata de un cálculo aproximado simplificado que, no obstante, arroja valores cercanos al cálculo riguroso.

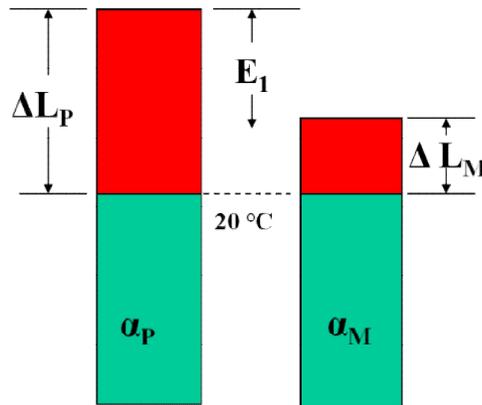


Figura 4. Diferencia de dilatación entre patrón de calibración y mensurando debida a la diferencia de temperatura ambiente.

De la figura 5 tenemos que:

$$E_1 = \Delta L_P - \Delta L_M \quad (a)$$

$$\Delta L_P = L \cdot \alpha_P \cdot \Delta T \quad (b)$$

$$\Delta L_M = L \cdot \alpha_M \cdot \Delta T \quad (c)$$

Donde:

$E_1$  es la diferencia de dilatación entre el patrón de calibración y el mensurando debido a la diferencia entre la temperatura a la que se calibra,  $T$ ; y la temperatura de referencia,  $T_0$

$\Delta L_P$  es la dilatación del patrón de calibración

$\Delta L_M$  es la dilatación del mensurando.

$\Delta T$  es la diferencia de temperatura respecto a la de referencia

$\alpha_P$  es el coeficiente de dilatación térmica del patrón de calibración

$\alpha_M$  es el coeficiente de dilatación térmica del mensurando

Sustituyendo (b) y (c) en (a) se tiene:

$$E_1 = L \cdot \alpha_P \cdot \Delta T - L \cdot \alpha_M \cdot \Delta T$$

$$E_1 = L \cdot \Delta\alpha \cdot \Delta T \quad (d)$$

Donde:

$$\Delta\alpha = \alpha_P - \alpha_M$$

Para estimar la incertidumbre de la expresión (d) se puede derivar una expresión formal. Sin embargo, una aproximación simplificada resulta más práctica para este tipo de instrumentos. Esta expresión sería:

$$u_{\Delta T} = \frac{L \cdot \Delta\alpha \cdot \Delta T}{\sqrt{3}} \quad (5)$$

Sin embargo, para utilizar adecuadamente esta expresión, tendrá que tenerse en consideración que cuando  $\Delta\alpha$  es cero, por ejemplo si los materiales son iguales, la aproximación supuesta en la ecuación 5 debe considerar la incertidumbre del coeficiente de expansión térmica y asumir que  $\Delta\alpha = 2u_\alpha$ , donde  $u_\alpha$  es la incertidumbre de  $\alpha$ .

b) Por la diferencia de temperatura entre el patrón de calibración y el mensurando,  $u_{\delta t}$ .

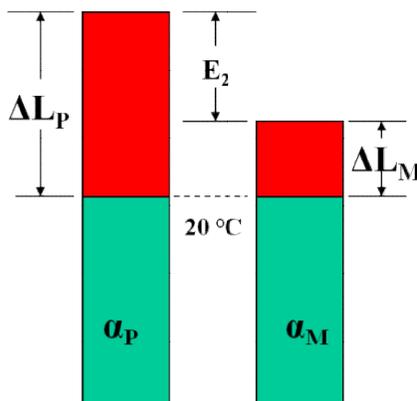


Figura 5. Diferencia de dilatación entre patrón de calibración y mensurando debida a la diferencia de temperatura entre ellos.

De la figura 6 se tiene que:

$$E_2 = \Delta L_P - \Delta L_M \quad (e)$$

$$\Delta L_P = L \cdot \alpha_P \cdot (t_P - 20) \quad (f)$$

$$\Delta L_M = L \cdot \alpha_M \cdot (t_M - 20) \quad (g)$$

Donde:

$E_2$  es la diferencia de dilatación entre el patrón de calibración y el mensurando debido a la diferencia de temperatura entre ambos

$t_P$  es la temperatura del patrón de calibración

$t_M$  es la temperatura del mensurando.

Sustituyendo (f) y (g) en (e) se tiene:

$$E_2 = L \cdot \alpha_P \cdot (t_P - 20) - L \cdot \alpha_M \cdot (t_M - 20)$$

$$E_2 = L \cdot [\alpha_P \cdot (t_P - 20) - \alpha_M \cdot (t_M - 20)] \quad (h)$$

En los casos en que ambos sean del mismo material puede considerarse  $\Delta_P = \Delta_M$ , quedando entonces:

$$E_2 = L \cdot \alpha_{prom} \cdot \delta t \quad (i)$$

Donde:

$$\delta t = (t_P - t_M)$$

$$\alpha_{prom} = \frac{(\alpha_P + \alpha_M)}{2}$$

Para estimar la incertidumbre de la expresión (i) se puede usar la siguiente fórmula:

$$u_{\delta t} = \frac{L \cdot \alpha_{prom} \cdot \delta t}{\sqrt{3}} \quad (6)$$

#### 4.2.8. Otros Contribuyentes

Existen otros contribuyentes, sin embargo, no se toman en cuenta pues se saben de antemano despreciables frente a los que ya hemos calculado.

#### 4.2.9. Estimación de la Incertidumbre Estándar Combinada, $u_c$ .

Considerando las fuentes de variación antes descritas, la incertidumbre estándar combinada estará dada por la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de todas ellas:

$$u_c = \sqrt{[(u_{rep} \text{ ó } u_{res})^2 + u_P^2 + u_{Ab}^2 + u_{\Delta T}^2 + u_{\delta t}^2]} \quad (7)$$

#### 4.2.10. Contribuciones debidas al laboratorio, $u_{lab}$ .

Es necesario, al mostrar el balance final de la incertidumbre, mostrar en una columna aparte la contribución del laboratorio obtenida de la consideración de las componentes que son imputables a éste, esto es:

$$u_{lab} = \sqrt{(u_P^2 + u_{\Delta T}^2 + u_{\delta t}^2)} \quad (8)$$

#### 4.2.11. Estimación de la Incertidumbre Expandida, $U$

La incertidumbre expandida se obtiene empleando un factor de cobertura  $k = 2$  (al que corresponde un intervalo de confianza de aproximadamente 95 %<sup>36</sup>, para así obtener:

$$U = 2u_c \quad (9)$$

### 4.3. Ejemplos numéricos

#### 4.3.1. Estimación de la Incertidumbre en la Calibración de un Calibrador de Lectura Digital Electrónico.

- Objetivo

Estimación de la incertidumbre para un calibrador de lectura digital electrónico con resolución de 0.01 mm e intervalo de medida de 0 a 150 mm.

