

2015



**TESIS**

**INTRODUCCIÓN DE MEJORAS EN EL PROCESO DE  
CALIBRACIÓN DE BLOQUES PATRÓN PARA EL  
ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA  
EN LOS TÉRMINOS DE ORDEN MAYOR.**

**PRESENTA:**

**ING. AGUSTÍN PÉREZ MALDONADO.**

**PARA LA OBTENCIÓN DEL GRADO DE  
MAESTRO EN *CIENCIA Y TECNOLOGÍA*  
CON ESPECIALIDAD EN *METROLOGÍA*.**

**DIRECTORA DE TESIS:**

**MTRA. MARTHA GUTIÉRREZ MUNGUÍA.**

**QUERÉTARO, 2015**



Director de Posgrado

PICYT – CIDESI

Querétaro

El abajo firmante, miembro del Comité Tutorial del alumno **Agustín Pérez Maldonado**, una vez leída y revisada la Tesis titulada **“Introducción de mejoras en el proceso de calibración de bloques patrón para el análisis de la influencia de la temperatura en los términos de orden mayor.”**, acepto que la referida tesis revisada y corregida sea presentada por el alumno para aspirar al grado de **Maestría en Ciencia y Tecnología** en la opción terminal de **Metrología** durante el Examen de Grado correspondiente.

Y para que así conste firmo la presente a los doce días del mes de agosto del año dos mil quince.

M. C. Martha Gutiérrez Munguía

Tutor Académico



Director de Posgrado

PICYT – CIDESI

Querétaro

Los abajo firmantes, miembros del Jurado del Examen de Grado del alumno **Agustín Pérez Maldonado**, una vez leída y revisada la Tesis titulada “**Introducción de mejoras en el proceso de calibración de bloques patrón para el análisis de la influencia de la temperatura en los términos de orden mayor.**”, aceptamos que la referida tesis revisada y corregida sea presentada por la alumna para aspirar al grado de **Maestría en Ciencia y Tecnología** en la opción terminal de **Metrología** durante el Examen de Grado correspondiente.

Y para que así conste firmamos la presente a los diecisiete días del mes de agosto del año dos mil quince.

Dr. José Julián III Montes Rodríguez  
Presidente

M.C. Carmen Marina Trejo Morales  
Secretaria

M. C. Martha Gutiérrez Munguía

Tutor Académico

## **AGRADECIMIENTO**

Agradezco a Dios por brindarme salud todo este tiempo y así lograr  
concluir con esta tesis.

Agradezco a mi familia por el apoyo y paciencia que fueron fundamentales  
durante el todo el tiempo de estudio de maestría.

Agradezco a Martha Gutiérrez Munguía, a Mario D. Díaz Orgaz y a  
Dania Covarrubias Martínez por su apoyo incondicional, por sus asesorías  
y revisiones que hicieron realidad la redacción de esta tesis.

## **DEDICATORIA**

Esta tesis está dedicada al desarrollo y avance tecnológico en la calibración de bloques patrón y medidas materializadas con fin común.

## ÍNDICE

CAPÍTULO 1: GENERALIDADES.....	4
ANTECEDENTES. ....	4
DEFINICIÓN DEL PROBLEMA .....	6
ESTADO DEL ARTE. ....	7
OBJETIVOS .....	8
OBJETIVO GENERAL.....	8
OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	8
HIPÓTESIS.....	9
ALCANCE.....	9
1. INTRODUCCIÓN.....	10
CAPÍTULO 2: DESARROLLO .....	12
2.1. TRAZABILIDAD METROLÓGICA.....	12
2.1.1. ASEGURAMIENTO DE LA TRAZABILIDAD METROLÓGICA.....	12
2.2. CONDICIONES DE REFERENCIA.....	15
2.3. BUENAS PRÁCTICAS DE MEDICIÓN. ....	17
2.4. ESTIMACIÓN DE LA INCERTIDUMBRE DE MEDIDA.....	21
2.4.1. GENERALIDADES:.....	21
2.4.2. EVALUACIÓN DE INCERTIDUMBRE ESTÁNDAR. ....	23
2.4.3. EVALUACIÓN DE INCERTIDUMBRE TIPO A. ....	23
2.4.4. EVALUACIÓN DE INCERTIDUMBRE TIPO B. ....	25
2.4.5. DISTRIBUCIONES DE PROBABILIDAD. ....	26
2.4.6. INCERTIDUMBRE ESTÁNDAR COMBINADA. ....	30
2.4.7. INCERTIDUMBRE EXPANDIDA. ....	34
2.4.8. FACTOR DE COBERTURA.....	35
2.4.9. PROCEDIMIENTO GENERAL PARA LA ESTIMACIÓN DE INCERTIDUMBRE EN LA CALIBRACIÓN DE BLOQUES PATRÓN. ....	35
2.5. METODOLOGÍA PARA LA ESTIMACIÓN DE INCERTIDUMBRE HASTA EL TERCER ORDEN EN LA CALIBRACIÓN DE BLOQUES PATRÓN. ....	37

2.5.1.	MODELO DE MEDICIÓN PROPUESTO POR EL LABORATORIO PARA LA CALIBRACIÓN DE BLOQUES PATRÓN LONGITUDINALES. ....	37
2.5.2.	EVALUACIÓN DE LOS COEFICIENTES DE SENSIBILIDAD O DERIVADAS PARCIALES. ....	39
2.5.3.	DETERMINACIÓN DE LAS DERIVADAS DE SEGUNDO ORDEN. ....	40
2.5.4.	COMPROBACIÓN DE LOS TÉRMINOS DE TERCER ORDEN O TERCERAS DERIVADAS. ....	44
2.5.5.	ESTIMACIÓN DE LAS INCERTIDUMBRES ESTÁNDAR. ....	50
CAPÍTULO 3: EXPERIMENTACIÓN. ....		52
3.1	EVALUACIÓN PRÁCTICA DE LA INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA. ....	52
3.2	PATRONES DEL LABORATORIO. ....	54
3.3.	CARACTERÍSTICAS DE LA SALA DE ALTA EXACTITUD. ....	59
3.4.	COEFICIENTES DE EXPANSIÓN TÉRMICA. ....	60
3.5.	HOJAS DE CÁLCULO. ....	64
3.6.	LÍMITES DE VARIACIÓN DE TEMPERATURAS. ....	69
3.7	AYUDAS VISUALES. ....	76
3.8.	ANÁLISIS DE LA VARIACIÓN DE LONGITUD. ....	78
3.8.1.	VARIACIÓN DE LONGITUD. GENERALIDADES. ....	78
3.8.2.	DETERMINACIÓN DE LA INCERTIDUMBRE PARA LA VARIACIÓN DE LONGITUD. ....	80
4.	DESARROLLO FUTURO. ....	87
5.	CONCLUSIONES. ....	90
6.	BIBLIOGRAFÍA. ....	91
LIBROS: ....		91
NORMAS: ....		91
ARTÍCULOS: ....		91
ANEXO A ....		92
EXTRACTO DE LA NORMA NMX-CH-3650-IMNC-2004. PATRONES DE LONGITUD – BLOQUES PATRÓN. ESPECIFICACIONES GEOMÉTRICAS DE PRODUCTO (EGP)- : DEFINICIONES, CLASIFICACIÓN DE GRADOS Y TOLERANCIAS ....		92
ANEXO B ....		99
TABLA DE COEFICIENTES DE EXPANSIÓN TÉRMICA. ....		99
ANEXO C ....		100

COMPORTAMIENTO DE TEMPERATURAS DENTRO DE LA CABINA PARA CALIBRACIÓN DE BLOQUES PATRÓN.....	100
ANEXO D.....	101
LISTA DE ACRÓNIMOS Y SÍMBOLOS .....	101

## CAPÍTULO 1: GENERALIDADES.

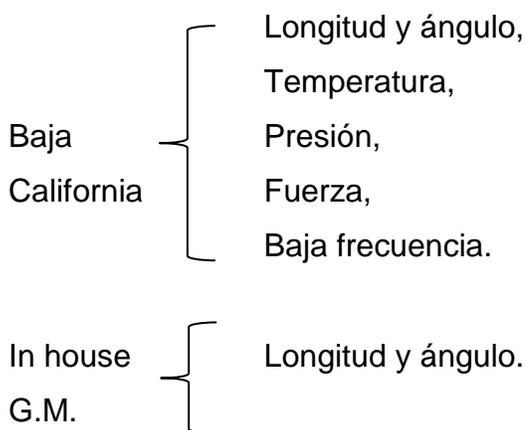
### ANTECEDENTES.

El Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial (CIDESI) fue fundado el 9 de marzo de 1984. Es un centro público de investigación que pertenece al sistema de centros CONACYT de México.

CIDESI tiene por finalidad contribuir al desarrollo del sector productivo de México mediante proyectos tecnológicos de investigación e innovación además de proveer servicios tecnológicos especializados de alto valor.

La Dirección de Metrología con sus laboratorios de calibración es la encargada del desarrollo de servicios tecnológicos especializados de calibración, medición, asesorías y capacitaciones en el campo de la Metrología. Actualmente el CIDESI cuenta con laboratorios de calibración en cuatro sedes: Querétaro, Nuevo León, Baja California y un laboratorio de Metrología Dimensional in house para la planta de Motores del complejo GM en Silao, acreditados todos por la entidad mexicana de acreditación en las siguientes magnitudes físicas:

Querétaro	}	<ul style="list-style-type: none"> <li>Longitud y ángulo,</li> <li>Masa,</li> <li>Temperatura,</li> <li>Presión,</li> <li>Volumen,</li> <li>Flujo,</li> <li>Densidad,</li> <li>Humedad,</li> <li>Válvulas de seguridad.</li> </ul>
Nuevo León	}	<ul style="list-style-type: none"> <li>Longitud y ángulo,</li> <li>Par torsional,</li> <li>Eléctrica.</li> </ul>



**Fig. 1. Laboratorios acreditados del CIDESI.**

Para CIDESI en la Dirección de Metrología, la magnitud con mayor antigüedad y en la que se ha desarrollado mayor experiencia es longitud y ángulo, también llamada dimensional.

La Dirección de Metrología está compuesta por cuatro gerencias: Mecánica que incluye a Dimensional Silao, Termofísica, Nuevo León y Baja California. El laboratorio de Metrología Dimensional en Querétaro cuenta con cinco salas de medición cuatro de media exactitud y una de alta exactitud en la cual se determinan variaciones de longitud del orden de los nanómetros [1].

Dentro de los alcances de medición acreditados, se encuentra el servicio de calibración de bloques patrón longitudinales con fundamento en el método de comparación descrito en la norma NMX-CH-3650-IMNC-2004 “Especificaciones geométricas de producto (EGP) - Patrones de longitud – Bloques patrón”, la cual está basada en la norma (ISO 3650:1998).

[1]  $1 \text{ nm} = 1 \times 10^{-9} \text{ m}$

## DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

Los usuarios de los bloques patrón longitudinales una vez calibrados generalmente los ocupan para la calibración de instrumentación básica, por ejemplo calibradores, micrómetros, medidores de alturas, etc. Estos instrumentos de medición exigen, por norma, ser calibrados con patrones de referencia que cumplan con cierto grado de exactitud ya que el uso de los bloques considerando los grados y sus correspondientes errores máximos tolerados garantiza la exactitud de ese tipo de mediciones de tal manera que posibilitan el uso del valor nominal de dicho patrón y no el uso del valor convencionalmente verdadero.

Para lo mencionado anteriormente los laboratorios que calibran bloques patrón de longitud deben garantizar que la incertidumbre de medida durante la calibración de estos sea del orden de  $1/3$  de la tolerancia de la desviación en longitud de los bloques de referencia para cada grado mencionados en la norma NMX-CH-3650.

Es bien conocido que la variación de longitud en Metrología Dimensional es debida en gran medida a la influencia de la temperatura, entre otras variables. La mayoría de los laboratorios de calibración acreditados en México modelan y realizan el análisis de incertidumbre solamente al primer orden. Esto conlleva a que se realice una incorrecta definición del mesurando y diseminación de la unidad de medida.

El laboratorio de Metrología Dimensional del CIDESI, con el afán de mantenerse a la vanguardia, se propone mejorar y garantizar el proceso de calibración mediante el análisis de la influencia de la temperatura en el valor de la incertidumbre de medida para bloques patrón en términos de orden mayor (segundo y tercero).

## ESTADO DEL ARTE.

Actualmente en México no hay criterios documentados para los laboratorios de calibración que calibren bloques patrón con respecto al análisis de incertidumbre y la dependencia de la exactitud con respecto a la temperatura, esto debido fundamentalmente a desconocimiento técnico y limitación de recursos.

Internacionalmente se conoce que algunos laboratorios de gran prestigio como son CENAM, PTB, NIST, INMETRO, todos laboratorios primarios, analizan y desarrollan sus análisis de incertidumbre de medida hasta el segundo orden.

CIDESI actualmente presenta acreditado el servicio de calibración de bloques patrón longitudinales, haciendo el análisis de la incertidumbre de medida hasta el segundo orden.

## **OBJETIVOS**

### **OBJETIVO GENERAL.**

Asegurar la calificación del grado de exactitud (0, 1 y 2) a los bloques patrón de longitud calibrados por el laboratorio de Metrología Dimensional del CIDESI, según la norma NMX-CH-3650, mediante el análisis de la influencia de la temperatura en la calibración de bloques patrón, determinando su incidencia, si se comprueba, hasta el tercer orden en la incertidumbre de medida a los diferentes materiales.

### **OBJETIVOS ESPECÍFICOS.**

1. Determinar la incertidumbre estándar combinada considerando los términos de primer, segundo y tercer orden (coeficientes de sensibilidad) para discriminar hasta que orden influye la incertidumbre de medida para la variable de temperatura.
2. Introducir mejoras en el procedimiento de estimación de incertidumbre a partir del resultado del objetivo 1.
3. Determinar los límites de variación de temperatura permitidos durante la calibración para avalar la discriminación del grado de exactitud de los bloques patrón.
4. Desarrollar una metodología validada y proponerla como guía a todos los laboratorios de calibración acreditados por ema.
5. Diseñar y elaborar las hojas de cálculo con precondiciones y alertas que garanticen la correcta discriminación de los grados de exactitud.

## **HIPÓTESIS.**

La correcta disseminación de la unidad de longitud en el laboratorio de Metrología Dimensional del CIDESI se garantiza a través del análisis de la influencia de la temperatura en el propio proceso de calibración, desarrollando el modelo de incertidumbre de medida hasta el tercer orden.

## **ALCANCE.**

Análisis de la influencia de la temperatura en la determinación de la longitud durante el proceso de calibración de bloques patrón, desarrollo e implementación de metodología para el análisis de incertidumbre.

## 1. INTRODUCCIÓN.

En México la calibración de bloques patrón según la norma NMX-CH-3650-IMNC-2004 de las clases de exactitud 0, 1 y 2 y sus equivalentes en sistema inglés 0, AS-1 y AS-2 según la norma ASME B89.1.9-2002 se desarrolla, prácticamente, al 90% por los laboratorios de calibración acreditados por ema y el 10% restante es atendido por CENAM.

Los usuarios de este tipo de patrones, en la mayoría de los casos, los utilizan en calibraciones y ajustes de instrumentos de medición considerando solamente su clase o grado de exactitud, sin hacer correcciones a la longitud medida debido fundamentalmente a que los bloques patrón longitudinales son muy exactos comparados con las exactitudes de estos instrumentos. Tal es el caso de la calibración de instrumentos de baja exactitud de las familias de calibradores y micrómetros, entre otros. Resulta entonces que para estos tipos de actividades metrológicas es imprescindible la correcta determinación de las incertidumbres para garantizar la adecuada clasificación de los bloques y proporcionar así a las industrias la certeza en sus procesos de medida.

Actualmente en México existen alrededor de 17 laboratorios acreditados para la calibración de bloques patrón. En los procesos de acreditación y guías técnicas hay especificaciones generales de estricto cumplimiento, pero no se establecen criterios documentados específicos que exijan el análisis de incertidumbre considerando la influencia de la temperatura, en órdenes superiores de exactitud.