- Incertidumbre debida a la repetibilidad ( $u_{rep}$ ).

Se hacen 10 repeticiones de cada uno de los valores nominales a calibrar en la escala correspondiente del maestro de longitudes fijas. Suponemos que la desviación estándar más elevada se presenta a los 150 mm y que las 10 lecturas dan los siguientes errores:

| Patrón<br>(mm) | <b>1</b><br>(mm) | <b>2</b><br>(mm) | <b>3</b><br>(mm) | <b>4</b><br>(mm) | <b>5</b><br>(mm)  | <i>s</i><br>(mm) |
|----------------|------------------|------------------|------------------|------------------|-------------------|------------------|
| 150.00         | 0.00             | 0.01             | -0.01            | 0.00             | -0.01             |                  |
|                | <b>6</b><br>(mm) | <b>7</b><br>(mm) | <b>8</b><br>(mm) | <b>9</b><br>(mm) | <b>10</b><br>(mm) |                  |
|                | 0.01             | 0.01             | 0.00             | 0.00             | -0.01             | 0.0082           |

De la ecuación (1) del punto 4.2.3 se tiene:

$$u_{rep} = \frac{s}{\sqrt{n}} = \frac{0.0082}{\sqrt{10}} = 0.00259 \text{ mm} = 2.59 \mu\text{m}$$

- Incertidumbre debida a la resolución del calibrador digital electrónico ( $u_{res}$ ).

De la ecuación (2) del punto 4.2.4 se tiene:

<sup>36</sup> Se considera este cálculo simplificado como suficiente para el nivel de exactitud de instrumentos de media y baja exactitud como este. Una estimación rigurosa requeriría de la estimación de la *t-Student* y la corrección correspondiente o, mejor aún, el cálculo de los grados de libertad efectivos mediante la relación de Welch-Satterthwaite a partir de la estimación de los grados de libertad de cada fuente de incertidumbre de donde se obtiene el factor  $k$  (cerca de 2) por el que hay que multiplicar para tener el 95,45 % de intervalo de cobertura. Como en este cálculo se está considerando un modelo simplificado, es suficiente tomar el factor de cobertura  $k = 2$ .

$$u_{res} = \frac{res}{2\sqrt{3}} = \frac{0.01}{2\sqrt{3}} = 0.00289 \text{ mm} = 2.89 \mu\text{m}$$

De las dos anteriores se debe elegir la mayor. En este caso, la debida a la resolución de 2.89  $\mu\text{m}$ .

- Incertidumbre debida al patrón de calibración ( $u_p$ ).

De acuerdo al punto 4.2.5 de este documento, tomamos la incertidumbre de calibración del patrón y el error máximo obtenido y sumamos aritméticamente ambas para obtener la incertidumbre debida al patrón de calibración.

$$u_p = \frac{\text{Error M}á\text{x.}}{2} + u_{pc}$$

Del informe de calibración tenemos  $U_{pc} = (250 + 0.5 L)$  nm, con L en mm

Para L = 150 mm, tendremos la incertidumbre máxima:  $U_{pc} = 0.325 \mu\text{m}$  de lo cual:

$$u_{pc} = \frac{0.325}{2} = 0.163$$

Del mismo informe observamos que el error máximo, que ocurre a los 50 mm es:  $\text{Error M}á\text{x.} = 1.83 \mu\text{m}$  y  $\frac{\text{Error M}á\text{x.}}{2} = 0.915 \mu\text{m}$

Sumando aritméticamente estas dos cantidades:  $u_p = 1.078 \mu\text{m}$

- Incertidumbre debida al “Error de Abbe” ( $u_{Ab}$ ).

Usando la ecuación (4) del punto 4.2.6 y considerando que los valores típicos de este tipo de instrumentos son:  $h = 20$  mm,  $a = 0.01$  mm y  $L = 53$  mm. Por lo tanto:

$$u_{Ab} = \frac{(h \cdot a)}{L\sqrt{3}} = 2.18 \mu\text{m}$$

En la Fig. 4 se muestra  $h = 40$  mm. Esta distancia, sin embargo es al extremo de las puntas de medición. Considerando que se trata de una calibración y que, por lo tanto, se trata de reducir al mínimo los errores, se colocan las puntas de medición lo más centrado posible, por lo que el valor considerando para h es de 20 mm.

- Incertidumbres debidas a los efectos térmicos ( $u_{AT}$  y  $u_{\delta t}$ ).

Del punto 4.2.7 Tomamos  $\Delta T = 2 \text{ }^\circ\text{C}$ , la máxima diferencia permisible dentro de los límites de operación del laboratorio. El fabricante del patrón de calibración estipula el coeficiente de dilatación  $\alpha_p$  con su incertidumbre. Estimamos el del calibrador  $\alpha_M^{37}$ . Los valores son los siguientes:

$$\alpha_p = 11 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}; \alpha_M = 12 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1} \text{ por lo tanto: } \Delta\alpha = 1 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}; a_{m\acute{a}x} = 12 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$$

Aplicando la ecuación (5) del punto 4.2.7:

$$u_{\Delta T} = \frac{L \cdot \Delta\alpha \cdot \Delta T}{\sqrt{3}} = \frac{(150) \cdot (1 \times 10^{-6}) \cdot 2}{\sqrt{3}} = 0.17 \mu\text{m}$$

Del punto 4.2.7 estimamos que la diferencia es de  $\delta t = 0.3 \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ . De los datos del inciso anterior tenemos que  $\alpha_{prom} = 11.5 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ .

Aplicando la fórmula (6) del punto 4.2.7:

$$u_{\delta t} = \frac{L \cdot \alpha_{prom} \cdot \delta t}{\sqrt{3}} = 0.000299 \text{ mm} = 0.30 \mu\text{m}$$

- Incertidumbre Estándar Combinada ( $u_c$ ).

Despreciamos los dos últimos valores de 0.17 y 0.30  $\mu\text{m}$  pues son un orden de magnitud menores al resto de los valores<sup>38</sup>. De la ecuación (7) tenemos:

$$u = \sqrt{[u_{res}^2 + u_p^2 + u_{Ab}^2 + u_{\Delta T}^2 + u_{\delta t}^2]} = \sqrt{[(2.89)^2 + (1.08)^2 + (2.18)^2]} = 3.78 \mu\text{m}$$

Nótese que se ignoraron las dos contribuciones por temperatura  $u_{\Delta T}$  y  $u_{\delta t}$  debido a que su valor numérico no tiene efecto significativo frente a los otros 3 valores<sup>39</sup>.

- Incertidumbre Expandida ( $U$ ).

$$U = 2(3.78) = 7.56 \text{ que puede ser redondeado a } 8 \mu\text{m}^{40} \text{ o incluso } 10 \mu\text{m}.$$

El resumen del balance de incertidumbres en forma de tabla, como se pide en 3.4.6 de los Requisitos para la Estimación de la Incertidumbres se presenta a continuación en la Tabla 2:

<sup>37</sup> Conociendo el tipo de acero que probablemente es, obtenemos el valor de un manual de materiales.

<sup>38</sup> Para este ejemplo los valores de las incertidumbres consideradas resultaron pequeñas, sin embargo la influencia de estos valores otros casos es más importante.

<sup>39</sup> Si se consideran los cinco contribuyentes el valor obtenido es de 3.79  $\mu\text{m}$ , es decir, 0.01  $\mu\text{m}$  de diferencia.

<sup>40</sup> Observar que se redondea hacia arriba (en exceso) siempre.

| No. | Contribuyente incertidumbre                      | Tipo de distribución                        | Contribución $u_{Labi}(y) \mu m$       | Contribución $u_i(y) \mu m$ | $[u_i(y)]^2$                     | Contribución (%)  |
|-----|--|---|--|-----------------------------|----------------------------------|---|
| 1   | Repetibilidad, $u_{rep}$                         | Normal                                      |  | No considerada              | -                                | -   |
| 2   | Resolución, $u_{res}$                            | Rectangular                                 |  | 2.89                        | 8.35                             | 58.51   |
| 3   | Patrón, $u_p$                                    | Normal                                      | 1.08                                   | 1.08                        | 1.17                             | 8.20  |
| 4   | Error de Abbe, $u_{Ab}$                          | Rectangular                                 |  | 2.18                        | 4.75                             | 33.29   |
| 5   | Dif. Temp.20, $u_{AT}$                           | Rectangular                                 | 0.17                                   | Despreciable                | -                                | -   |
| 6   | Dif.Temp.Patron y Mensurando, $u_{\delta T}$     | Rectangular                                 | 0.30                                   | Despreciable                | -                                | -   |
|     |  | $\sum [u_{Labi}(y)]^2$                      | 1.29                                   | $\sum [u_i(y)]^2$           | 14.27                            | <b>La incertidumbre expandida a informar con k = 2 es de: U = ± 0.01 mm</b> |
|     | Incertidumbre estándar del laboratorio           | 1.13 $\mu m$                                | Incertidumbre Estándar Combinada (u) = |                             | 3.78                             |   |
|     | <b>Contribución del Lab. a la Inc. Expandida</b> | <b>2.27 <math>\mu m</math><sup>41</sup></b> | <b>INCERTIDUMBRE EXPANDIDA (k=2)</b>   |                             | <b>± 7.56 <math>\mu m</math></b> |   |

Tabla 2. Balance de incertidumbres para un calibrador de lectura digital electrónico con intervalo de medida de 0 mm a 150 mm y resolución de 0.01 mm.

La tabla 2 refleja el balance de incertidumbres en el punto con mayor incertidumbre correspondiente a la longitud  $L$  máxima. El laboratorio podrá declarar ésta como la incertidumbre de todo el intervalo pues estará estipulando una incertidumbre conservadora. También podrá redondear hacia arriba como se ha hecho en la incertidumbre a informar de la tabla. En vez de redondear a 0.007 mm o 0.008 mm, lo hace a la centésima de milímetro.

Esto se suele hacer simplemente por hacer la incertidumbre consistente con la resolución del instrumento<sup>42</sup> y con los requisitos de la referencia [1] de expresar la incertidumbre con dos dígitos significativos como máximo.

Ahora bien, dependiendo del tipo de instrumento y su intervalo de medida, el procedimiento anterior puede atribuir valores de incertidumbre a informar demasiado grandes respecto de la incertidumbre real para los valores pequeños del intervalo. No es el caso del ejemplo anterior pues los contribuyentes dependientes de la longitud fueron en dos casos despreciados ( $u_{AT}$ ,  $u_{\delta i}$ ) y en el caso de la incertidumbre del patrón de calibración también se tomó el caso más desfavorable que es el de la máxima longitud. Se debe de tener presente que no siempre es el caso.

Queda claro que se le está atribuyendo un valor de incertidumbre a informar grande para los valores del intervalo inferiores a 150 mm. En este caso conviene expresar la incertidumbre en función de la

<sup>41</sup> Esta incertidumbre refleja de cierto modo, la calidad metrológica del servicio de calibración del laboratorio. Cuanto menor sea esta contribución, mejor será el servicio prestado por ese laboratorio.

<sup>42</sup> Para instrumentos de media y baja exactitud que no tengan un intervalo de medición muy grande como este caso, la incertidumbre final obtenida siempre es ligeramente mayor o ligeramente menor a la resolución de la lectura, pero del mismo orden de magnitud.

longitud ya sea por intervalos o mediante una ecuación lineal dependiente de la longitud  $L$  (véase el anexo 2).

4.3.2. Estimación de la Incertidumbre de medida de un micrómetro de exteriores con intervalo de medida de 25 mm, con lectura analógica y división mínima de lectura de 0.01 mm

- Objetivo

Determinar la incertidumbre de medida de un micrómetro de exteriores de lectura analógica (Fig. 7) y con división mínima de lectura de 0.01 mm e intervalo de medida de 25 mm mediante bloques patrón (Fig. 8) como patrón de calibración.

El balance de incertidumbre, en este ejemplo, no se basa en un modelo matemático explícito, simplemente considera la suma cuadrática de las fuentes de incertidumbre con todos los coeficientes de sensibilidad igual a uno de acuerdo a 3.4.3.

- Contribuyentes de incertidumbre considerados:

- Incertidumbre debida a la Repetibilidad,  $u_{rep}$
- Incertidumbre debida a la Resolución,  $u_{res}$
- Incertidumbre debida al patrón de calibración,  $u_p$
- Incertidumbres debida a efectos térmicos
- Incertidumbre debida al Paralaje,  $u_{par}$
- Incertidumbre debida a la Falta de contacto de las puntas de medición,  $u_{cont}$
- Incertidumbre debida a la Fuerza de medición,  $u_{FM}$

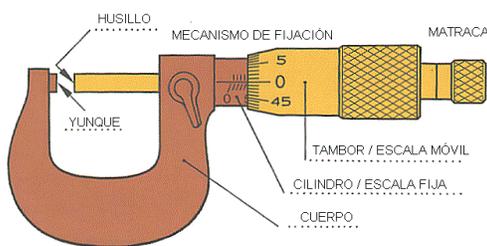


Figura 7

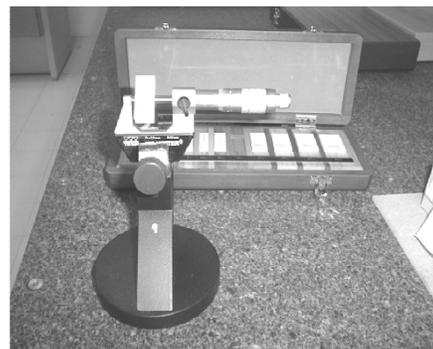


Figura 8

- Incertidumbre debida a la repetibilidad ( $u_{rep}$ ).