Este detalle hace que algunos laboratorios estén clasificando los bloques patrón en grados de exactitud sin una correcta consideración de los términos de segundo orden, lo que ha provocado dudas al respecto.

La tendencia metrológica indica que para clasificar en grados o clases de exactitud en cuanto a desviación en longitud central y desviación de paralelismo, la incertidumbre de calibración debe ser del orden del tercio del error máximo permitido

para cada valor nominal del bloque en cada una de las clases de exactitud. Algunos laboratorios analizan y desarrollan sus modelos matemáticos de incertidumbre hasta el segundo orden.

El Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial (CIDESI), uno de los 17 laboratorios acreditados para el servicio de calibración de bloques patrón, considera el análisis de la influencia de la temperatura hasta el segundo orden y realizó estudios de la influencia de la temperatura hasta el tercer orden para verificar el impacto en el valor de la incertidumbre total de medida.

El desarrollo del modelo matemático para la expresión de la incertidumbre y su desarrollo hasta términos del tercer orden, dará como conclusión si esta variable de influencia aporta aún a la incertidumbre de medida en estos ordenes de exactitud.

## **CAPÍTULO 2: DESARROLLO**

### **2.1. TRAZABILIDAD METROLÓGICA.**

Se define trazabilidad metrológica como: Propiedad de un resultado de medida por la cual el resultado puede relacionarse con una referencia mediante una cadena ininterrumpida y documentada de calibraciones, cada una de las cuales contribuye a la incertidumbre de medida.

La trazabilidad metrológica, se puede lograr directamente calibrando los patrones con el Centro Nacional de Metrología (CENAM) o con otro instituto nacional extranjero que haya firmado el arreglo de reconocimiento mutuo (MRA) y también es posible lograr la trazabilidad metrológica calibrando los patrones con un laboratorio de calibración acreditado bajo una entidad reconocida como es el caso de ema.

El laboratorio de Metrología Dimensional de CIDESI, logra la trazabilidad de sus patrones para la calibración de bloques patrón, calibrando directamente con el Centro Nacional de Metrología (CENAM) y realiza las correcciones necesarias debido a las desviaciones de los patrones y considera la incertidumbre de medida de los patrones en la estimación de incertidumbre que se realiza para cada servicio, cuenta con los certificados de calibración vigentes y de esta manera garantiza la exactitud del método y la correcta trazabilidad

#### **2.1.1. ASEGURAMIENTO DE LA TRAZABILIDAD METROLÓGICA.**

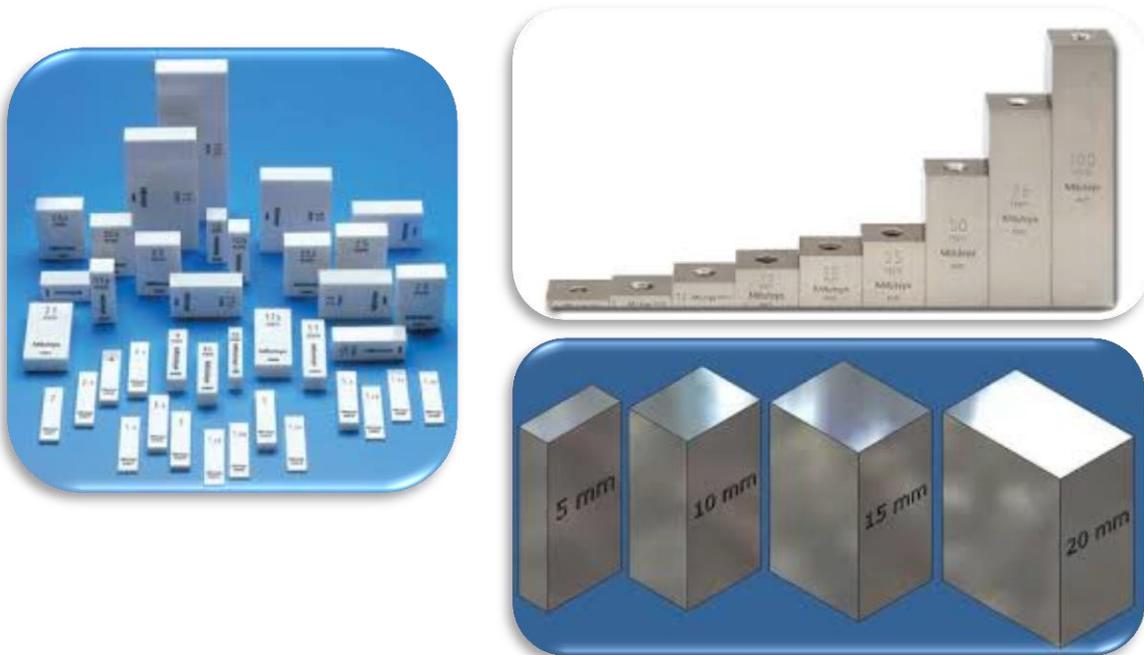
La forma en que se garantiza la trazabilidad metrológica es a través de la inclusión de las incertidumbres de calibración en los presupuestos de incertidumbre como incertidumbres heredadas del patrón y/o de la realización de las correspondientes correcciones de los errores de los patrones que se usan en cada calibración.

El CIDESI asegura la trazabilidad metrológica actualizando los formatos para el servicio de calibración de bloques patrón cada vez que los patrones de referencia son calibrados, considerando matemáticamente la desviación del patrón en las lecturas

del instrumento bajo calibración (IBC) y actualizando las incertidumbres en la hoja de estimación de incertidumbre, esto ocurre según estudios estadísticos de períodos de calibración de 12 a 24 meses.

Los patrones de referencia para la calibración de bloques patrón longitudinales por comparación mecánica deben de ser:

- Bloques grado K, clase de mayor exactitud según norma de referencia NMX-CH-3650 (ver anexo A).



**Fig. 2. Juegos de bloques patrón usados como patrones de referencia.**

- Comparador electromecánico de con resolución de  $0,01 \mu\text{m}$  ó  $0,002 \mu\text{m}$ .



**Fig. 3. Comparadores de bloques patrón.**

- Termómetro con resolución de al menos  $0,01 \text{ }^\circ\text{C}$ . Cabe mencionar que dichos patrones deben de contar con su certificado de calibración vigente.



**Fig. 4. Termómetro para el monitoreo y registro de las condiciones ambientales.**

## 2.2. CONDICIONES DE REFERENCIA.

Las condiciones ambientales dentro del laboratorio de Metrología Dimensional del CIDESI se registran y son controladas dentro de las especificaciones indicadas para cada tipo específico de medición y/o calibración.

Estas condiciones pueden ser establecidas por documentos técnico-normalizados nacionales o internacionales como por ejemplo, la norma ISO 1:2002 o su idéntica, la norma NMX-CH-100:2005 Especificaciones Geométricas de Producto (GPS) -Temperatura de referencia normalizada para especificaciones y verificaciones geométricas de los productos y la Guía Técnica de Trazabilidad Metrológica e Incertidumbre de Medida en Metrología Dimensional ema-CENAM del año 2013.

La temperatura es la variable de influencia más relevante en Metrología Dimensional. Considerando la norma NMX-CH-100 la temperatura de referencia siempre será, para el caso de mediciones y calibraciones dimensionales salvo que se estipule lo contrario por propia necesidad del método, de 20 °C y en general cualquier laboratorio de Metrología Dimensional deberá garantizar esta temperatura en  $\pm 1$  °C dentro del recinto del laboratorio y a lo largo del día.

Para demostrar esto el laboratorio debe contar con instrumentación para el monitoreo de la temperatura ambiente con una resolución de al menos de 0,5 °C para instrumentos convencionales y de 0,01°C para el caso de la calibración de bloques patrón e instrumentos de alta exactitud.

Es necesario señalar también que esta instrumentación para el monitoreo y control de las condiciones ambientales deberá estar ubicada en la zona de trabajo, lo más cercana posible a los instrumentos que se calibran y patrones de calibración, considerando además que en algunos tipos de calibraciones deberá estar en contacto con los ítems de calibración. Los registros de las condiciones ambientales deben guardarse con la finalidad de crear un historial que nos permita elaborar gráficas y analizar tendencias, así como para efectos de poder reproducir la condición ambiental

lo más cercano posible al momento de la medición en caso de necesitarse.

El laboratorio de Metrología Dimensional del CIDESI cuenta con un sistema automatizado de registros de temperatura. Este control monitorea la temperatura cada minuto los 365 días del año en todas las salas de medición y en las estaciones de trabajo. Los registros electrónicos están disponibles en el propio sistema en formato Excel.

En la actualidad el sistema está programado para que encienda las máquinas de suministro de aire acondicionado los días lunes a las 06h00 y desconecte las máquinas el viernes a las 21h00, esto solamente con el único objetivo de ahorrar energía eléctrica.

Este es un sistema automático en su funcionamiento pero puede ser manipulado para que en caso que se tenga que trabajar los fines de semana podamos evitar esta desconexión. Esta no se hace aplicable para la sala de alta exactitud debido a que en ella no se apagan los aires, es decir, se conmutan las dos máquinas para que siempre esté garantizando la condición ambiental de la temperatura.

Para las salas del laboratorio en las que se apaga la climatización durante los fines de semana u otro período de tiempo, se establece un tiempo de estabilización necesario para poder comenzar a calibrar el cual no podrá ser inferior a 2 h y en caso de instrumentos de grandes dimensiones o de media y alta exactitud estos tiempos de estabilización son mayores, como el caso de bloques patrón longitudinales.

En caso de calibración de patrones o instrumentos de alta exactitud, como bloques patrón, por ejemplo, es necesario un control de temperatura en la zona de calibración mejor que  $\pm 0,5$  °C; recomendándose además monitorear este control con un instrumento calibrado con resolución de 0,01 °C, todo ello de acuerdo al tipo de instrumento o patrón bajo calibración y de la incertidumbre de que en dicho servicio se declare.

Existen métodos de calibración ya normalizados en los que se incluyen controles estadísticos como requisitos para la buena aplicación de los mismos. Es el caso de la calibración de bloques patrón por comparación mecánica.

Para los bloques patrón longitudinales se establece el criterio de que la diferencia entre las mediciones de un mismo punto en series diferentes no debe exceder el valor de  $0,02 \mu\text{m}$  (20 nm). Si esta condición no se cumple hay que desechar esa serie de medición y volver a medir, lo que hace de esta una condición para mantener el método bajo control.

### 2.3. BUENAS PRÁCTICAS DE MEDICIÓN.

Para una calibración de alta exactitud es importante considerar criterios y llevarlos a cabo para garantizar la confiabilidad de las mediciones, dichos criterios son adquiridos de documentos oficiales como son las normas nacionales o internacionales, recomendaciones de fabricantes, y muchas veces de la misma experiencia.

Para la calibración de bloques patrón longitudinales el laboratorio considera como buenas prácticas de medición las que se enumeran, aunque no son restrictivas:

- **Limpieza y control de partículas de polvo:** Se debe de garantizar una correcta limpieza de los patrones de referencia y el bloque patrón a calibrar (IBC) antes y durante el tiempo de calibración, de esta manera se garantiza que no se encontrarán residuos de aceite o partículas de polvo que provoquen lecturas fuera de la especificación del patrón. Para ilustrar lo anteriormente se considera que una partícula de polvo mide aproximadamente  $3 \mu\text{m}$ . Con este valor el bloque patrón quedaría fuera de toda clase de exactitud, si es que se logra medir. El laboratorio cuenta con cabinas y perillas de aire para garantizar que no existen partículas de polvo durante la calibración.
- **Desmagnetizar:** Desmagnetizando el bloque patrón a calibrar se garantiza que los palpadores no sean atraídos o rechazados por el campo magnético provocando una mala palpación y también se evita la atracción de partículas de polvo.

El laboratorio considera dentro del procedimiento CID-PR-SC-MT-MTD-005 en el apartado de limpieza la operación de comprobar la existencia de la magnetización en los bloques metálicos y de ser probada la existencia de esta, proceder a desmagnetizarlos.

- **Uso de patrones de referencia con calibración vigentes y con trazabilidad a patrones nacionales o internacionales:** De esta manera se realiza una correcta definición del mesurando y disseminación de la unidad de medida.

- **Seleccionar la correcta clase de exactitud del patrón de referencia:** Para la calibración de bloques patrón longitudinales se debe de considerar el grado K según norma NMX-CH-3650, ver anexo A, ya que es el grado más exacto y de esta manera se puede encontrar el error de los grados inferiores. No se permite hacer calibraciones donde el patrón de referencia sea del mismo grado que el que se desea calibrar, es decir si el bloque patrón a calibrar es grado 0, el patrón de referencia no debe de ser del mismo grado, siempre debe de ser grado K.

- **Considerar tiempo para la estabilidad térmica y de posición:** Se debe de considerar un tiempo antes de iniciar la calibración para garantizar que los bloques patrón se encuentran estabilizados térmicamente. El laboratorio realizó un estudio experimental encontrando que para el bloque de 100 mm se requiere un tiempo aproximado de 45 minutos para lograr la estabilidad térmica en el lugar indicado dentro de la cabina.

- **Realizar las mediciones dentro de los intervalos de temperatura recomendados:** considerando la temperatura de referencia de 20°C de esta manera se garantiza la estabilidad de longitud de los patrones y tiene mayor impacto cuando los bloques sean de diferente material y diferente coeficiente de expansión térmica.

- **Para la manipulación se deben de utilizar aislantes térmicos:** Minimizar las fuentes que generen calor, evitar la manipulación de los bloques directamente con la mano esto para impedir la transferencia de calor del cuerpo humano, evitar el contacto directo con las manos y evadir gradientes de temperatura que alterarán la longitud. El laboratorio manipula los patrones y bloques a calibrar con guantes de algodón y pinzas de bambú.

- **Evitar fuentes de vibraciones:** En el sistema de calibración de bloques patrón longitudinales se debe de tener estricta atención con las fuentes de vibraciones y minimizarlas al máximo debido a que son un factor que provocan la no repetibilidad, ya que las lecturas de alta exactitud están en el orden de los nanómetros ( $1 \times 10^{-9}$  m). El sistema de calibración de bloques patrón del laboratorio, cuenta con mesas rígidas y vibracheck.

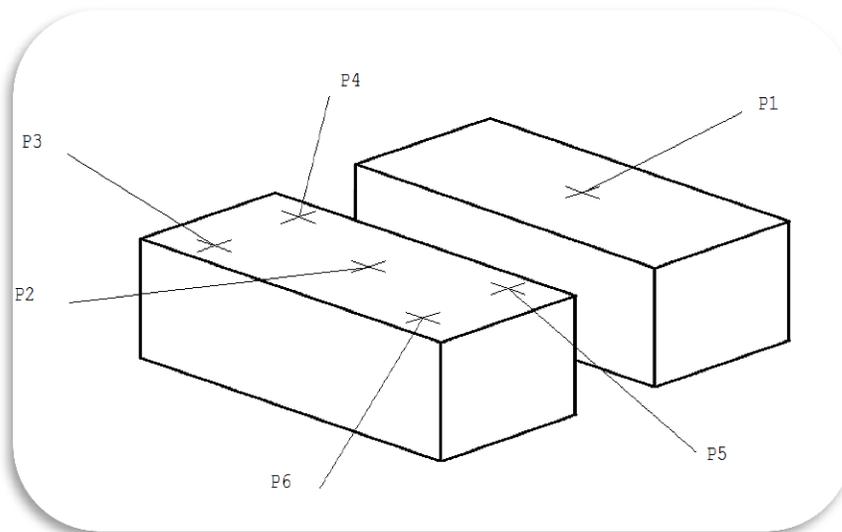
- **No realizar mediciones con movimientos bruscos:** Con movimientos bruscos se pueden generar inercias ocasionando así una incorrecta palpación o posible colisión obteniendo mala repetibilidad.

- **Emplear los patrones de referencia solamente para un fin determinado:** De esta manera se evitan daños, desgastes y exposición a cambios bruscos de temperatura que ocasionan que la exactitud se degrade.

- **Criterio de repetibilidad:** Se deben de considerar criterios de repetibilidad para garantizar la confiabilidad de los resultados. El laboratorio tiene considerado dentro del método de calibración de bloques patrón longitudinales un criterio de repetibilidad al término de cada ciclo de calibración de  $\pm 0,02 \mu\text{m}$  ( $\pm 20$  nm), con esta variación se considera que no se pierde el ajuste y que los errores aleatorios no influyeron garantizando así que el método está bajo control. Si se obtiene una variación mayor se desecha la serie de lecturas.

Ejemplo de Ciclo de calibración:

Observemos la disposición y orden de los puntos de medición en la figura 5.



**Figura 5. Identificación de los puntos de medición en los bloques rectangulares.**

Inicio de ciclo:  $P1_0 = \text{ajuste}$ .

Fin del ciclo:  $P1_f$

$P1_0$  P2 P3 P4 P5 P6  $P1_f$

Lecturas obtenidas:

$P1_0 = 0,00 \mu\text{m}$

$P2 = 0,04 \mu\text{m}$

$P3 = 0,06 \mu\text{m}$

$P4 = 0,01 \mu\text{m}$

$P5 = 0,02 \mu\text{m}$

$P6 = 0,01 \mu\text{m}$

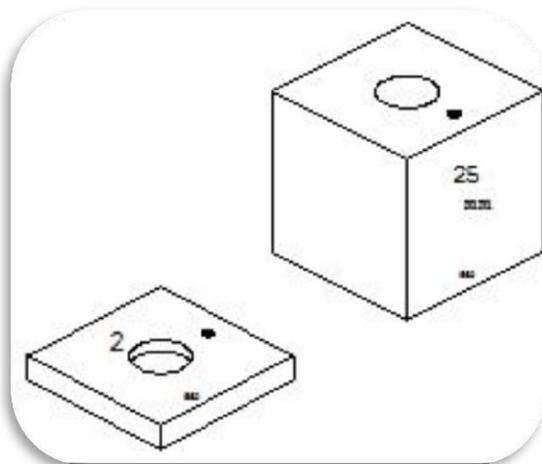
$P1_f = 0,01 \mu\text{m}$

La variación de P1 al inicio y término del ciclo es:

$$(P1_f - P1_0) = (0,01 \mu m - 0,00 \mu m) = 0,01 \mu m$$

Se cumple con el criterio de  $\pm 0,02 \mu m$ , se aceptan los resultados de los puntos P2, P3, P4, P5, P6, esta operación se repite tres veces. En el caso de no cumplir con el criterio se desecha la serie de lecturas hasta que se obtengan tres ciclos dentro del criterio.

El mismo criterio se considera para bloques cuadrados:



**Figura 6. Identificación de los puntos de medición en los bloques cuadrados.**

## 2.4. ESTIMACIÓN DE LA INCERTIDUMBRE DE MEDIDA.

### 2.4.1. GENERALIDADES:

Uno de los aspectos más importantes, como hemos señalado, durante la calibración de los bloques patrón es la estimación de la incertidumbre de medida.

La estimación de la incertidumbre de medida debe ser un procedimiento bien establecido y profesionalmente diseñado para que obtengamos el valor correcto de la estimación, es decir, ni subestimada ni sobreestimada.

La palabra “incertidumbre” significa duda, y por tanto, en un sentido más amplio “incertidumbre de medición” significa duda en la validez del resultado de una medición.

1. La definición formal del término “incertidumbre” que se ha desarrollado es la siguiente: parámetro no negativo que caracteriza la dispersión de los valores atribuidos a un mensurando a partir de la información que se utiliza.

Notas:

- La incertidumbre de medida incluye componentes procedentes de efectos sistemáticos, tales como componentes asociadas a correcciones y a valores asignados a patrones, así como la incertidumbre debida a la definición. Algunas veces no se corrigen los efectos sistemáticos estimados y en su lugar se tratan como componentes de incertidumbre.
- El parámetro puede ser, por ejemplo, una desviación típica, en cuyo caso se denomina incertidumbre típica de medida, o una semiamplitud con una probabilidad de cobertura determinada.
- En general, la incertidumbre de medida incluye numerosas componentes. Algunas pueden calcularse mediante una evaluación tipo A de la incertidumbre de medida, a partir de la distribución estadística de los valores que proceden de las series de mediciones y pueden caracterizarse por desviaciones típicas. Las otras componentes, que pueden calcularse mediante una evaluación tipo B de la incertidumbre de medida, pueden caracterizarse también por desviaciones típicas, evaluadas a partir de funciones de densidad de probabilidad basadas en la experiencia u otra información.

Por su parte la **Incetidumbre estándar**, parcial o individual es la incertidumbre del resultado de una medición expresada como una desviación estándar, se denota por  $u(x_i)$

La incertidumbre de medida está compuesta tanto por incertidumbres tipo A e incertidumbres tipo B.

## 2.4.2. EVALUACIÓN DE INCERTIDUMBRE ESTÁNDAR.

En la mayoría de los casos, el mensurando  $Y$  no se mide directamente si no que se le determina a partir de otras  $N$  magnitudes  $X_1, X_2, \dots, X_n$ , a través de una relación funcional  $f$ :

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_n) \quad (1)$$

Las magnitudes de entrada  $X_1, X_2, \dots, X_n$  de las cuales depende la magnitud de salida  $Y$ , pueden visualizarse a su vez como mensurandos y depender de otras magnitudes, incluyendo correcciones y factores de corrección para efectos sistemáticos, todo ello dando lugar a una complicada relación funcional  $f$  que pudiera nunca expresarse explícitamente. Adicionalmente,  $f$  puede determinarse experimentalmente o existir solo como un algoritmo que deba evaluarse numéricamente. La función  $f$  debe interpretarse en este sentido más amplio, es decir, como aquella función que contiene cada magnitud, incluyendo todas las correcciones y factores de corrección, que puedan contribuir con componentes significativos de incertidumbre al resultado de la medición.

Por lo tanto si los datos indican que  $f$  no modela la medición al grado impuesto por la exactitud requerida del resultado de medición, entonces se deben incluir las magnitudes de entrada adicionales en  $f$  para eliminar el problema. Esto puede requerir la introducción de una magnitud de entrada que sirva para reflejar la carencia de conocimiento de un fenómeno que afecta al mensurando.

## 2.4.3. EVALUACIÓN DE INCERTIDUMBRE TIPO A.

Método para evaluar la incertidumbre mediante el análisis estadístico de una serie de observaciones.

Se conoce como incertidumbre de Tipo A, a aquel valor de variabilidad que se obtiene de realizar un conjunto de mediciones repetidas al mensurando en cuestión, o a alguna de las magnitudes influyentes en el mismo.

El método de obtención que da lugar a la incertidumbre de tipo A, es asociar ésta a la desviación estándar de una serie de observaciones repetidas. De ahí que, como la misma depende inversamente de “n” (número de mediciones), se interprete mal como la componente aleatoria. Se puede, entonces, a través del estimador insesgado (desviación estándar) de  $\sigma$  cuantificar la incertidumbre; recordando que se empleará como resultado la media del conjunto de mediciones realizadas, lo apropiado sería considerar la desviación estándar insesgada de la media. Es por ello, que la desviación estándar de la media de una serie de mediciones, no se entiende como la dispersión de la media, sino como la componente de incertidumbre de tipo A, ya que el error aleatorio no puede ser conocido exactamente.

La estimación de una componente de incertidumbre como tipo A, de cierta forma presupone que consideremos que la función de distribución de la variable es normal, ya que, como regla general, se emplea la fórmula de la desviación estándar de la media obtenida de la función de la distribución mencionada; aspecto que no se aleja mucho de la realidad.

Es común que si se realiza un histograma con las frecuencias obtenidas de estudiar una variable aleatoria se obtenga que éste es simétrico, que declina con bastante rapidez por sus extremos y que tiene una forma parecida a una campana. Este modelo matemático ha probado ser de gran utilidad, puesto que cumple con los tres requisitos indispensables para distribuciones del estilo mencionado y que son:

- Ser una función par, lo que se traduce en que los errores de signos opuestos e igual magnitud sean igualmente probables.
- Ser monótona decreciente la rama positiva, es decir, los errores mayores en valor absoluto son menos probables.
- Ser finita la esperanza matemática del valor absoluto de un error.

En la mayoría de los casos, la mejor estimación disponible de la esperanza o valor esperado  $\mu_q$  de una magnitud  $q$  que varía aleatoriamente y de la cual se han

obtenido  $n$  observaciones independientes  $q_k$  bajo las mismas condiciones de medición es la media aritmética o promedios  $\bar{q}$  de las  $n$  observaciones:

$$\bar{q} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n q_k \quad (2)$$

Donde:

$\bar{q}$  El promedio de las mediciones.

$n$  Número de mediciones.

$q_k$  Observaciones individuales.

Las observaciones individuales  $q_k$  difieren en valor debido a las variaciones aleatorias en las magnitudes que las afectan, es decir, debido a estos efectos aleatorios la varianza experimental de las observaciones, la cual estima la varianza  $\sigma^2$  de la distribución de probabilidad de  $q$ , está dada por:

$$s^2(q_k) = \frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^n (q_k - \bar{q})^2 \quad (3)$$

Donde:

$s^2(q_k)$  Es la varianza de las observaciones  $q_k$ .

Esta estimación de la varianza y su raíz cuadrada positiva  $s(q_k)$ , denominada desviación estándar experimental caracterizan la variabilidad de los valores observados  $q_k$ , o más específicamente, su dispersión alrededor de la media  $\bar{q}$ .

#### 2.4.4. EVALUACIÓN DE INCERTIDUMBRE TIPO B.

Método para evaluar la incertidumbre por otro medio que no sea el análisis estadístico de una serie de observaciones.

Para una estimación  $x_i$  de una magnitud de entrada  $X_i$  que no se obtuvo de observaciones repetidas, la varianza estimada  $u^2(x_i)$  o la incertidumbre estándar se

evalúa mediante juicios y criterios científicos basados en toda información disponible sobre la variabilidad de  $X_i$ . Esta información puede incluir:

- Datos de mediciones anteriores.
- Experiencia con el conocimiento general de las características y el comportamiento y las propiedades de los materiales e instrumentos relevantes.
- Especificaciones de los fabricantes.
- Datos obtenidos de los certificados de calibración.
- Datos obtenidos de manuales técnicos.
- Información obtenida de normas.

La necesidad de evaluar la incertidumbre como tipo B nace del hecho de que, para llevar a cabo una investigación estadística de todas las causas posibles de incertidumbre, a través de largas series de mediciones se requeriría de tiempo y recursos ilimitados, lo cual no es económico ni práctico. Por lo tanto, se emplea el previo conocimiento de la variable.

En este caso se utiliza el cálculo de la desviación estándar de distribuciones de probabilidad. Entre las más utilizadas, se encuentran la **distribución normal**, la **rectangular** y la **triangular**.

#### 2.4.5. DISTRIBUCIONES DE PROBABILIDAD.

Para el tratado de las incertidumbres estándar se debe asociar un tipo de distribución a la variable de entrada  $x_i$ . También se tiene que considerar que antes de comparar y combinar contribuciones de incertidumbre que tienen distribuciones diferentes, es necesario representar los valores de la incertidumbres originales como incertidumbres estándar representadas a un sigma ó al 68,27%.

Las distribuciones más frecuentes en la estimación de incertidumbre son:

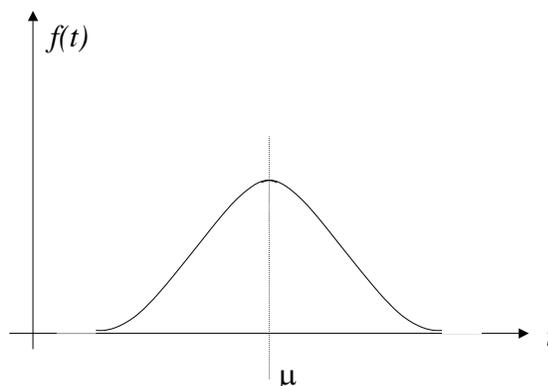
### **Distribución normal.**

Los resultados de una medición repetida afectada por una o más magnitudes de influencia que varían aleatoriamente, generalmente siguen en buena aproximación una distribución normal. También la incertidumbre de medida indicada en certificados de calibración se refiere generalmente a una distribución normal.

La desviación estándar experimental de la media calculada a partir de los resultados de una medición repetida ya representa la incertidumbre estándar, sin embargo cuando se calcula la desviación estándar con una pequeña muestra de mediciones, menores a 10, es buena práctica considerar la ecuación (4) para estimar la incertidumbre estándar debido a la repetibilidad.

La distribución normal de probabilidad es una distribución continua simétrica. La importancia de esta distribución en la estadística inferente se debe a las siguientes razones:

- Las mediciones que se obtienen en muchos procesos aleatorios tienen este comportamiento.
- Frecuentemente se utilizan probabilidades normales para aproximar otras distribuciones de probabilidad, por ejemplo, Poisson, Binomial.
- Las distribuciones de estadística como la media muestral y la proporción muestral tienen una distribución normal, cuando la muestra es grande, sin importar la forma de la distribución de la población de origen.



**Figura 7: Gráfica de la función de distribución normal.**

$$u(x_i) = \frac{s}{\sqrt{n}} (t_{student}) \quad (4)$$

Cuando se dispone de valores de una incertidumbre expandida  $\pm U$ , como los presentados en certificados de calibración, se divide  $U$  entre el factor de cobertura  $k$ , para tener la incertidumbre estándar.

$$u(x_i) = \frac{U}{k} \quad (5)$$

### Distribución rectangular.

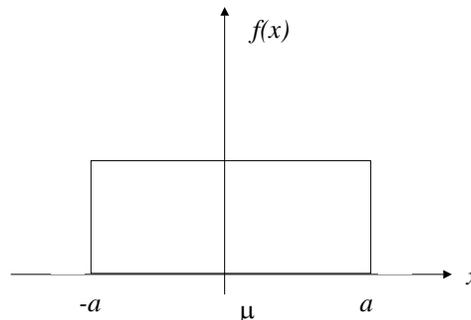
En una distribución rectangular cada valor en un intervalo dado tiene la misma probabilidad, o sea la función de densidad de probabilidad es constante en este intervalo. Algunos ejemplos son la resolución de un instrumento digital, pruebas de repetibilidad. En general, cuando exclusivamente hay conocimiento de los límites superior e inferior del intervalo de variabilidad de la magnitud de entrada, lo más conservador es suponer una distribución rectangular.

Si la magnitud de entrada  $X_i$  tiene una distribución rectangular con el límite superior  $a_+$  y el límite inferior  $a_-$ , el mejor estimado para el valor de  $X_i$  está dado por:

$$x_i = \frac{a_+ + a_-}{2} \quad (6)$$

Y la incertidumbre estándar se calcula por:

$$u(x_i) = \frac{a}{\sqrt{12}} \quad (7)$$



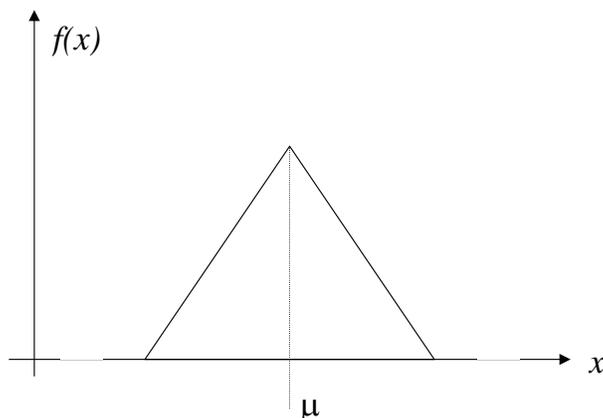
**Figura 8: Gráfica de la función de distribución rectangular.**

### Distribución triangular.

Este tipo de distribución se da cuando se conocen los límites superior, inferior y hay evidencia de que la probabilidad es más alta para valores en el centro del intervalo. Información obtenida de documentos oficiales reconocidos como las normas de referencia, puede asociarse una distribución triangular.