Dado que se trata de un instrumento analógico, un operador puede estimar lecturas por debajo de la mínima división de la escala del instrumento. Se considera razonable que un operador con una agudeza visual normal pueda estimar hasta 1/5 de la lectura entre trazos. Considerando esto y que se toman 10 lecturas para cada uno de los nominales medidos, se obtiene la tabla 3 que muestra las diferencias con respecto al valor nominal con una resolución de 0.01 mm.

| Lectura   | Nominal |         |         |         |         |         |         |         |         |         |
|-----------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
|           | 2.5     | 5.1     | 7.7     | 10.3    | 12.9    | 15      | 17.6    | 20.2    | 22.8    | 25      |
| 1         | 0.000   | 0.000   | 0.000   | 0.002   | 0.000   | 0.000   | 0.000   | 0.000   | 0.002   | 0.002   |
| 2         | 0.000   | 0.000   | 0.002   | 0.000   | 0.002   | 0.000   | 0.000   | 0.000   | 0.002   | 0.002   |
| 3         | 0.000   | 0.000   | 0.000   | 0.000   | 0.000   | 0.002   | 0.000   | 0.000   | 0.000   | 0.000   |
| 4         | 0.000   | 0.000   | 0.000   | 0.000   | 0.000   | 0.000   | 0.000   | 0.000   | 0.000   | 0.000   |
| 5         | 0.000   | 0.000   | 0.000   | 0.000   | 0.000   | 0.000   | 0.002   | 0.000   | 0.000   | 0.000   |
| 6         | 0.002   | 0.002   | 0.000   | 0.000   | 0.000   | 0.000   | 0.000   | 0.000   | 0.000   | 0.000   |
| 7         | 0.002   | 0.000   | 0.000   | 0.002   | 0.000   | 0.002   | 0.002   | 0.002   | 0.000   | 0.002   |
| 8         | 0.000   | 0.000   | 0.000   | 0.000   | 0.000   | 0.000   | 0.002   | 0.000   | 0.000   | 0.002   |
| 9         | 0.000   | 0.000   | 0.002   | 0.000   | 0.000   | 0.002   | 0.000   | 0.000   | 0.000   | 0.000   |
| 10        | 0.002   | 0.002   | 0.000   | 0.000   | 0.002   | 0.000   | 0.000   | 0.000   | 0.000   | 0.000   |
| Media     | 0.0006  | 0.0004  | 0.0004  | 0.0004  | 0.0004  | 0.0006  | 0.0006  | 0.0002  | 0.0004  | 0.0008  |
| Dev Media | 0.00031 | 0.00027 | 0.00027 | 0.00027 | 0.00027 | 0.00031 | 0.00031 | 0.00020 | 0.00027 | 0.00033 |

Tabla 3. Errores obtenidos para 10 mediciones de un micrómetro para cada valor nominal calibrado. La serie de valores nominales es la serie utilizada por norma [20].

De la misma forma que en el ejemplo anterior, la repetibilidad de la medición se evalúa con el estimador estadístico de la desviación estándar de la media a partir de mediciones repetidas, considerando que:

$$u_{rep} = \frac{s}{\sqrt{n}}$$

Se repite el cálculo para cada nominal medido y se informa, como valor de repetibilidad la mayor desviación estándar obtenida (la peor repetibilidad) que ocurre en este caso a los 25 mm.

$$u_{rep} = \frac{s_{25\text{ mm}}}{\sqrt{n}} = \frac{0.0010}{\sqrt{10}} = 0.00033\text{ mm} = 0.33\ \mu\text{m}$$

Cabe mencionar que éste micrómetro presenta un error, desviación o sesgo que es más o menos constante<sup>43</sup> a lo largo de su intervalo de medida. Se puede calcular una estimación de éste como la media de las medias obtenidas para cada nominal de la tabla 3. Efectuando este cálculo se obtiene un error de 0.5 µm en exceso del valor de referencia.

El micrómetro debiese ser reparado o ajustado físicamente, sus lecturas corregidas o bien, se debe considerar este error dentro de la incertidumbre de acuerdo al requisito del punto 3.4.7. Estas dos opciones serán explicadas al final del cálculo.

<sup>43</sup> Un error constante de este tipo es un error de “acerado” o de ajuste acero. Algunos micrómetros permiten ajustarlo físicamente y así corregirlo. Sin embargo, en muchos casos si el error es pequeño, como en este caso, no se corrige.

- Incertidumbre debida a la resolución, ( $u_{res}$ ).

De acuerdo a lo descrito en el punto anterior, esta incertidumbre queda determinada por la mínima división de la escala del instrumento y la capacidad del operador para leer entre trazos de la escala de éste. Un operador puede distinguir hasta una quinta parte de la resolución del instrumento. Considerando esto y una distribución rectangular, queda de la siguiente manera:

$$u_{res} = \frac{\frac{res}{5}}{2\sqrt{3}}$$

Donde:

- $u_{res}$  es la incertidumbre estándar por resolución del micrómetro.
- $res$  es la resolución del micrómetro.

$$u_{res} = \frac{\frac{10}{5}}{2\sqrt{3}} = 0.58 \mu m$$

De ambos valores se toma el mayor de los dos, es decir, la incertidumbre por resolución de 0.58  $\mu m$ .

- Incertidumbre debida al patrón de calibración ( $u_p$ ).

En este caso se calibra contra el valor nominal del bloque de tal suerte que se considerará la tolerancia del bloque para esa longitud conforme a lo que se indica en la sección 3.4.9 a. Considerando que se trata de bloques ISO grado 2, para una longitud de 25 mm donde se debe suponer que ocurre la peor repetibilidad la tolerancia de grado es de 0.6  $\mu m$ . Suponemos a su vez, una distribución rectangular en este caso de tal suerte que la incertidumbre del patrón de calibración sería:

$$u_p = \frac{0.6 \mu m}{\sqrt{3}} = 0.35 \mu m$$

- Incertidumbre debida a los efectos térmicos

De 4.27 tomamos  $\Delta T = 2^\circ C$ , la máxima diferencia permisible dentro de los límites de operación del laboratorio. El fabricante del patrón estipula el coeficiente de dilatación  $\alpha_p$  con su incertidumbre. Estimamos el del micrómetro  $\alpha_M$ <sup>44</sup>. Los valores son los siguientes:

$$\alpha_p = 11 \times 10^{-6} C^{-1}; \alpha_M = 12 \times 10^{-6} C^{-1}$$

---

<sup>44</sup> Conociendo el tipo de acero que probablemente es, obtenemos el valor manual de materiales.