La incertidumbre estándar se calcula en este caso por:

$$u(x_i) = \frac{a_+ - a_-}{\sqrt{24}} = \frac{a}{2\sqrt{6}} \quad (8)$$



**Figura 9: Gráfica de la función de distribución triangular**

### Distribución senoidal.

También conocida como distribución tipo U, debido a que el comportamiento de la variable es oscilatorio, ejemplo el comportamiento de la temperatura controlada sigue un comportamiento oscilatorio y a esta variable podría asociarse una distribución senoidal.

La incertidumbre estándar se calcula:

$$u(x_i) = \frac{a}{\sqrt{2}} \quad (9)$$

### 2.4.6. INCERTIDUMBRE ESTÁNDAR COMBINADA.

En la temática de estimación de incertidumbre lo que se necesita conocer es la incertidumbre del resultado de medición. Es decir, conocer cómo afecta al resultado las pequeñas variaciones de cada una de las magnitudes influyentes. Para ello, se emplea la incertidumbre combinada que, como su nombre lo indica, es una combinación de las incertidumbres tipo A y B.

Cuando se reporta el resultado de una medición, el valor del mensurando se expresa de la siguiente manera:

$$Y = y \pm U \quad (10)$$

Donde:

$y$  es el mejor estimado del mensurando,

$U$  es la incertidumbre total o expandida de medición y se determina mediante:

$$U = ku_c(y) \quad (11)$$

Donde:

$k$  es un factor multiplicativo (de cobertura) que toma valores de 1 a 3;

$u_c(y)$  es la incertidumbre combinada del mensurando, cuya expresión matemática es la raíz cuadrada de la varianza combinada (Ley de propagación de errores):

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^N \left[ \frac{\partial f}{\partial x_i} u(x_i) \right]^2} \quad (12)$$

Donde

cada  $u_c(x_i)$  es la incertidumbre estándar para cada  $X_i$  evaluada para cada variable, ya sea del tipo A o B.

Las derivadas parciales o coeficientes de sensibilidad:

$$\frac{\partial f}{\partial x_i} = \frac{\partial f(X_1, X_2, \dots, X_N)}{\partial X_i} \Big|_{x_i} = c_i \quad (13)$$

Se les conoce como los coeficientes de sensibilidad y permiten saber cuál es la variación de la magnitud de salida (mensurando), en función de las variaciones de las diferentes magnitudes de entrada. Es aquí donde se ve la importancia de modelar matemáticamente el proceso, ya que de forma contraria, no se podrían conocer las derivadas. El diseñar experimentos de variaciones, con el objetivo de hacer una determinación experimental, tiene la desventaja de que al tratar de determinar un coeficiente de sensibilidad, por mucho que se intente, no se puede tener a las otras variables de influencia totalmente como constantes.

Veamos en detalle a los coeficientes de sensibilidad.

El coeficiente de sensibilidad describe, qué tan sensible es el mensurando con respecto a variaciones de la magnitud de entrada correspondiente.

Si el modelo matemático para el mensurando  $Y = f(X_1, X_2, \dots, X_n)$  describe la influencia de la magnitud de entrada  $X_i$  suficientemente bien mediante una relación funcional, el coeficiente de sensibilidad  $c_i$  se calcula por la derivada parcial de  $f$  con respecto a  $X_i$ :

$$c_i = \frac{\partial f(X_1, \dots, X_n)}{\partial X_i} \quad (14)$$

El coeficiente de sensibilidad  $C_i$  relacionado con una magnitud de entrada determinada  $X_i$  describe el impacto que tiene una variación de  $X_i$  en el mensurando  $Y$ , mientras todas las demás magnitudes de entrada se mantienen constantes. En un lenguaje matemático eso significa que se obtiene  $c_i$  determinando la derivada parcial de  $Y$  con respecto a  $X_i$ .

Ejemplo:

La dilatación o contracción de un bloque patrón debida a cambios de su temperatura se describe por:

$$l(T) = l_0 + (\alpha)(l_0)(T - T_0) \quad (15)$$

Donde:

$l(T)$  Es la longitud del bloque patrón a la temperatura actual  $T$ .

$l_0$  Es la longitud a la temperatura de referencia  $T_0$ .

$\alpha$  Es el coeficiente de dilatación térmica.

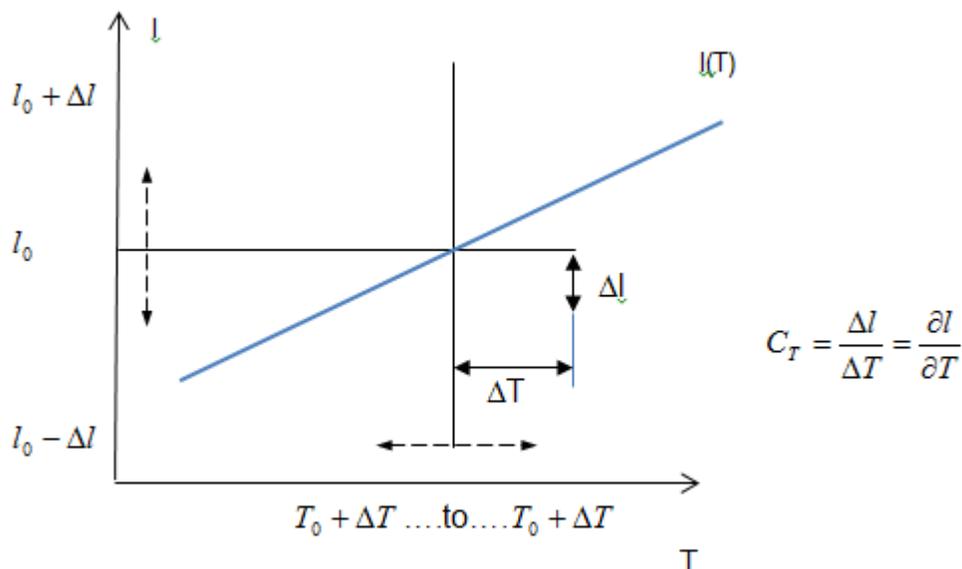
$$(T - T_0) = \Delta T$$

Una variación de la temperatura  $T$  causara variaciones de la longitud del bloque patrón alrededor de  $l_0$ .

Realizando la derivada parcial se tiene:

$$\frac{\partial l(T)}{\partial \Delta T} = (\alpha)(l_0) \quad (16)$$

Gráficamente se tiene:



**Figura 10: Ejemplo gráfico en la determinación del coeficiente de sensibilidad.**

Rescribiendo la ecuación  $u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^N \left[ \frac{\partial f}{\partial x_i} u(x_i) \right]^2}$  como:

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^N [c_i u(x_i)]^2} \quad (17)$$

Si generalizamos, cada una de las incertidumbres asociadas a los diferentes parámetros de influencia se puede estimar a través de cualquiera de los dos tipos de evaluaciones (A y B) descritos anteriormente. Y, una vez teniendo el modelo simplemente derivando, se puede entonces estimar la incertidumbre de la magnitud medida.

Un aspecto interesante de esta Ley es que puede aplicarse si se requiere determinar la incertidumbre de medida de una variable ( $z$ ) que depende de otra ( $y$ ), que a su vez es función de otros parámetros ( $y = f(x_i)$ ), entonces se puede determinar, primeramente, la incertidumbre de “ $y$ ” empleando la ley de propagación y luego volverla a emplear para determinar la incertidumbre de  $z$ .

Nótese que el resultado de la aplicación de la Ley de propagación de errores, no es más que la desviación estándar del mensurando, es decir, es una medida de la variabilidad de éste.

La ecuación y su contra parte para las magnitudes de entrada correlacionadas las cuales están basadas en una aproximación en serie de Taylor de primer orden de  $Y = f(X_1, X_2, X_3, \dots, X_n)$  expresan lo que se denomina propagación de incertidumbres.

Cuando la no linealidad de  $f$  es significativa, deben incluirse términos de orden superior en la expansión de serie de Taylor de la expresión para  $u^2_c(y)$ . Cuando la distribución de cada  $X_i$  es simétrica alrededor de su promedio, los términos más importantes del siguiente orden mayor que deben ser sumados al término de la ecuación son:

$$\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \left[ \frac{1}{2} \left[ \frac{\partial^2 f}{\partial x_i \partial x_j} \right]^2 + \frac{\partial f}{\partial x_i} \frac{\partial^3 f}{\partial x_i \partial x_j \partial x_j^2} \right] u^2(x_i) u^2(x_j) \quad (18)$$

#### 2.4.7. INCERTIDUMBRE EXPANDIDA.

Cantidad que define un intervalo alrededor de una medición del que se puede esperar que abarque una fracción grande de la distribución de valores que pudiera atribuirse razonablemente al mensurando. Se denota por el símbolo  $U$ , la incertidumbre expandida  $U$  se obtiene al multiplicar la incertidumbre estándar combinada  $u_c(Y)$  por un factor de cobertura  $k$ .

Nota 1- La fracción puede considerarse como la probabilidad de cobertura o el nivel de confianza del intervalo.

#### 2.4.8. FACTOR DE COBERTURA.

Factor numérico usado como multiplicador de la incertidumbre estándar combinada con el propósito de obtener una incertidumbre expandida.

Nota 1- El factor de cobertura,  $k$ , tiene valores que se encuentran comúnmente, en el intervalo de 2 a 3.

#### 2.4.9. PROCEDIMIENTO GENERAL PARA LA ESTIMACIÓN DE INCERTIDUMBRE EN LA CALIBRACIÓN DE BLOQUES PATRÓN.

Los bloques patrones longitudinales se clasifican en grados de exactitud dependiendo de cuatro características fundamentales:

- La desviación al centro, desviación respecto al nominal.
- La desviación de paralelismo, desviación en cualquier punto.
- La adherencia.
- La planitud.

De estas cuatro características las más importantes y las que los laboratorios determinamos cotidianamente son las dos primeras: la desviación respecto al nominal y la desviación en cualquier punto.

La incertidumbre de medida debe ser estimada con tal rigor que sus valores permitan discriminar los diferentes grados de exactitud de cada bloque.

Una vez terminada la calibración del bloque patrón se procede a estimar la incertidumbre, para esto se diseñó una hoja de cálculo que permite la realizar la estimación de incertidumbre simultáneamente a la calibración. Estos cálculos están basados en la Guía Técnica sobre Trazabilidad e Incertidumbre en Metrología Dimensional y la NMX-CH-140-IMNC-2004 “Guía para la expresión de incertidumbre en las mediciones”, bajo la siguiente serie de pasos.

##### **Paso 1:**

**Entendimiento del proceso de medición.** Recopilación de toda la información relevante para establecer los contribuyentes que afectan el resultado de la medición. Contar con los datos necesarios para la estimación de la incertidumbre.

En esta etapa se visualiza qué necesitamos calibrar y cuáles serían las posibles contribuciones a la incertidumbre. En Metrología Dimensional nos queda claro que la dependencia entre la longitud, la temperatura y los coeficientes de expansión térmica de los materiales es directamente proporcional.

$$\Delta L = L \times \Delta \alpha \times \Delta T \quad (19)$$

En esta ecuación que se presenta de manera muy simple, pero que como veremos en el desarrollo, se va complicando en dependencia de cuán rigurosos se necesite ser en la estimación de las incertidumbres de medida.

## Paso 2.

Establecimiento del modelo del proceso de medición y las variables (contribuyentes) de influencia. Definir por medio de una lluvia de ideas las variables que están involucradas en el proceso de medición, ordenarlas basándose en su comportamiento ya que este puede ser de forma aleatoria o sistemática y establecer, en caso de que sea posible, la relación matemática que existe entre el valor obtenido de la medición del mensurando y las variables.

$$M = f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) \quad (20)$$

Donde:

$x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ .- Son los diferentes contribuyentes de incertidumbre que intervienen directamente en el proceso de medición.

O sea que, con esto queremos decir que, nuestra medición “ $M$ ” va a estar en función o dependiendo de diferentes variables (por ejemplo; diferencia de temperatura entre la sala y la temperatura de referencia, diferencia de temperatura entre el patrón de referencia y bloque patrón a calibrar influencia del patrón. etc.)

## 2.5. METODOLOGÍA PARA LA ESTIMACIÓN DE INCERTIDUMBRE HASTA EL TERCER ORDEN EN LA CALIBRACIÓN DE BLOQUES PATRÓN.

### 2.5.1. MODELO DE MEDICIÓN PROPUESTO POR EL LABORATORIO PARA LA CALIBRACIÓN DE BLOQUES PATRÓN LONGITUDINALES.

Dentro del sistema de calibración de bloques patrón se consideran como principales variables de influencia para la estimación de incertidumbre las siguientes:

Longitud del patrón a calibrar (IBC), Errores aleatorios, Coeficientes de dilatación térmica, Diferencia de temperaturas, Errores sistemáticos, Deformación debido a la fuerza de palpación.

Se tiene como función matemática:

$$l = f(l_s, \bar{\alpha}, \delta\theta, \delta\alpha, \theta, \varepsilon_{al}, \varepsilon_s, f_{def}) \quad (21)$$

El Modelo matemático queda:

$$l = l_s + \varepsilon_{al} - l_s (\bar{\alpha} \cdot \delta\theta + \delta\alpha \cdot \theta) + \varepsilon_s + f_{def} \quad (22)$$

Donde:

$l$ : Longitud del IBC.

$l_s$ : Longitud del bloque patrón de referencia.

$\varepsilon_{al}$ : Errores aleatorios del comparador de bloques.

$\bar{\alpha}$ : Coeficiente promedio de dilatación térmica del bloque patrón y del IBC.

$\delta\theta$ : Diferencia de temperaturas entre el bloque patrón y el IBC.

$\delta\alpha$ : Diferencia entre los coeficientes de expansión térmica del bloque patrón y el IBC.

$\theta$ : Desviación de la temperatura del bloque patrón respecto a la de referencia 20°C.

$\varepsilon_s$ : Errores sistemáticos del comparador.

$f_{def}$ : Deformación del material de los bloques bajo la fuerza de los palpadores (superior e inferior).

Siguiendo la metodología que dicta la norma NXM-CH-140 se tiene que:

La incertidumbre de medida combinada ( $u_c$ )

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^N \left[ \frac{\partial f}{\partial x_i} \right]^2 u^2(x_i) \quad (23)$$

Al analizar la no linealidad de nuestra función necesitamos incluir términos de orden más elevado en el desarrollo en serie de Taylor para la expresión de  $u_c^2(y)$ . Los términos más importantes de orden inmediatamente superior a añadir son los siguientes:

$$\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \left[ \frac{1}{2} \left[ \frac{\partial^2 f}{\partial x_i \partial x_j} \right]^2 + \frac{\partial f}{\partial x_i} \frac{\partial^3 f}{\partial x_i \partial x_j^2} \right] u^2(x_i) u^2(x_j) \quad (24)$$

Considerando esto la ecuación (5) queda como se muestra a continuación:

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^N \left[ \frac{\partial f}{\partial x_i} \right]^2 u^2(x_i) + \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \left[ \frac{1}{2} \left[ \frac{\partial^2 f}{\partial x_i \partial x_j} \right]^2 + \frac{\partial f}{\partial x_i} \frac{\partial^3 f}{\partial x_i \partial x_j^2} \right] u^2(x_i) u^2(x_j) \quad (25)$$

Denotamos:

Los términos de primer orden como:

$$C_i = \frac{\partial f}{\partial x_i};$$

Los términos de segundo orden como:

$$D_{ij} = \frac{\partial^2 f}{\partial x_i \partial x_j}; y$$

Los términos de tercer orden como:

$$T_{ijj} = \frac{\partial^3 f}{\partial x_i \partial^2 x_j}$$

Sustituyendo estos términos en la ecuación (25), tenemos:

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^N C_i u^2(x_i) + \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \left[ \frac{1}{2} D_{ij}^2 + C_i T_{ijj} \right] u^2(x_i) u^2(x_j) \quad (26)$$

Se estimaron las varianzas para cada una de las variables de influencia y a la par se fueron calculando los coeficientes de sensibilidad.

## 2.5.2. EVALUACIÓN DE LOS COEFICIENTES DE SENSIBILIDAD O DERIVADAS PARCIALES.

Considerando la ecuación 22, comenzamos a analizar las derivadas parciales del modelo respecto a cada una de las variables, al primer orden.