Por lo tanto:

$$\Delta\alpha = 1 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}; \alpha_{max} = 12 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$$

Aplicando la fórmula del inciso 5 del punto 4.2.7:

$$u_{\Delta T} = \frac{L \cdot \Delta\alpha \cdot \Delta T}{\sqrt{3}} = \frac{25 \cdot 1 \times 10^{-6} \cdot 2}{\sqrt{3}} = 0.0000288 \text{ mm} = 0.029 \mu\text{m}$$

De 4.2.7 estimamos que la diferencia es de  $\delta t = 0.3 \text{ } ^\circ\text{C}$ . De los datos del inciso anterior tenemos que  $\alpha_{prom} = 11.5 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ .

Aplicando la formula (11) de la parte 2:

$$u_{\delta t} = \frac{L \cdot \alpha_{prom} \cdot \delta t}{\sqrt{3}} = 0.0000476 \text{ mm} = 0.05 \mu\text{m}$$

Las componentes de incertidumbre por efectos térmicos tanto  $u_{\Delta T}$  como  $u_{\delta t}$  no tiene efecto significativo en el balance de la incertidumbre total.

- Incertidumbre debida al paralaje ( $u_{par}$ ).

Se refiere al error que se comete debido a que el trazo graduado del husillo no está a la misma altura que el trazo graduado del tambor respecto al observador y éste posiblemente no mira en dirección perfectamente perpendicular. Considérese la Figura 9 para comprender el error de paralaje  $e_{par}$ . Para estimar la incertidumbre suponemos que dicho error se da en forma rectangular sobre un valor de error máximo que calcularemos. De la figura 9 se puede calcular el error al leer la escala por triángulos semejantes:

$$X = \frac{DO \cdot h}{DF}$$

Donde:

|      |   |
|------|---|
| $X$  | error al leer la escala   |
| $DO$ | distancia máxima en paralelo a la escala en la que posiblemente el operador se aleje de la perpendicular a la escala (valor estimado en 4 cm) |
| $DF$ | distancia focal de observación (distancia de la escala del instrumento al ojo del operador, se estima en 25 cm)                               |
| $h$  | altura que separa los planos del tambor y del husillo (por norma es de 0.4 mm o menos)  |

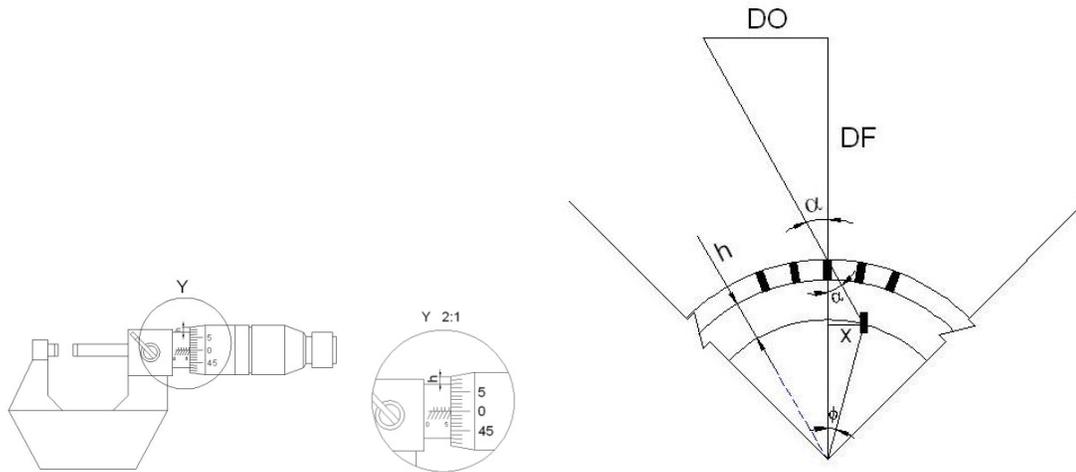


Figura 9. Esquema que ilustra el error de paralaje a la lectura de la escala de un micrómetro analógico.

A su vez sabemos que una revolución completa del tambor corresponde a un desplazamiento del husillo de  $500 \mu\text{m}$  y si el diámetro del micrómetro es de  $10 \text{ mm}$  (valor normalizado), a  $X$  corresponderá un error de lectura  $e_{par}$ :

$$e_{par} = \frac{R \cdot DO \cdot h}{\pi \cdot \phi \cdot DF}$$

Donde:

- $R$  es el desplazamiento del husillo por revolución del tambor
- $\phi$  es el diámetro del husillo

Si suponemos que este error se distribuye rectangularmente y sustituyendo valores:

$$u_{par} = \frac{R \cdot DO \cdot h}{\sqrt{3} \cdot \pi \cdot \phi \cdot DF} = \frac{500 \mu\text{m} \cdot 4 \text{ cm} \cdot 0.4 \text{ mm}}{\sqrt{3} \cdot \pi \cdot 10 \text{ mm} \cdot 25 \text{ cm}} = 0.59 \mu\text{m}$$

- Incertidumbre debida a falta de contacto de las puntas de medición ( $u_{cont}$ ).

Al verificar la planitud de las superficies de contacto mediante un plano óptico y una luz monocromática de sodio no se aprecian franjas. Por lo tanto, la falta de contacto podrá ser de una franja cuando mucho. La luz monocromática de sodio tiene una longitud de onda de  $0.59 \mu\text{m}$ , por lo tanto una franja corresponde a la mitad  $0.30 \mu\text{m}$ <sup>45</sup>. Asumiendo una distribución rectangular:

$$\frac{0.3 \mu\text{m}}{\sqrt{3}} = 0.17 \mu\text{m}$$

<sup>45</sup> La norma [20] admite hasta  $1 \mu\text{m}$  de planitud correspondiente a 3 franjas. Dependiendo del número de franjas obtenidas será el valor de esta incertidumbre.

- Incertidumbre debida a la fuerza de medición,  $U_{FM}$ .

Considerando que el micrómetro cuenta con un sistema de control de fuerza (“trinquete”, por ejemplo), la variación de ésta está entre 5 y 15 N. La diferencia de deformación correspondiente a la variación de fuerza del bloque es inferior a 10 nm. Este valor es despreciable comparada con las otras fuentes.