Tenemos que:

$$l = l_s + \varepsilon_{al} - l_s (\bar{\alpha} \cdot \delta \theta + \delta \alpha \cdot \theta) + \varepsilon_s + f_{def} \quad (22)$$

o lo que es lo mismo

$$l = l_s (1 - (\bar{\alpha} \cdot \delta \theta + \delta \alpha \cdot \theta)) + \varepsilon_{al} + \varepsilon_s + f_{def} \quad (27)$$

Mejor acomodada para nuestro propósito.

Por comodidad se deriva a partir del modelo 22, debido a que ambos son iguales.

Entonces como:

$$C_i = \frac{\partial f}{\partial x_i}$$

$$C_1 = \frac{\partial f}{\partial x_i \partial x_j} = \frac{\partial f}{\partial l_s} = 1 - [\bar{\alpha} \cdot \delta\theta + \delta\alpha \cdot \theta] \quad C_2 = \frac{\partial f}{\partial x_2} = \frac{\partial f}{\partial \varepsilon_{al}} = 1 \quad C_3 = \frac{\partial f}{\partial x_3} = \frac{\partial f}{\partial \alpha} = -l_s \delta\theta$$

$$C_4 = \frac{\partial f}{\partial x_4} = \frac{\partial f}{\partial \delta\theta} = -l_s \bar{\alpha} \quad C_5 = \frac{\partial f}{\partial x_5} = \frac{\partial f}{\partial \delta\alpha} = -l_s \theta \quad C_6 = \frac{\partial f}{\partial x_6} = \frac{\partial f}{\partial \theta} = -l_s \delta\alpha$$

$$C_7 = \frac{\partial f}{\partial x_7} = \frac{\partial f}{\partial \varepsilon_s} = 1 \quad C_8 = \frac{\partial f}{\partial x_8} = \frac{\partial f}{\partial f_{def}} = 1$$

Se demuestra que las variables que tienen influencia con la temperatura son significativas, se procede a derivar al segundo orden.

### 2.5.3. DETERMINACIÓN DE LAS DERIVADAS DE SEGUNDO ORDEN.

Determinemos las derivadas de segundo orden:

$$D_{ij} = \frac{\partial f}{\partial x_i \partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{\partial f}{\partial x_i} \right) = \frac{\partial}{\partial x_j} C_i \therefore D_{ij} = \frac{\partial}{\partial x_j} C_i$$

$$D_{ij} = \frac{\partial^2 f}{\partial x_i \partial x_j} = \frac{\partial f}{\partial x_i} \left( \frac{\partial}{\partial x_j} \right)$$

pero:  $C_i = \frac{\partial f}{\partial x_i}$ ; entonces

$$D_{ij} = \frac{\partial}{\partial x_j} C_i$$

Si tenemos que:

$i = 1$  y  $j = 1; 2; 3; 4; 5; 6; 7; 8$ ; entonces:

$$D_{1j} = \frac{\partial}{\partial x_j} C_1 \quad \text{y} \quad C_1 = 1 - [\bar{\alpha} \cdot \delta\theta + \delta\alpha \cdot \theta]$$

$$D_{11} = \frac{\partial}{\partial l_s} C_1 = 0$$

$$D_{12} = \frac{\partial}{\partial \varepsilon_{al}} C_1 = 0$$

$$D_{13} = \frac{\partial}{\partial \alpha} C_1 = -\delta\theta$$

$$D_{14} = \frac{\partial}{\partial \delta\theta} C_1 = -\bar{\alpha}$$

$$D_{15} = \frac{\partial}{\partial \delta\alpha} C_1 = -\theta$$

$$D_{16} = \frac{\partial}{\partial \theta} C_1 = -\delta\alpha$$

$$D_{17} = \frac{\partial}{\partial \varepsilon_s} C_1 = 0$$

$$D_{18} = \frac{\partial}{\partial f_{def}} C_1 = 0$$

Si tenemos ahora que:

**i = 2 y j = 1; 2; 3; 4; 5; 6; 7, 8;      C<sub>2</sub> = 1 entonces:**

$$D_{21} = \frac{\partial}{\partial l_s} C_2 = 0$$

$$D_{22} = \frac{\partial}{\partial \varepsilon_{al}} C_2 = 0$$

$$D_{23} = \frac{\partial}{\partial \alpha} C_2 = 0$$

$$D_{24} = \frac{\partial}{\partial \delta\theta} C_2 = 0$$

$$D_{25} = \frac{\partial}{\partial \delta\alpha} C_2 = 0$$

$$D_{26} = \frac{\partial}{\partial \theta} C_2 = 0$$

$$D_{27} = \frac{\partial}{\partial \varepsilon_s} C_2 = 0$$

$$D_{28} = \frac{\partial}{\partial f_{def}} C_2 = 0$$

Es decir,

$$D_{2j} = 0$$

Si:

**i = 3 y j = 1; 2; 3; 4; 5; 6; 7, 8; entonces:**

$$D_{3j} = \frac{\partial}{\partial x_j} C_3 \quad \text{y} \quad C_3 = -l_s \delta\theta ; \text{ entonces:}$$

$$D_{31} = \frac{\partial}{\partial l_s} C_3 = -\delta\theta$$

$$D_{32} = \frac{\partial}{\partial \varepsilon_{al}} C_3 = 0$$

$$D_{33} = \frac{\partial}{\partial \alpha} C_3 = 0$$

$$D_{34} = \frac{\partial}{\partial \delta\theta} C_3 = -l_s$$

$$D_{35} = \frac{\partial}{\partial \delta\alpha} C_3 = 0$$

$$D_{36} = \frac{\partial}{\partial \theta} C_3 = 0$$

$$D_{37} = \frac{\partial}{\partial \varepsilon_s} C_3 \neq 0$$

$$D_{38} = \frac{\partial}{\partial f_{def}} C_3 \neq 0$$

Con:

$i = 4$  y  $j = 1; 2; 3; 4; 5; 6; 7, 8$ ; entonces:

$$D_{4j} = \frac{\partial}{\partial x_j} C_4; \quad \text{pero como } C_4 = -l_s \bar{\alpha}$$

quedan:

$$D_{41} = \frac{\partial}{\partial l_s} C_4 = -\bar{\alpha}$$

$$D_{42} = \frac{\partial}{\partial \varepsilon_{al}} C_4 = 0$$

$$D_{43} = \frac{\partial}{\partial \alpha} C_4 = -l_s$$

$$D_{44} = \frac{\partial}{\partial \delta\theta} C_4 = 0$$

$$D_{45} = \frac{\partial}{\partial \delta\alpha} C_4 = 0$$

$$D_{46} = \frac{\partial}{\partial \theta} C_4 = 0$$

$$D_{47} = \frac{\partial}{\partial \varepsilon_s} C_4 = 0$$

$$D_{48} = \frac{\partial}{\partial f_{def}} C_4 = 0$$

Si:

$i = 5$  y  $j = 1; 2; 3; 4; 5; 6; 7, 8$ ; entonces:

$$D_{5j} = \frac{\partial}{\partial x_j} C_5 \quad \text{siendo: } C_5 = -l_s \theta; \text{ entonces:}$$

$$D_{51} = \frac{\partial}{\partial l_s} C_5 = -\theta$$

$$D_{52} = \frac{\partial}{\partial \varepsilon_{al}} C_5 = 0$$

$$D_{53} = \frac{\partial}{\partial \alpha} C_5 = 0$$

$$D_{54} = \frac{\partial}{\partial \delta\theta} C_5 = 0$$

$$D_{55} = \frac{\partial}{\partial \delta\alpha} C_5 = 0$$

$$D_{56} = \frac{\partial}{\partial \theta} C_5 = -l_s$$

$$D_{57} = \frac{\partial}{\partial \varepsilon_s} C_5 = 0$$

$$D_{58} = \frac{\partial}{\partial f_{def}} C_5 = 0$$

Veamos ahora para:

$i = 6$  y  $j = 1; 2; 3; 4; 5; 6; 7, 8$ ; entonces:

$$D_{6j} = \frac{\partial}{\partial x_j} C_6 \quad \text{siendo:} \quad C_6 = -l_s \delta\alpha; \quad \text{entonces:}$$

$$D_{61} = \frac{\partial}{\partial l_s} C_6 = -\delta\alpha$$

$$D_{62} = \frac{\partial}{\partial \varepsilon_{al}} C_6 = 0$$

$$D_{63} = \frac{\partial}{\partial \alpha} C_6 = 0$$

$$D_{64} = \frac{\partial}{\partial \delta\theta} C_6 = 0$$

$$D_{65} = \frac{\partial}{\partial \delta\alpha} C_6 = -l_s$$

$$D_{66} = \frac{\partial}{\partial \theta} C_6 = 0$$

$$D_{67} = \frac{\partial}{\partial \varepsilon_s} C_6 = 0$$

$$D_{68} = \frac{\partial}{\partial f_{def}} C_6 = 0$$

Si tenemos:

**i = 7 y j = 1; 2; 3; 4; 5; 6; 7, 8;** entonces:

$$D_{7j} = \frac{\partial}{\partial x_j} C_7 \quad \text{siendo:} \quad C_7 = 1; \quad \text{entonces}$$

$$D_{7j} = 0$$

Para:

**i = 8 y j = 1; 2; 3; 4; 5; 6; 7, 8;** entonces:

$$D_{8j} = \frac{\partial}{\partial x_j} C_8 \quad \text{siendo:} \quad C_8 = 1; \quad \text{entonces}$$

$$D_{8j} = 0$$

Nótese que algunas variables son iguales a 1, por lo que son estables desde la primera derivada, no aportan para el segundo orden.

Se comprueba que las variables que tienen influencia con la temperatura siguen siendo significativas, en el segundo orden, se procede a derivar al tercer orden.

#### 2.5.4. COMPROBACIÓN DE LOS TÉRMINOS DE TERCER ORDEN O TERCERAS DERIVADAS.

$$T_{ij} = \frac{\partial f}{\partial x_i} \frac{\partial^3 f}{\partial x_i \partial x_i \partial^2 x_j} = \frac{\partial f}{\partial x_i} \frac{\partial f}{\partial x_i} \left[ \frac{\partial^2 f}{\partial^2 x_i} \right] = \frac{\partial f}{\partial x_i} \frac{\partial f}{\partial x_i} \frac{\partial f}{\partial x_j} \frac{\partial f}{\partial x_j}$$

Pero como:

$$C_i = \frac{\partial f}{\partial x_i} \quad \text{y}$$

$$D_{ij} = \frac{\partial^2 f}{\partial x_i \partial x_j}; \quad \text{entonces}$$

$$T_{ij} = C_i \frac{\partial D_{ij}}{\partial x_j}$$

Para:

$$i = 1; \quad j = 1; \quad x_1 = l_s$$

$$T_{111} = \frac{\partial}{\partial x_1} D_{11} = \frac{\partial}{\partial l_s} [0] = 0$$

$$T_{115} = \frac{\partial}{\partial x_1} D_{15} = \frac{\partial}{\partial l_s} [-\theta] = 0$$

$$T_{112} = \frac{\partial}{\partial x_1} D_{12} = \frac{\partial}{\partial l_s} [0] = 0$$

$$T_{116} = \frac{\partial}{\partial x_1} D_{16} = \frac{\partial}{\partial l_s} [-\delta\alpha] = 0$$

$$T_{113} = \frac{\partial}{\partial x_1} D_{13} = \frac{\partial}{\partial l_s} [-\delta\theta] = 0$$

$$T_{117} = \frac{\partial}{\partial x_1} D_{17} = \frac{\partial}{\partial l_s} [0] = 0$$

$$T_{114} = \frac{\partial}{\partial x_1} D_{14} = \frac{\partial}{\partial l_s} [-\bar{\alpha}] = 0$$

$$T_{118} = \frac{\partial}{\partial x_1} D_{18} = \frac{\partial}{\partial l_s} [0] = 0$$

Se demuestra que todos los términos de tercer orden para  $j = 1$ , se hacen “0” y se excluyen del análisis de incertidumbre.

Se analiza para  $j = 2$  con  $x = 2$

$$T_{211} = \frac{\partial}{\partial x_2} D_{11} = \frac{\partial}{\partial \varepsilon_{al}} [0] = 0$$

$$T_{215} = \frac{\partial}{\partial x_2} D_{15} = \frac{\partial}{\partial \varepsilon_{al}} [-\theta] = 0$$

$$T_{212} = \frac{\partial}{\partial x_2} D_{12} = \frac{\partial}{\partial \varepsilon_{al}} [0] = 0$$

$$T_{216} = \frac{\partial}{\partial x_2} D_{16} = \frac{\partial}{\partial \varepsilon_{al}} [-\delta\alpha] = 0$$

$$T_{213} = \frac{\partial}{\partial x_2} D_{13} = \frac{\partial}{\partial \varepsilon_{al}} [-\delta\theta] = 0$$

$$T_{217} = \frac{\partial}{\partial x_2} D_{17} = \frac{\partial}{\partial \varepsilon_{al}} [0] = 0$$

$$T_{214} = \frac{\partial}{\partial x_2} D_{14} = \frac{\partial}{\partial \varepsilon_{al}} [-\bar{\alpha}] = 0$$

$$T_{218} = \frac{\partial}{\partial x_2} D_{18} = \frac{\partial}{\partial \varepsilon_{al}} [0] = 0$$

Se demuestra que todos los términos de tercer orden para  $j=2$ , se hacen "0" y se excluyen del análisis de incertidumbre.

Se analiza para  $j = 3$ ,  $x = 3$

$$T_{311} = \frac{\partial}{\partial x_3} D_{11} = \frac{\partial}{\partial \alpha} [0] = 0$$

$$T_{315} = \frac{\partial}{\partial x_3} D_{15} = \frac{\partial}{\partial \alpha} [-\theta] = 0$$

$$T_{312} = \frac{\partial}{\partial x_3} D_{12} = \frac{\partial}{\partial \alpha} [0] = 0$$

$$T_{316} = \frac{\partial}{\partial x_3} D_{16} = \frac{\partial}{\partial \alpha} [-\delta\alpha] = 0$$

$$T_{313} = \frac{\partial}{\partial x_3} D_{13} = \frac{\partial}{\partial \alpha} [-\delta\theta] = 0$$

$$T_{317} = \frac{\partial}{\partial x_3} D_{17} = \frac{\partial}{\partial \alpha} [0] = 0$$

$$T_{314} = \frac{\partial}{\partial x_3} D_{14} = \frac{\partial}{\partial \alpha} [-\bar{\alpha}] = -1$$

$$T_{318} = \frac{\partial}{\partial x_3} D_{18} = \frac{\partial}{\partial \alpha} [0] = 0$$

Se demuestra que todos los términos de tercer orden para  $j=3$ , se hacen "0" excepto un término en el cual la variable y la función son iguales (derivada igual a 1), se excluyen del análisis de incertidumbre.

Se analiza para  $j = 4, x = 4$

$$T_{411} = \frac{\partial}{\partial x_4} D_{11} = \frac{\partial}{\partial \delta\theta} [0] = 0$$

$$T_{415} = \frac{\partial}{\partial x_4} D_{15} = \frac{\partial}{\partial \delta\theta} [-\theta] = 0$$

$$T_{412} = \frac{\partial}{\partial x_4} D_{12} = \frac{\partial}{\partial \delta\theta} [0] = 0$$

$$T_{416} = \frac{\partial}{\partial x_4} D_{16} = \frac{\partial}{\partial \delta\theta} [-\delta\alpha] = 0$$

$$T_{413} = \frac{\partial}{\partial x_4} D_{13} = \frac{\partial}{\partial \delta\theta} [-\delta\theta] = -1$$

$$T_{417} = \frac{\partial}{\partial x_4} D_{17} = \frac{\partial}{\partial \delta\theta} [0] = 0$$

$$T_{414} = \frac{\partial}{\partial x_4} D_{14} = \frac{\partial}{\partial \delta\theta} [-\bar{\alpha}] = 0$$

$$T_{418} = \frac{\partial}{\partial x_4} D_{18} = \frac{\partial}{\partial \delta\theta} [0] = 0$$

Se demuestra que todos los términos de tercer orden para  $j=4$ , se hacen “0” excepto un término en el cual la variable y la función son iguales (derivada igual a 1), se excluyen del análisis de incertidumbre.

Se analiza para  $j = 5, x = 5$

$$T_{511} = \frac{\partial}{\partial x_5} D_{11} = \frac{\partial}{\partial \delta\alpha} [0] = 0$$

$$T_{515} = \frac{\partial}{\partial x_5} D_{15} = \frac{\partial}{\partial \delta\alpha} [-\theta] = 0$$

$$T_{512} = \frac{\partial}{\partial x_5} D_{12} = \frac{\partial}{\partial \delta\alpha} [0] = 0$$

$$T_{516} = \frac{\partial}{\partial x_5} D_{16} = \frac{\partial}{\partial \delta\alpha} [-\delta\alpha] = -1$$

$$T_{513} = \frac{\partial}{\partial x_5} D_{13} = \frac{\partial}{\partial \delta\alpha} [-\delta\theta] = 0$$

$$T_{517} = \frac{\partial}{\partial x_5} D_{17} = \frac{\partial}{\partial \delta\alpha} [0] = 0$$

$$T_{514} = \frac{\partial}{\partial x_5} D_{14} = \frac{\partial}{\partial \delta\alpha} [-\bar{\alpha}] = 0$$

$$T_{518} = \frac{\partial}{\partial x_5} D_{18} = \frac{\partial}{\partial \delta\alpha} [0] = 0$$

Se demuestra que todos los términos de tercer orden para  $j=5$ , se hacen “0” excepto un término en el cual la variable y la función son iguales (derivada igual a 1), se excluyen del análisis de incertidumbre.

Se analiza para  $j = 6, x = 6$

$$T_{611} = \frac{\partial}{\partial x_6} D_{11} = \frac{\partial}{\partial \theta} [0] = 0$$

$$T_{615} = \frac{\partial}{\partial x_6} D_{15} = \frac{\partial}{\partial \theta} [-\theta] = -1$$

$$T_{612} = \frac{\partial}{\partial x_6} D_{12} = \frac{\partial}{\partial \theta} [0] = 0$$

$$T_{616} = \frac{\partial}{\partial x_6} D_{16} = \frac{\partial}{\partial \theta} [-\delta\alpha] = 0$$

$$T_{613} = \frac{\partial}{\partial x_6} D_{13} = \frac{\partial}{\partial \theta} [-\delta\theta] = 0$$

$$T_{617} = \frac{\partial}{\partial x_6} D_{17} = \frac{\partial}{\partial \theta} [0] = 0$$

$$T_{614} = \frac{\partial}{\partial x_6} D_{14} = \frac{\partial}{\partial \theta} [-\bar{\alpha}] = 0$$

$$T_{618} = \frac{\partial}{\partial x_6} D_{18} = \frac{\partial}{\partial \theta} [0] = 0$$

Se demuestra que todos los términos de tercer orden para  $j=6$ , se hacen "0" excepto un término en el cual la variable y la función son iguales (derivada igual a 1), se excluyen del análisis de incertidumbre.

Se analiza para  $j = 7, x = 7$

$$T_{711} = \frac{\partial}{\partial x_7} D_{11} = \frac{\partial}{\partial \varepsilon_s} [0] = 0$$

$$T_{715} = \frac{\partial}{\partial x_7} D_{15} = \frac{\partial}{\partial \varepsilon_s} [-\theta] = 0$$

$$T_{712} = \frac{\partial}{\partial x_7} D_{12} = \frac{\partial}{\partial \varepsilon_s} [0] = 0$$

$$T_{716} = \frac{\partial}{\partial x_7} D_{16} = \frac{\partial}{\partial \varepsilon_s} [-\delta\alpha] = 0$$

$$T_{713} = \frac{\partial}{\partial x_7} D_{13} = \frac{\partial}{\partial \varepsilon_s} [-\delta\theta] = 0$$

$$T_{717} = \frac{\partial}{\partial x_7} D_{17} = \frac{\partial}{\partial \varepsilon_s} [0] = 0$$

$$T_{714} = \frac{\partial}{\partial x_7} D_{14} = \frac{\partial}{\partial \varepsilon_s} [-\bar{\alpha}] = 0$$

$$T_{718} = \frac{\partial}{\partial x_7} D_{18} = \frac{\partial}{\partial \varepsilon_s} [0] = 0$$

Se demuestra que todos los términos de tercer orden para  $j=7$ , se hacen "0", se excluyen del análisis de incertidumbre.

Se analiza para  $j = 8, x = 8$

$$T_{811} = \frac{\partial}{\partial x_8} D_{11} = \frac{\partial}{\partial f_{def}} [0] = 0$$

$$T_{815} = \frac{\partial}{\partial x_8} D_{15} = \frac{\partial}{\partial f_{def}} [-\theta] = 0$$

$$T_{812} = \frac{\partial}{\partial x_8} D_{12} = \frac{\partial}{\partial f_{def}} [0] = 0$$

$$T_{816} = \frac{\partial}{\partial x_8} D_{16} = \frac{\partial}{\partial f_{def}} [-\delta\alpha] = 0$$

$$T_{813} = \frac{\partial}{\partial x_8} D_{13} = \frac{\partial}{\partial f_{def}} [-\delta\theta] = 0$$

$$T_{817} = \frac{\partial}{\partial x_8} D_{17} = \frac{\partial}{\partial f_{def}} [0] = 0$$

$$T_{814} = \frac{\partial}{\partial x_8} D_{14} = \frac{\partial}{\partial f_{def}} [-\bar{\alpha}] = 0$$

$$T_{818} = \frac{\partial}{\partial x_8} D_{18} = \frac{\partial}{\partial f_{def}} [0] = 0$$

Se demuestra que todos los términos de tercer orden para  $j=8$ , se hacen "0", se excluyen del análisis de incertidumbre.

Conclusión: Se demuestra que las variables que tienen influencia con la temperatura no son significativas en el tercer orden, quedando así nuestro análisis de estimación de incertidumbres hasta el segundo orden.

Considerando los términos  $C_i$  y  $D_{ij}$  diferentes de cero, se tiene:

Los  $C_i$ :

$$C_1 = 1 - [\bar{\alpha} \cdot \delta\theta + \delta\alpha \theta.]$$

$$C_5 = -l_s \theta$$

$$C_2 = 1$$

$$C_6 = -l_s \delta\alpha$$

$$C_3 = -l_s \delta\theta$$

$$C_7 = 1$$

$$C_4 = -l_s \bar{\alpha}$$

$$C_8 = 1$$

Los  $D_{ij}$

$$D_{13} = -\delta\theta \qquad D_{14} = -\bar{\alpha} \qquad D_{15} = -\theta$$

$$D_{31} = -\delta\theta \qquad D_{41} = -\bar{\alpha} \qquad D_{51} = -\theta$$

$$D_{16} = -\delta\alpha \qquad D_{34} = -l_s \qquad D_{56} = -l_s$$

$$D_{61} = -\delta\alpha \qquad D_{43} = -l_s \qquad D_{65} = -l_s$$

Retomando la ecuación (26)

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^N C_i u^2(x_i) + \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \left[ \frac{1}{2} D_{ij}^2 + C_i T_{ijj} \right] u^2(x_i) u^2(x_j) \qquad (26)$$

Hagamos en ella la sustitución de cada uno de los términos que identifican las primeras y segundas derivadas.

Sustituyendo se tiene:

$$\begin{aligned} u_c^2(y) = & C_1^2 u^2(l_s) + C_2^2 u^2(\varepsilon_{al}) + C_3^2 u^2(\bar{\alpha}) + C_4^2 u^2(\delta\theta) + C_5^2 u^2(\delta\alpha) + C_6^2 u^2(\theta) + C_7^2 u^2(\varepsilon_s) + C_8^2 u^2(f_{def}) + \\ & \left[ \frac{1}{2} [D_{13}^2 u^2(l_s) u^2(\bar{\alpha})] + \frac{1}{2} [D_{14}^2 u^2(l_s) u^2(\delta\theta)] + \frac{1}{2} [D_{15}^2 u^2(l_s) u^2(\delta\alpha)] + \frac{1}{2} [D_{16}^2 u^2(l_s) u^2(\theta)] + \right. \\ & \left. \frac{1}{2} [D_{31}^2 u^2(\bar{\alpha}) u^2(l_s)] + \frac{1}{2} [D_{41}^2 u^2(l_s) u^2(\delta\theta)] + \frac{1}{2} [D_{51}^2 u^2(\delta\alpha) u^2(l_s)] + \frac{1}{2} [D_{61}^2 u^2(\theta) u^2(l_s)] + \right. \\ & \left. \frac{1}{2} [D_{34}^2 u^2(\bar{\alpha}) u^2(\delta\theta)] + \frac{1}{2} [D_{43}^2 u^2(\bar{\alpha}) u^2(\delta\theta)] + \frac{1}{2} [D_{56}^2 u^2(\delta\alpha) u^2(\theta)] + \frac{1}{2} [D_{65}^2 u^2(\delta\alpha) u^2(\theta)] \right] = \end{aligned} \qquad (28)$$

Sustituyendo los  $C_i$  y lo  $D_{ij}$  por sus respectivos valores queda:

$$u_c^2(y) = C_1^2 u^2(l_s) + C_2^2 u^2(\varepsilon_{al}) + C_3^2 u^2(\bar{\alpha}) + C_4^2 u^2(\delta\theta) + C_5^2 u^2(\delta\alpha) + C_6^2 u^2(\theta) + C_7^2 u^2(\varepsilon_s) + C_8^2 u^2(f_{def}) +$$

$$\left[ \frac{1}{2} [-\delta\theta^2 u^2(l_s) u^2(\bar{\alpha})] + \frac{1}{2} [-\bar{\alpha}^2 u^2(l_s) u^2(\delta\theta)] + \frac{1}{2} [-\theta^2 u^2(l_s) u^2(\delta\alpha)] + \frac{1}{2} [-\delta\alpha^2 u^2(l_s) u^2(\theta)] + \right.$$

$$\left. \frac{1}{2} [-\delta\theta^2 u^2(\bar{\alpha}) u^2(l_s)] + \frac{1}{2} [-\bar{\alpha}^2 u^2(l_s) u^2(\delta\theta)] + \frac{1}{2} [-\theta^2 u^2(\delta\alpha) u^2(l_s)] + \frac{1}{2} [-\delta\alpha^2 u^2(\theta) u^2(l)] + \right.$$

$$\left. \frac{1}{2} [-l_s^2 u^2(\bar{\alpha}) u^2(\delta\theta)] + \frac{1}{2} [-l_s^2 u^2(\bar{\alpha}) u^2(\delta\theta)] + \frac{1}{2} [-l_s^2 u^2(\delta\alpha) u^2(\theta)] + \frac{1}{2} [-l_s^2 u^2(\delta\alpha) u^2(\theta)] \right] =$$

(29)

### 2.5.5. ESTIMACIÓN DE LAS INCERTIDUMBRES ESTÁNDAR.

Para la estimación de cada una de las incertidumbres estándar o parciales necesitamos apoyarnos del modelo matemático de medición definido:

$$l = l_s (1 - (\bar{\alpha} \cdot \delta\theta + \delta\alpha \cdot \theta)) + \varepsilon_{al} + \varepsilon_s + f_{def} \quad (22)$$

Y comenzamos a analizar cada una de sus variables para determinar cada una de las incertidumbres estándar.

**a. Incertidumbre debida al bloque patrón de referencia:**

$$u(l_s) = \frac{U(l_s)}{k} \quad (30)$$

**b. Incertidumbre debida a los errores aleatorios del comparador de bloques:**

$$u(\varepsilon_{al}) = \sqrt{\left( \left( \frac{\text{Re petibilidad } d}{2} \right)^2 + \left( \frac{\text{Re posicionamiento}}{2} \right)^2 + \left( \frac{\text{Linealidad}}{2} \right)^2 \right)} \quad (31)$$

**c. Incertidumbre debida al coeficiente promedio de dilatación térmica del bloque patrón de referencia y del IBC.**

$$u(\bar{\alpha}) = \frac{\alpha_p + \alpha_c}{2\sqrt{3}} \quad (32)$$

- d. Incertidumbre debida a la diferencia de temperaturas entre el bloque patrón de referencia y el IBC.

$$u(\delta\theta) = \frac{\delta\theta}{\sqrt{2}} \quad (33)$$

- e. Incertidumbre debida a la diferencia entre los coeficientes de expansión térmica del bloque patrón de referencia y el IBC.

$$u(\delta\alpha) = \frac{\delta\alpha}{\sqrt{3}} = \frac{(\alpha_c + 10\% \alpha_c) - (\alpha_p - 10\% \alpha_p)}{\sqrt{3}} \quad (34)$$

- f. Incertidumbre debida a la desviación de la temperatura del bloque patrón (IBC) respecto a la de referencia 20°C.

$$u(\theta) = \frac{\theta}{\sqrt{3}} \quad (35)$$

- g. Incertidumbre debida a los errores sistemáticos del comparador.

$$u(\varepsilon_s) = \frac{\text{Asimetria}}{\sqrt{3}} \quad (36)$$

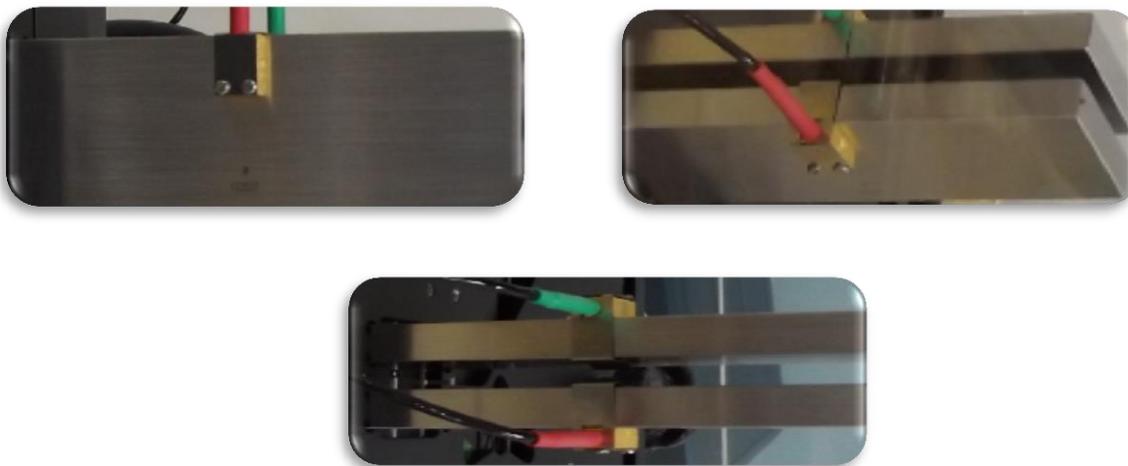
- h. Incertidumbre debida a la deformación del material de los bloques bajo la fuerza de los palpadores (superior e inferior).

$$u(f_{def}) = 0,8255 \left[ \sqrt[3]{\left( \frac{F_a^2}{R} \right) \left( \frac{1 - \mu_0^2}{E_0} + \frac{1 - \mu_c^2}{E_c} \right)^2} \right] \quad (37)$$

## CAPÍTULO 3: EXPERIMENTACIÓN.

### 3.1 EVALUACIÓN PRÁCTICA DE LA INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA.

Para este propósito nos dedicamos a evaluar de manera práctica la influencia de la temperatura durante el proceso de calibración de bloques patrón.