- Incertidumbre Combinada<sup>46</sup> ( $u$ ).

$$u_c = \sqrt{u_{res}^2 + u_p^2 + u_{par}^2} = \sqrt{0.58^2 + 0.35^2 + 0.59^2} = 0.90 \mu m$$

- Incertidumbre Expandida ( $U$ ).

$$U = 2 (0.90) = 1.80 \mu m$$

Redondeando hacia arriba da una incertidumbre a reportar con corrección de:  $U = 2 \mu m$

Esta es la incertidumbre instrumental es la que se debe considerar si el operador que utilice después este micrómetro efectúa la corrección de lecturas considerando la desviación de 0.5  $\mu m$  que tiene este instrumento y que está reportada en el certificado del mismo. Esto no es práctico y por lo general, no se hace en la industria como se mencionó en la sección 3.4.7. Por lo tanto, se debe de adicionar al valor de incertidumbre obtenido el error no corregido de 0.5  $\mu m$  encontrado al calcular la repetibilidad conforme a lo indicado en esa sección.

$$U_c = U + e = (1.80 + 0.5) \mu m = 2.3 \mu m$$

Finalmente, este error lo redondeamos hacia arriba:

Incertidumbre a reportar sin corrección:  $U = 3 \mu m$

El resumen del balance de incertidumbres en forma de tabla, como se pide en 3.4.6 de los Requisitos para la Estimación de la Incertidumbres se presenta a continuación en la tabla 3.

| No. | Contribuyente incertidumbre | Tipo de distribución | Contribución $u_{Labi}(y) \mu m$ | Contribución $u_i(y) \mu m$ | $[u_i(y)]^2$ | Contribución (%) |
|-----|-----------------------------|----------------------|----------------------------------|-----------------------------|--------------|------------------|
| 1   | Repetibilidad, $u_{rep}$    | Normal               |                                  | No considerada              | -            | -                |
| 2   | Resolución, $u_{res}$       | Rectangular          |                                  | 0.58                        | 0.336        | 42               |
| 3   | Patrón, $u_p$               | Normal               | 0.35                             | 0.35                        | 0.123        | 15               |

<sup>46</sup> Para efectos didácticos se consideraron 6 fuentes de incertidumbre. No obstante, el cálculo se despreciaron tres fuentes de incertidumbre menores y consideraron solo 3 conforme a la recomendación 4.1 cuarto inciso. En este caso el resultado final de la incertidumbre expandida sería de  $U = 1.80 \mu m$ , sensiblemente el mismo, y, tras el redondeo sería exactamente el mismo,  $U = 2 \mu m$ .

| No. | Contribuyente incertidumbre                                    | Tipo de distribución   | Contribución $u_{Labi}(y) \mu m$ | Contribución $u_i(y) \mu m$ | $[u_i(y)]^2$ | Contribución (%)  |
|-----|--|------------------------|----------------------------------|-----------------------------|--------------|---|
| 4   | Error de paralelaje, $u_{par}$                                 | Rectangular            | 0.59                             | 0.59                        | 0.348        | 43  |
| 5   | Dif. de Temp. con la de referencia, $u_{\Delta T}$             | Rectangular            | 0.029                            | Sin efecto                  | -            | -   |
| 6   | Dif. de Temp. entre el patrón y el instrumento, $u_{\delta t}$ | Rectangular            | 0.05                             | Sin efecto                  | -            | -   |
| 7   | Falta de contacto, $u_{con}$                                   | Rectangular            | -                                | Sin efecto                  | -            | -   |
| 8   | Incertidumbre por fuerza de medición, $u_{FM}$                 | Rectangular            |                                  | Sin efecto                  | -            | -   |
|     |  | $\sum [u_{Labi}(y)]^2$ | 0.47                             | $\sum [u_i(y)]^2$           | 0.81         | <b>La incertidumbre expandida a informar con k = 2 es de:</b><br><b><math>U_{corr} = 2 \mu m</math></b><br><b><math>U_{nocorr} = 3 \mu m</math></b> |

Tabla 3. Balance de incertidumbres para un micrómetro con lectura analógica con intervalo de medida de 0 mm a 25 mm y resolución de 0.01 mm.

## 5. REFERENCIAS

- [1] NMX-CH-140-IMNC-2002, Guía para la expresión de la incertidumbre de las mediciones; equivalente al documento Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement, BIPM, IEC, IFCC, ISO, IUPAC, IUPAP, OIML, 1995.
- [2] NMX-CH-14253-2-IMNC-2007, Especificaciones Geométricas de Producto (GPS) - Inspección por medición de piezas de trabajo y de equipo de medición - Parte 2: Guía para la estimación de incertidumbre en medición de GPS, en la calibración de equipo de medición y en verificación de producto.
- [3] NMX-CH-16015-IMNC-2005, Especificaciones geométricas de producto (GPS) - Errores sistemáticos y contribuciones a la incertidumbre de medición de mediciones de longitud debidos a influencias térmicas.
- [4] Ted Doiron and John Stoup, Uncertainty and Dimensional Calibrations, Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology Volume 102, Number 6, November - December 1997.
- [5] EAL-10/10 EA, Guidelines on the determination of Pitch Diameter of Parallel Thread Gauges by Mechanical Probing, European co-operation for accreditation April 1999.
- [6] <http://www.bipm.fr/en/convention/mra>, The Mutual recognition arrangement, BIPM, (1999)
- [7] W. Schmid, R. Lazos, et al., Guía para estimar la incertidumbre de la medición, [www.cenam.mx/](http://www.cenam.mx/), 2000
- [8] W. Schmid La incertidumbre expandida y los grados de libertad: un análisis comparativo entre el método recomendado por la GUM y métodos simplificados, Memorias del Simposio de Metrología 2002 CENAM. [www.cenam.mx](http://www.cenam.mx)
- [9] NIST/SEMATECH e-Handbook of statistical methods (2.5.7.1) <http://www.itl.nist.gov/div898/handbook>
- [10] W. Link, Metrología Mecánica, Expresión de la incertidumbre de medición, Publicado en español por Mitutoyo Mexicana, S.A. de C.V.
- [11] NMX-Z-055-2009, Vocabulario Internacional de Metrología - Conceptos fundamentales y generales, términos asociados (VIM); equivalente al documento ISO/IEC GUIDE 99:2007 y a la tercera edición del VIM.
- [12] NMX-EC-17025-IMNC-2006, Requisitos generales para la competencia de los laboratorios de ensayo y calibración.
- [13] NOM-008-SCFI-2002, Sistema General de Unidades de Medida.
- [14] NMX-CC-10012-IMNC-2004, Sistema de gestión de las mediciones - Requisitos para procesos de medición y equipos de medición.
- [15] MP-CA006, Trazabilidad de las Mediciones - Política de ema vigente.
- [16] MP-CA005, Incertidumbre de Mediciones - Política de ema vigente.

- [17] NMX-CH-100-IMNC-2005, Especificaciones Geométricas de Producto (GPS) -Temperatura de referencia normalizada para especificaciones y verificaciones geométricas de los productos.
- [18] NMX-EC-17011-IMNC-2005, Evaluación de la conformidad - Requisitos generales para los organismos de acreditación que realizan la acreditación que realizan la acreditación de organismos de evaluación de la conformidad.
- [19] M. Viliesid y F. Hernández, Encuentros y Desencuentros con la 17025, en memorias Simposio de Metrología 2004, Querétaro, CENAM, 2004.
- [20] NMX-CH-099-IMNC-2005, Especificaciones geométricas de Producto (GPS) - Instrumentos de medición dimensional - Micrómetros para medición de exteriores.

#### IDENTIFICACIÓN DE CAMBIOS

| INCISO         | PÁGINA     | CAMBIO(S)                        |
|----------------|------------|----------------------------------|
| 3, 6.1 y 7     | 6, 18 y 20 | Se actualizaron las definiciones |
| 10             | 26         | Se actualizaron las referencias  |
| Observaciones: |            |                                  |

## ANEXO A. Estimación de la incertidumbre de medida cuando no se hacen correcciones

Cuando se estime la incertidumbre de calibración de un instrumento con un patrón de calibración, la contribución de la incertidumbre del patrón de calibración puede considerarse de varias maneras, dependiendo del grado de exactitud deseada. Supóngase que  $L_0$  es el valor nominal,  $L_p$  es la desviación del patrón de calibración respecto al valor nominal y  $U_p$  la incertidumbre expandida del valor del patrón de calibración, de acuerdo al informe o certificado de dicho patrón de calibración. Además,  $L$  es el mejor estimado de las lecturas del instrumento. Véase figura A1.

Entonces se tienen las siguientes opciones:

- Se corrigen las lecturas  $L$  del instrumento por la desviación  $\delta$  respecto al patrón de calibración. Como la longitud del patrón de calibración está expresada como  $L_0 + \delta_p$  el mejor estimado es  $L_2 = L_0 + \delta_p$  contribución a la incertidumbre de  $L_2$  en la calibración del instrumento debida al patrón de calibración es  $U_p$ . Este es el procedimiento riguroso y se aplica normalmente a los instrumentos de alta exactitud.

Las siguientes dos opciones son aplicables a calibraciones de instrumentos de baja exactitud.

A. Se calibra contra el valor nominal del patrón de calibración. Se verifica que la suma de la desviación  $\delta_p$  más la incertidumbre expandida del patrón de calibración  $U_p$  sea menor o igual al Error Máximo Tolerado  $\pm T/2$  para la clase de exactitud del patrón de calibración. De ser cierto, se asume entonces que la distribución de valores del patrón de calibración obedece una distribución uniforme de ancho  $T$ , esto es, si  $\delta_p + U_p \leq T/2$ , entonces la contribución a la incertidumbre de calibración del instrumento debida al patrón de calibración se supone como:

$$U'_p = \frac{T}{\sqrt{3}}$$

B. Se calibra contra el valor nominal del patrón de calibración. La contribución a la incertidumbre de calibración del instrumento debida al patrón de calibración se asigna como:  $U'_p = U_p + \delta_p$

Nótese que la figura A1 muestra el resultado como el valor nominal corregido por la desviación encontrada respecto al patrón de calibración.

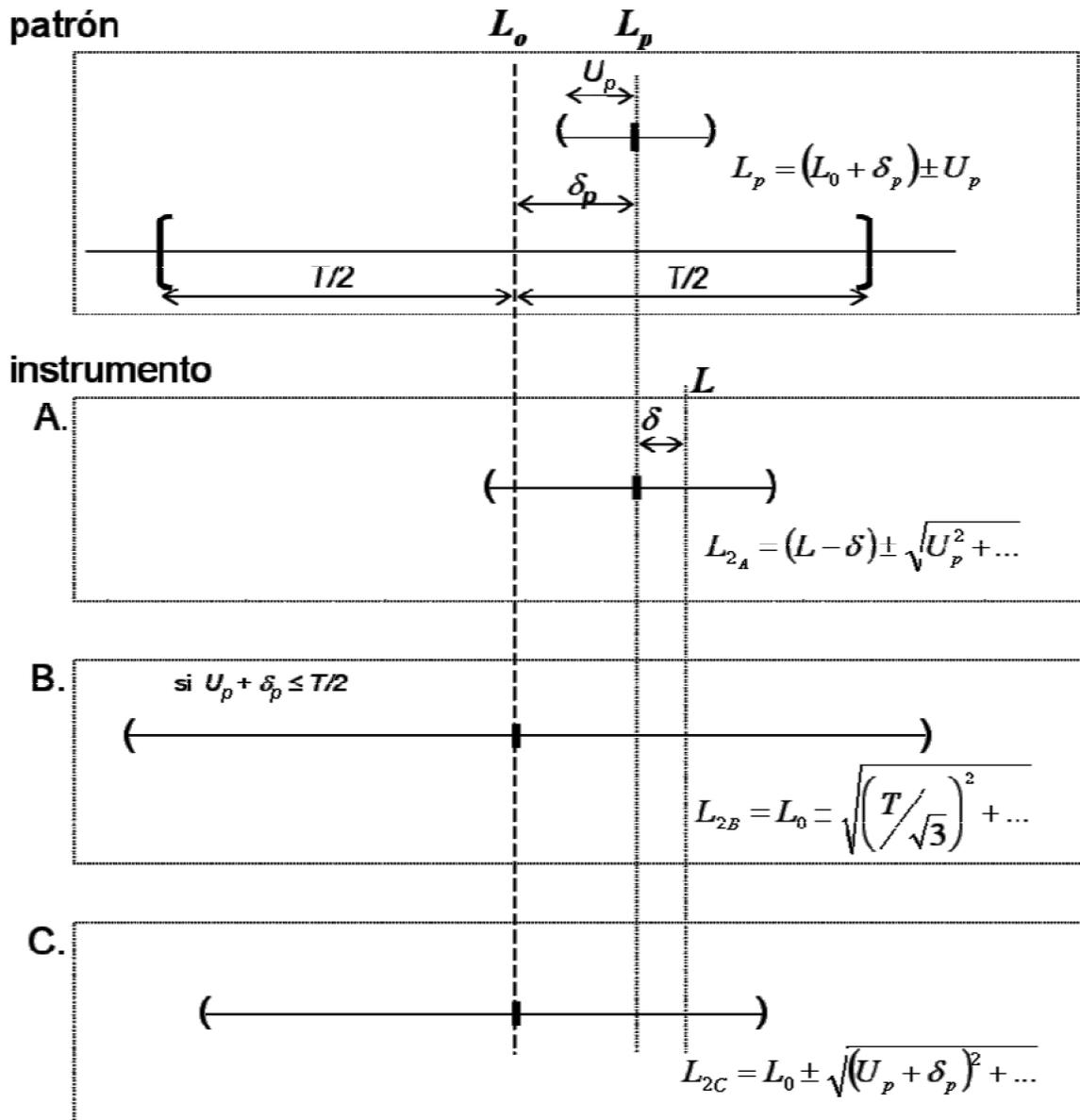


Figura A1. Algunos esquemas para considerar la incertidumbre del patrón de calibración.