***Figura 11: Colocación de sensores para la medición de temperaturas en el cuerpo de los bloques.***

El laboratorio cuenta con un sistema de monitoreo de condiciones ambientales funcionando los 365 días del año y escaneando cada minuto. Pero para la calibración de bloques patrón las condiciones ambientales deben ser evaluadas de manera puntual, es decir se debe censar la temperatura directamente a los bloques patrón. Para ello se cuenta con un termómetro digital con termistores con cuatro canales de medición que escanean aproximadamente cada 15 segundos la temperatura ambiente dentro de la cabina de calibración, la temperatura del bloque a calibrar (IBC) y la temperatura del bloque patrón. Este termómetro tiene una resolución de lectura de  $0,001^{\circ}\text{C}$ , una incertidumbre de  $\pm 0,02^{\circ}\text{C}$  con un factor de cobertura  $k = 2$  y un intervalo de confianza del 95,45%, el termómetro cuenta con dos sensores con dispositivos para medición puntual.



**Fig. 12. Termómetro digital de 4 canales para el censado de la temperatura de los bloques.**

El estudio de la medición de la temperatura exterior, es decir la temperatura del bloque patrón, se realizó sobre la superficie de 15 bloques de acero y 15 bloques de cerámica con longitudes nominales entre 0,5 mm y 100 mm de grado “0” y “1” y “2”. Considerando los siguientes intervalos de medida.

1. > de 0,5 mm hasta 10,0 mm
2. > de 10,0 mm hasta 25 mm
3. > de 25 mm hasta 50 mm
4. > de 50 mm hasta 75 mm
5. > de 75 mm hasta 100 mm

La toma de la temperatura superficial de cada bloque se realizó cada 30 min para todos los intervalos y todos los materiales. Los sensores de temperatura de contacto se fijaron en cada bloque con se muestra a continuación.



**Fig. 13. Medición de temperatura puntual.**

Esta toma de lecturas de la temperatura se realizó durante 20 días.

Los bloques se mantuvieron dentro de la cabina de calibración para simular lo más parecido a la realidad el escenario diario cotidiano de las calibraciones.

Por último, se hace un análisis de los datos recopilados y se llegan a conclusiones particularizadas al respecto de las variaciones de temperatura por intervalos.

### **3.2 PATRONES DEL LABORATORIO.**

Como ya se comentó para la calibración de bloques patrón se requiere de un comparador electromecánico de alta resolución y un juego de bloques patrón grado K.

El laboratorio de alta exactitud de Metrología de CIDESI cuenta con varios juegos de bloques patrón de material acero con cantidades de piezas variables. Se cuentan con bloques de 112, 81, 56, 10 piezas, etc. que comprenden valores nominales de 0,5 mm hasta 100 mm con pasos de 0,001 mm, con un coeficiente de

expansión térmica de  $11,5 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ . El grado de exactitud de los bloques patrón es grado K según la norma NMX-CH-3650 (ver anexo A).

La calibración de estos patrones la realiza el Centro Nacional de Metrología (CENAM) por el método de interferometría láser, reportando las siguientes incertidumbres.

Intervalo de longitudes; mm	Incertidumbre; nm
>0 hasta 10	$\pm 20$
>10 hasta 20	$\pm 22$
>20 hasta 30	$\pm 24$
>30 hasta 40	$\pm 27$
>40 hasta 50	$\pm 30$
>50 hasta 60	$\pm 34$
>60 hasta 70	$\pm 37$
>70 hasta 80	$\pm 41$
>90 hasta 100	$\pm 49$

**Tabla 1. Incertidumbres reportadas por CENAM por el método de interferometría láser.**

La interferometría láser aplicada a las mediciones dimensionales es la técnica que se usa para la definición de la Unidad de Longitud, el Metro.

La unidad de longitud se define como la distancia recorrida por una onda electromagnética plana en el vacío en un intervalo de tiempo de  $1/c$  segundos, donde  $c$  es la velocidad de la luz en el vacío y corresponde a 299 792 458 m/s.

Existen varias formas para realizar esta definición conforme a lo establecido por la Mise en Pratique pour la Définition du Mètre, la cual fue adoptada por la Conferencia General de Pesas y Medidas (CGPM) en 1983. La realización más frecuente utiliza láseres estabilizados en frecuencia por la técnica de espectroscopia saturada. Para determinar el valor de  $\lambda$  se utiliza el valor de la velocidad de la luz en el vacío  $c$ , que es una constante física absoluta y únicamente se requiere determinar la

frecuencia ( $\nu$ ) de la radiación ya que las tres variables se relacionan a través de la ecuación ( $i = \frac{c}{\nu}$ ).

De acuerdo a la relación previa, se necesita de una radiación de frecuencia estable para poder determinar  $i$  con exactitud. La *Mise en Pratique*, en sus recomendaciones de 2001 enuncia varias fuentes de radiación láser de diversos tipos y longitudes de onda para la realización de la definición de la unidad de longitud. Debido a que las realizaciones definen a la unidad, se les conoce como patrones primarios.

De todas ellas, la más utilizada es la del láser de Helio-Neón estabilizado a una frecuencia de aproximadamente 473 THz por medio de espectroscopia saturada de la transición  $11^{-5}$  de la molécula de  $^{127}\text{I}_2$ . La longitud de onda en el vacío ( $i$ ) de esta frecuencia es la referencia y su valor es de 632,991 212 58 nm ( $\cong$  633 nm) refiriéndose al componente " $f$ " de la transición  $11^{-5}$ .

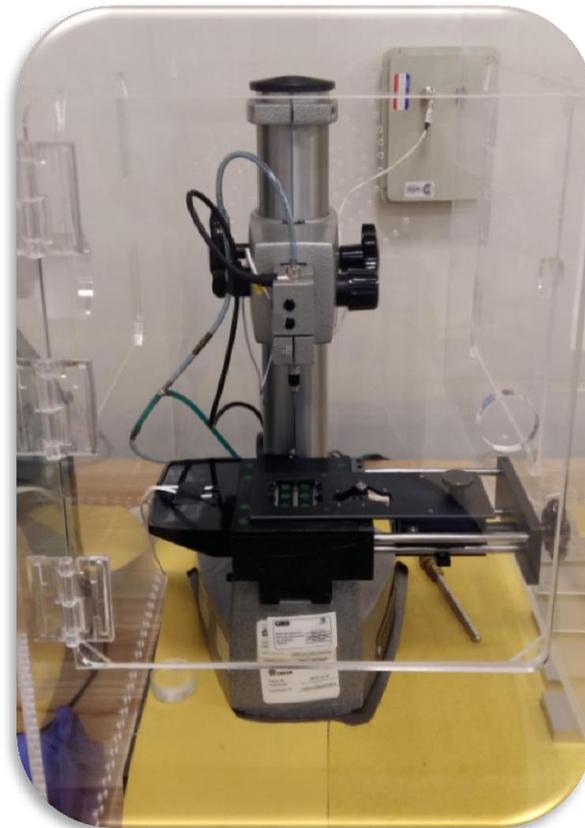
Las características metroológicas más importantes para los patrones primarios de longitud son la estabilidad y la exactitud de la frecuencia emitida. La *Mise en Pratique* establece una incertidumbre máxima en frecuencia de  $5 \times 10^{-11}$  para estos patrones.

Como se dijo anteriormente a parte de los bloques patrón grado K, el laboratorio debe contar con instrumentos comparadores que permitan realizar la comparación entre los bloques.

El laboratorio de Metrología Dimensional del CIDESI cuenta con dos comparadores electromecánicos verticales con alcance máximo de 100 mm con una resolución de 0,01  $\mu\text{m}$  y de 0,002  $\mu\text{m}$ . Dichos instrumentos son calibrados en sitio por personal del CENAM, entregando la información que es necesaria incluirla en el análisis de estimación de incertidumbre como variables de entrada de errores aleatorios y errores sistemáticos (ver tabla No. 2)

Prueba realizada	Resultado de cada prueba	$\mu\text{m}$
Repetibilidad	Valor máximo de la desviación estándar de la media.	0,001
Reposicionamiento	Valor máximo de la desviación estándar de la media.	0,001
Asimetría	Valor máximo de la incertidumbre estándar por asimetría.	0,001
Linealidad	Valor máximo de la desviación estándar de la media.	0,002

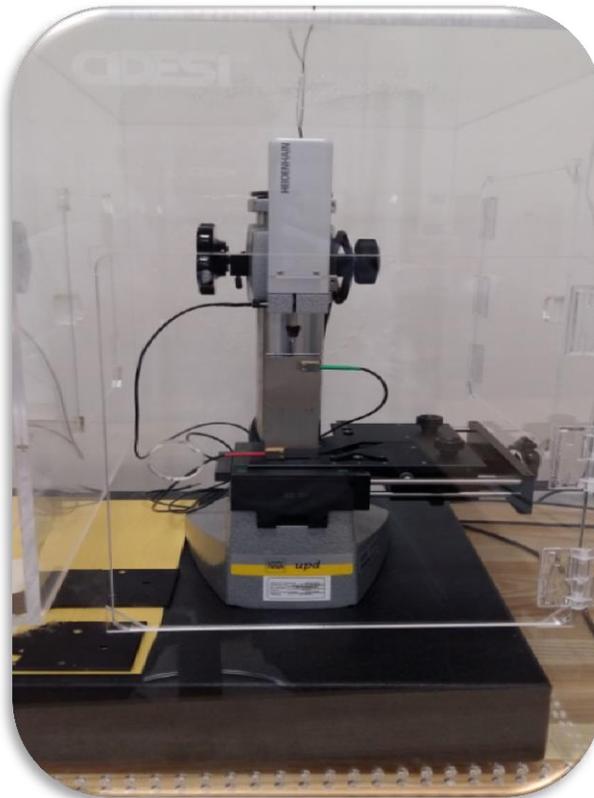
**Tabla 2. Resultados de la calibración del comparador electromecánico con resolución de 0,01  $\mu\text{m}$ .**



**Figura 14: Comparador electromecánico con resolución de 0,01  $\mu\text{m}$ .**

Prueba realizada	Resultado de cada prueba	μm
Repetibilidad	Valor máximo de la desviación estándar de la media.	0,000 9
Reposicionamiento	Valor máximo de la desviación estándar de la media.	0,001 3
Asimetría	Valor máximo de la incertidumbre estándar por asimetría.	0,003 2
Linealidad	Valor máximo de la desviación estándar de la media.	0,003 4

**Tabla 2.1. Resultados de la calibración del comparador electromecánico con resolución de 0,002 μm.**



**Figura 15: Comparador electromecánico con resolución de 0,002 μm.**

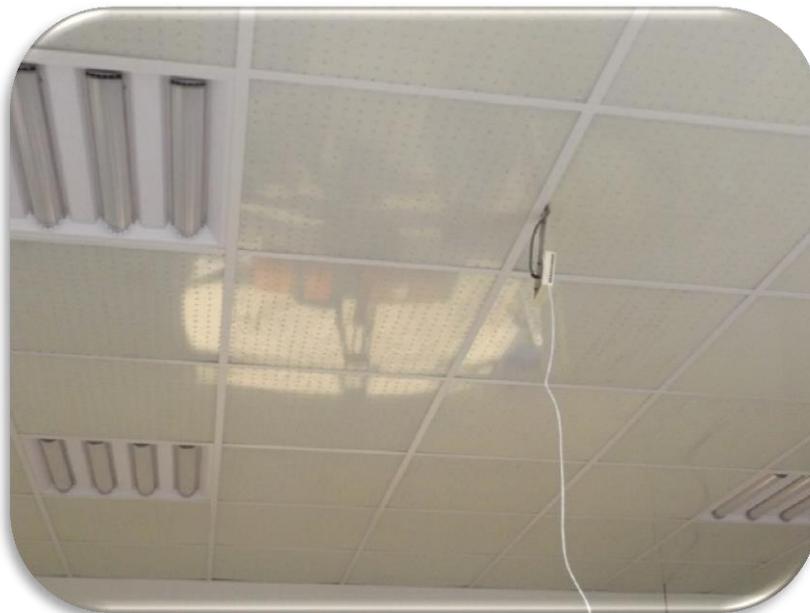
Cabe mencionar que estos comparadores son diseñados y construidos específicamente para la calibración de bloques patrón de longitud.

### **3.3. CARACTERÍSTICAS DE LA SALA DE ALTA EXACTITUD.**

El laboratorio de alta exactitud está construido con muros de piedra de mampostería con un espesor de 40 cm esto ayuda a retardar el calor producido por los rayos solares.

La construcción está sobre cimentación especial que ayuda a minimizar las vibraciones que viajan por el suelo

El laboratorio está comprendido dentro de las dimensiones de 7 m de largo, 6,5 m de ancho y 3,5 m de altura, el sistema de iluminación es por medio de lámparas de tubo fluorescentes que no emiten calor, el acceso es por medio de exclusiva que ayuda al control de temperatura y polvos, cuenta con un sistema de aire acondicionado capaz de controlar en un volumen de 90 m<sup>3</sup> una temperatura de 20°C con una tolerancia de  $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ , la inyección del aire acondicionado es por medio de una cámara plena con plafón perforado con diámetros de 8 mm el cual ayuda a disminuir la velocidad del aire buscando así condiciones cercanas al flujo laminar.



***Fig. 16. Vista del plafón del laboratorio perforado para permitir la salida del aire de la cámara plena.***

Se calcularon un máximo 3 personas dentro del laboratorio para lograr la estabilidad de temperatura a  $20 \pm 0,5$  °C.

Se cuenta con dos áreas de trabajo para la calibración de bloques patrón las cuales se encuentran aisladas por medio de cabinas de acrílico transparente de 6 mm de espesor, con perforaciones que garantizan el flujo continuo de aire acondicionado, las cabinas ayudan a que no afecten las partículas de polvo, la irradiación de la temperatura de la persona especialista así como las ondas sonoras que viajan en el aire.

Nota: Dentro de las cabinas se busca comprobar que la temperatura tiene una variación de 0,04 °C durante la calibración.



**Fig. 17. Cabinas para calibración de bloques patrón longitudinales**

### **3.4. COEFICIENTES DE EXPANSIÓN TÉRMICA.**

El coeficiente de expansión térmica es el cociente que mide el cambio relativo de longitud o volumen que se produce cuando un cuerpo sólido o un fluido dentro de un recipiente cambian de temperatura provocando una dilatación térmica.

De forma general, durante una transferencia de calor, la energía que está almacenada en los enlaces intermoleculares entre dos átomos cambia. Cuando la energía almacenada aumenta, también lo hace la longitud de estos enlaces. Así, los sólidos normalmente se expanden al calentarse y se contraen al enfriarse, este

comportamiento de respuesta ante la temperatura se expresa mediante el coeficiente de expansión térmica (típicamente expresado en unidades de  $^{\circ}\text{C}^{-1}$ ) el cual, para cuerpos sólidos, se calcula por la siguiente expresión:

$$\alpha_L = \frac{d \ln L}{dT} \approx \frac{1}{L} \frac{\Delta L}{\Delta T} \quad (38)$$

Si tomamos una varilla de acero, medimos su longitud a una determinada temperatura, la calentamos y nuevamente medimos su longitud, la relación entre estas dos mediciones de temperatura y longitud nos proporciona el coeficiente de dilatación térmica de dicho material “ $\alpha$ ”.

$$L_f = L_i(1 + \alpha \Delta T) \quad (39)$$

Donde:

$L_f$  longitud final

$L_i$  Longitud inicial

$\alpha$  Coeficiente de expansión térmica [ $^{\circ}\text{C}^{-1}$ ]

$\Delta T$  Diferencia de temperaturas (Temperatura final – Temperatura inicial)

Se puede considerar que el coeficiente de expansión térmica, es la resistencia que tienen los materiales al incremento o decremento de temperatura  $\Delta T$

Conociendo el coeficiente de expansión térmica y la longitud nominal es posible conocer el cambio de la longitud provocado por la variación de la temperatura.

Si se tienen dos materiales (1 y 2) y se conocen sus coeficientes de expansión térmicas  $\alpha_1=1,2 \times 10^{-6} \text{ } ^{\circ}\text{C}^{-1}$  y  $\alpha_2=24 \times 10^{-6} \text{ } ^{\circ}\text{C}^{-1}$ , se considera que el primer material tiene mayor resistencia a la variación de temperatura, por ejemplo:

Material 1

$$\Delta L_1 = L_n \alpha_1 \Delta T \quad (40)$$

Donde:

$\Delta L$  Variación de longitud.