## ANEXO B. Expresión de la incertidumbre de medida en metrología dimensional

La expresión de la incertidumbre mediante una ecuación de la forma  $U = a + b L$  permite presentar de una manera más conveniente el alcance de la acreditación de un laboratorio de calibración del área dimensional sin perder la fidelidad de la información proporcionada.

Ejemplo: Para el caso de micrómetros de exteriores de 0 a 300 mm

| Magnitud                 | Intervalo (mm) | Resolución ( $\mu\text{m}$ ) | Incertidumbre $k = 2$ |
|--------------------------|----------------|------------------------------|-----------------------|
| Micrómetro de Exteriores | 0 - 25         | 1                            | $\pm 3.0$             |
|                          | 25 - 50        | 1                            | $\pm 3.5$             |
|                          | 50 - 75        | 1                            | $\pm 4.0$             |
|                          | 75 - 100       | 1                            | $\pm 4.5$             |
|                          | 100 - 125      | 1                            | $\pm 5.0$             |
|                          | 125 - 150      | 1                            | $\pm 5.5$             |
|                          | 150 - 175      | 1                            | $\pm 6.0$             |
|                          | 175 - 200      | 1                            | $\pm 6.5$             |
|                          | 200 - 225      | 1                            | $\pm 7.0$             |
|                          | 225 - 250      | 1                            | $\pm 7.0$             |
|                          | 250 - 275      | 1                            | $\pm 7.5$             |
| 275 - 300                | 1              | $\pm 8.0$                    |                       |

La información puede ser expresada como:

| Magnitud                 | Intervalo (mm) | Resolución ( $\mu\text{m}$ ) | Incertidumbre $k = 2$ ( $\mu\text{m}$ ) |
|--------------------------|----------------|------------------------------|---|
| Micrómetro de exteriores | 0 - 300        | 1                            | $\pm (3 + 5 L/300)$                     |

La expresión de otras características metrológicas como el Error máximo permisible mediante una fórmula del tipo  $a + b L$  es común en el área de la metrología dimensional encontrándose frecuentemente en normas, catálogos o folletos.

Aunque el comportamiento real puede no ser completamente lineal se acepta la aproximación lineal (véase la figura B1).

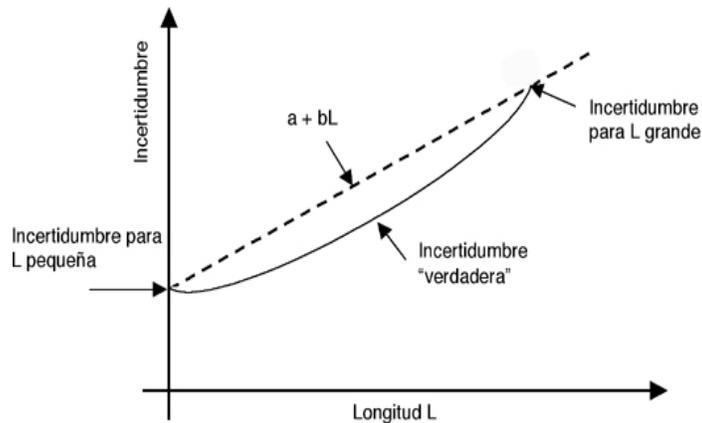


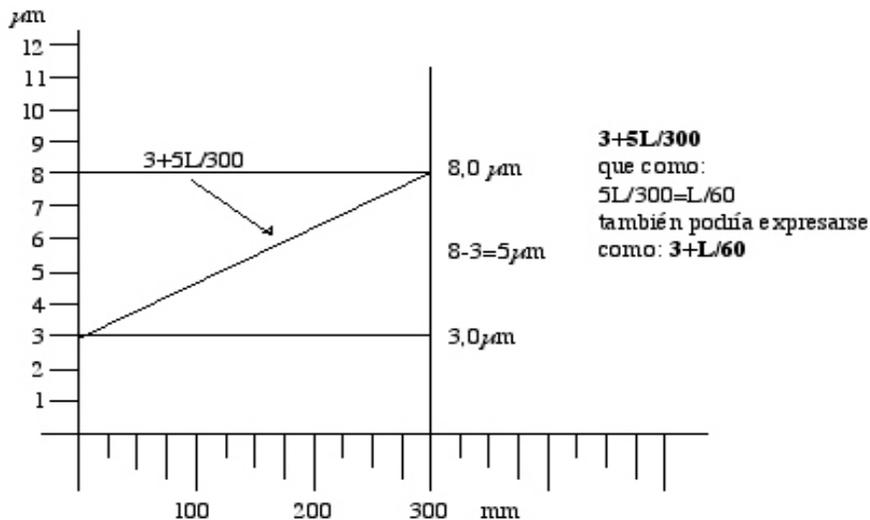
Fig. B1

De la tabla anterior se tiene incertidumbre para L grande =  $8 \mu\text{m}$

De la tabla anterior se tiene incertidumbre para L pequeña =  $3 \mu\text{m}$

Restando las dos se tiene  $8 - 3 = 5 \mu\text{m}$  valor que se multiplica por L y se divide entre la longitud que existe entre los dos puntos considerados en nuestro ejemplo 300 mm.

Quedando finalmente como  $\pm (3 + 5L/300) \mu\text{m}$  con L en mm.



### Ejemplo adicional

Supóngase que se tiene una incertidumbre de  $3 \mu\text{m}$  para L de 600 mm y de  $1.5 \mu\text{m}$  para L de 200 mm.

Restando las dos se tiene  $3.0 \mu\text{m} - 1.5 \mu\text{m} = 1.5 \mu\text{m}$ , valor que se multiplica por L y se divide entre la longitud que existe entre los dos puntos considerados en nuestro ejemplo

$600 \text{ mm} - 200 \text{ mm} = 400 \text{ mm}$ , obteniéndose que  $1.5 L/400 = 0.00375 \mu\text{m}$  con L en mm.

Si  $L = 200 \text{ mm}$  nos da una incertidumbre de  $\pm 0.75 \mu\text{m}$  que restándolo a  $1.5 \mu\text{m}$  nos da igual a  $0.75 \mu\text{m}$ , quedando finalmente  $\pm (0.75 + 0.00375 L)$  o lo que es lo mismo  $\pm (0.75 + 1.5 L/400) \mu\text{m}$  con L en mm.