$L_n$  Longitud medida. (15 mm)

$\alpha$  Coeficiente de expansión térmica ( $1,2 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ )

$\Delta T$  Variación de temperatura con respecto a  $20^\circ$  ( $2^\circ\text{C}$ )

$$\Delta L_1 = L_n \alpha_1 \Delta T = 15 \text{ mm} \times 1,2 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1} \times 2^\circ\text{C} = 0,036 \mu\text{m}$$

Material 2

$$\Delta L_2 = L_n \alpha_1 \Delta T$$

$\Delta L$  Variación de longitud.

$L_n$  Longitud medida. (15 mm)

$\alpha$  Coeficiente de expansión térmica ( $24 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ )

$\Delta T$  Variación de temperatura con respecto a  $20^\circ$  ( $2^\circ\text{C}$ )

$$\Delta L_2 = L_n \alpha_1 \Delta T = 15 \text{ mm} \times 24 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1} \times 2^\circ\text{C} = 0,72 \mu\text{m}$$

Se observa que el material 1 tiene mayor resistencia al cambio de temperatura ya que tuvo un incremento de longitud de  $0,036 \mu\text{m}$  y el material 2 tuvo un incremento mayor de  $0,72 \mu\text{m}$  considerando la misma longitud y misma variación de temperatura.

Dentro del modelo matemático se encuentran las variables  $\bar{\alpha}$  y  $\delta\alpha$  de las cuales contemplan los coeficientes de expansión térmica en los materiales de acero, cerámica y carburo de tungsteno, como estas variables de influencia son consideradas incertidumbres tipo B, se realizó una investigación documental con los principales fabricantes de bloques patrón, Mitutoyo, TESA, MAHR, Fowler, Starrett Webber y KOBA, ensayos de aptitud ema–CENAM. (ver anexo B).

Acero		Cerámica		Carburo de tungsteno	
$\times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$		$\times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$		$\times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$	
11,9	$\pm 1$	10,0	$\pm 1$	8,3	- - -
11,5	$\pm 1$	9,9	- - -	5,5	$\pm 1$
11,0	$\pm 1$	9,7	$\pm 0,8$	4,5	- - -
10,9	$\pm 1$	9,7	$\pm 1$	4,23	$\pm 0,3$
10,8	$\pm 0,5$	9,5	- - -	4,23	$\pm 0,1$
		9,3	$\pm 1$		
		9,3	$\pm 0,5$		

**Tabla 3. Principales coeficientes de expansión térmica.**

En la tabla 3 se presenta un resumen de la información acerca de la variabilidad de los coeficientes de expansión térmica.

Después de censar las variables de temperatura (ver anexo C) y recabar toda la información necesaria para la estimación de incertidumbre, se tiene el valor numérico de cada variable de entrada. Se muestran valores para el bloque patrón de longitud nominal de 100 mm.

$$l_s = 100 \text{ mm} \quad U_{l_s} = 0,049 \text{ } \mu\text{m}$$

$$\varepsilon_{al} \quad \text{Repetibilidad} = 0,001 \text{ } \mu\text{m} \quad \text{Reposicionamiento} = 0,001 \text{ } \mu\text{m}$$

$$\text{Linealidad} = 0,002 \text{ } \mu\text{m}.$$

$$\bar{\alpha} \quad 11,5 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1} \text{ para ambos bloques en material acero.}$$

$$\delta\theta \quad 0,042 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

$$\delta\alpha \quad 2,30 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}.$$

$$\theta \quad 0,044 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

$$\varepsilon_s \quad 0,001 \text{ } \mu\text{m}.$$

$$f_{ef} \quad 0 \text{ debido a que los dos bloques son de material acero.}$$

Este cálculo se realiza para cada  $l_s$ ; 0,5 mm; 10 mm; 25 mm; 50 mm; 75 mm; 100 mm considerando sus respectivas incertidumbres reportadas por el Centro Nacional de Metrología (ver tabla No.1). Posteriormente se procede a vaciar estos datos a las hojas de cálculo.

### 3.5. HOJAS DE CÁLCULO.

Se realizan los cálculos prácticos auxiliándonos con las hojas de cálculo del software Excel.

La figura 18 muestra las generalidades de la calibración como son:

- Identificación del patrón y del bloque que se calibra.
- Clase de exactitud del patrón y del bloque que se calibra.
- Longitudes nominales del patrón y del bloque que se calibra.
- Temperaturas en los ciclos de calibración.
- Temperaturas máxima y mínima detectadas en el ciclo.

CENTRO DE INGENIERIA Y DESARROLLO INDUSTRIAL												
LABORATORIO DE METROLOGÍA DIMENSIONAL						REG. No. LMD-						
CALIBRACIÓN DE BLOQUES PATRÓN POR COMPARACIÓN						FECHA 2015-xx-xx						
						HOJA TOMA DE LECTURAS						
						O. S. OME15xxx						
PROPIETARIO: CIDESI												
BLOQUE DE REFERENCIA												
VALOR NOMINAL (mm): 100 MARCA: 0												
GRADO: 0 No. DE SERIE: 90801												
BLOQUE A CALIBRAR (IBC)												
VALOR NOMINAL (mm): 100 MARCA: 0 No. SERIE: 980633												
TEMP. MÍNIMA (°C): 19,96		TEMP. MÁXIMA (°C): 20,00		UNIDADES: µm		θ, Ciclo de var. de la T		0,044				
						T del patrón, °C		¡O.K.!				
CICLO	B. REF. (P1)	B. A CAL. (P2)	VARIACIÓN PROMEDIOS (P2 - P1)	BLOQUE A CALIBRAR (IBC)				T del patrón, °C	T del calibrando, °C	θ, Dif. de T		
				P3	P4	P5	P6					
1	0,00	0,03		0,03	0,03	0,01	0,04	20,000	19,956	0,044	¡O.K.!	
2	0,00	0,02		0,04	0,01	0,02	0,02	20,000	19,956	0,044	¡O.K.!	
3	0,00	0,02	0,05	0,02	0,02	0,02	20,000	19,956	0,044	¡O.K.!		
PROMEDIO	0,00	0,02	0,02	0,04	0,02	0,02						
MÁXIMA DESVIACIÓN EN LONGITUD (ENTRE LOS PUNTOS P2, P3, P4, P5 Y P6) 0,02												

Fig. 18. Formato para la toma de lecturas de la calibración de bloques patrón.

El formato tiene incluido todo el trabajo de estimación de cada una de las incertidumbres estándar.

Se toma de la hoja que referencia los valores nominales de cada patrón el correspondiente valor de incertidumbre.

Se hace una selección previa en la carátula del informe para especificar el material del bloque y en base a ello la hoja hace los correspondientes cálculos donde se vean involucrados los coeficientes de expansión térmica tanto del patrón como del bloque que se calibra.

DATOS DE ORIGEN		
INCERTIDUMBRE DEL BLOQUE PATRÓN		
LONG.	Incertidumbre, $\mu\text{m}$	Valor de incertidumbre, $\mu\text{m}$
100	4,90E-02	2,45E-02

COEFICIENTES DE EXPANSIÓN TÉRMICA		DIFERENCIAS ENTRE COEFICIENTES		
material	coef. $^{\circ}\text{C}^{-1}$	ac - ac	ac - cer	ac - car
ACERO	1,15E-05	2,30E-06	-----	-----
CERÁMICA	9,30E-06	-----	4,28E-06	-----
CARBURO	5,50E-06	-----	-----	7,70E-06

**Fig. 19. Consideración de valor nominal, incertidumbre del patrón y coeficientes de expansión térmica  $l_s$ ,  $u_{l_s}$ ,  $\bar{\alpha}$  y  $\delta\alpha$ .**

En la programación de la hoja también se incluyen los datos de la calibración del comparador de bloques. Estos datos nos permitirán estimar la incertidumbre estándar debida a los errores aleatorios, a los errores sistemáticos y la fuerza de medición que ejercen los palpadores sobre ambas superficies de medición tanto del bloque patrón como del bloque que se calibra.

TABLA DE INCERTIDUMBRES ESTANDAR OBTENIDAS EN LA CARACTERIZACIÓN DEL COMPARADOR

PRUEBA REALIZADA	RESULTADO DE CADA UNA DE LAS PRUEBAS	µm
REPETIBILIDAD	VALOR MÁXIMO DE LA DESVIACIÓN ESTANDAR DE LA MEDIA	0,001
REPOSICIONAMIENTO	VALOR MÁXIMO DE LA DESVIACIÓN ESTANDAR DE LA MEDIA	0,001
ASIMETRÍA	VALOR MÁXIMO DE LA INCERTIDUMBRE ESTANDAR POR ASIMETRÍA	0,001
LINEALIDAD	VALOR MÁXIMO DE LA DESVIACIÓN ESTANDAR DE LA MEDIA	0,002

Incertidumbre por errores aleatorios del comparador U(ε <sub>al</sub> )		
Repetibilidad, µm	5,00E-04	0,00000025
Reposicionamiento	5,00E-04	0,00000025
Linealidad	1,00E-03	0,000001
U(ε <sub>al</sub> )	0,0012	
Incertidumbre por errores sistemáticos (Asimetría)		5,00E-04

PARÁMETROS	PALPADOR SUPERIOR
Fuerza de palpación	1 N

PALPADOR INFERIOR	
1 N	

Fig. 20. Introducción de errores aleatorios, errores sistemáticos y fuerza de palpación,  $\epsilon_{al}$ ,  $\epsilon_s$ ,  $f_{def}$ .

Se continúa con las estimaciones de los coeficientes de sensibilidad o derivadas parciales de primer orden y luego de segundo orden. Se muestra el tratado de los coeficientes de sensibilidad de primer y segundo orden para los diferentes tipos de materiales, acero (ac), cerámica (cera) y carburo de tungsteno (carb.).

COEFICIENTES DE SENSIBILIDAD PRIMER ORDEN									
Longitud mm	Material	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>3</sub> , µm°C	C <sub>4</sub> , µm°C <sup>-1</sup>	C <sub>5</sub> , µm°C	C <sub>6</sub> , µm°C <sup>-1</sup>	C <sub>7</sub>	C <sub>8</sub>
100	ac - ac	1,0E+00	1	-4400	-1,150	-4400	-0,230	1	1
100	Material	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>3</sub>	C <sub>4</sub>	C <sub>5</sub>	C <sub>6</sub>	C <sub>7</sub>	C <sub>8</sub>
100	ac - cera	1,0E+00	1	-4400	-1,051	-4400	-0,428	1	1
100	Material	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>3</sub>	C <sub>4</sub>	C <sub>5</sub>	C <sub>6</sub>	C <sub>7</sub>	C <sub>8</sub>
100	ac - carb.	1,00E+00	1	-4400	-0,880	-4400	-0,770	1	1

COEFICIENTES DE SENSIBILIDAD SEGUNDO ORDEN											
D <sub>13</sub> , µm	D <sub>14</sub> , µm	D <sub>15</sub> , µm	D <sub>26</sub> , µm	D <sub>31</sub> , µm	D <sub>41</sub> , µm	D <sub>51</sub> , µm	D <sub>61</sub> , µm	D <sub>36</sub> , µm	D <sub>56</sub> , µm	D <sub>43</sub> , µm	D <sub>65</sub> , µm
-0,04	-1,15E-05	-0,04	-2,30E-06	-0,04	-1,15E-05	-0,04	-2,30E-06	-100000	-100000	-1,15	-4400
D <sub>36</sub>	D <sub>45</sub>	D <sub>54</sub>	D <sub>63</sub>	D <sub>36</sub>							
-0,04	-1,05E-05	-0,04	-4,28E-06	-0,04	1,05E-05	-0,04	-4,28E-06	-100000	-100000	-100000	-100000
D <sub>36</sub>	D <sub>45</sub>	D <sub>54</sub>	D <sub>63</sub>	D <sub>36</sub>							
-0,04	-8,80E-06	-0,04	-7,70E-06	-0,04	-8,80E-06	-0,04	-7,70E-06	-100000	-100000	-100000	-100000

Fig. 21. Coeficientes de sensibilidad de primer y segundo orden.

Contiene la hoja de Excel un apartado destinado a la determinación de las incertidumbres parciales por diferencias de temperaturas entre el patrón y el bloque que se calibra y como por el ciclo de variación.

Dif. De T. entre bloques, $\delta\theta$	0,04 °C
Variación cíclica, $\theta$	0,04 °C
Incertidumbres por efectos de la temperatura temperatura	
Ciclo de variación en tiempo; °C $u\theta$	0,031
Dif. de temperaturas entre bloques; °C $u\delta\theta$	0,025

**Fig. 22. Incertidumbres estándar por diferencias de temperaturas.**

Haciendo resumen, la hoja de Excel posibilita el cálculo confiado de las incertidumbres estándar que se muestran a continuación:

$$u(l_s) = \frac{U(l_s)}{k}$$

INCERTIDUMBRE DEL BLOQUE PATRÓN		
LONG.	Incertidumbre, $\mu\text{m}$	Valor de incertidumbre, $\mu\text{m}$ $u_l$
100	4,90E-02	2,45E-02

$$u(\bar{\alpha}) = \frac{\alpha_p + \alpha_c}{2\sqrt{3}} \quad u(\delta\alpha) = \frac{\delta\alpha}{\sqrt{3}} = \frac{(\alpha_c + 10\% \alpha_c) - (\alpha_p - 10\% \alpha_p)}{\sqrt{3}}$$

Incert. por coef. promedio de dilatación térmica del bloque patrón e IBC		
Coeficiente promedio ac- ac	1,15E-05	6,6E-06
Coeficiente promedio ac- cer.	1,05E-05	6,1E-06
Coeficiente promedio ac- carb.	8,80E-06	5,1E-06

Incertidumbre por diferencia de coeficientes: $u\delta\alpha$					
$u(\alpha_{a-a})$	1,33E-06	$u(\alpha_{a-cer})$	2,47E-06	$u(\alpha_{a-carb})$	4,45E-06

$$u(\delta\theta) = \frac{\delta\theta}{\sqrt{2}} \quad u(\theta) = \frac{\theta}{\sqrt{3}}$$

Dif. De T. entre bloques, $\delta\theta$	0,04 °C
Variación cíclica, $\theta$	0,04 °C
Incertidumbres por efectos de la temperatura temperatura	
Ciclo de variación en tiempo; °C $u\theta$	0,031
Dif. de temperaturas entre bloques; °C $u\delta\theta$	0,025

$$u(\varepsilon_{at}) = \sqrt{\left(\frac{Re\ petibilida\ d}{2}\right)^2 + \left(\frac{Re\ posicionamiento}{2}\right)^2 + \left(\frac{Linealidad}{2}\right)^2}$$

Incertidumbre por errores aleatorios del comparador $u_{\varepsilon_{al}}$		
Repetibilidad, $\mu\text{m}$	5,00E-04	0,00000025
Reposicionamiento	5,00E-04	0,00000025
Linealidad	1,00E-03	0,000001
$U(\varepsilon_{al})$	0,0012	

$$u(\varepsilon_s) = \frac{\text{Asimetría}}{\sqrt{3}}$$

Incert. por errores sistemáticos (Asimetría)	$u_{\varepsilon_s}$	5,00E-04
--	---------------------	----------

$$u(f_{def}) = 0,8255 \sqrt[3]{\left(\frac{F_a^2}{R}\right) \left(\frac{1-\mu_0^2}{E_0} + \frac{1-\mu_c^2}{E_c}\right)^2}$$

Deformación por diferencia de material en $\mu\text{m}$			
Bloque patrón	Bloque calibrando (IBC)		
	acero	cerámica	carburo
acero	0	0	-0,06
	$u f_{def}$		
	0,000	0,000	-0,017

La composición de los términos de segundo orden.

TÉRMINOS DE SEGUNDO ORDEN, DIFERENTES DE CERO.		
1	3,00E-17	1,50E-17
2	5,12E-17	2,56E-17
3	2,30E-17	1,15E-17
4	3,07E-18	1,54E-18
5	3,00E-17	1,50E-17
6	5,12E-17	2,56E-17
7	2,30E-17	1,15E-17
8	3,07E-18	1,54E-18
9	1,67E-04	8,33E-05
10	2,20E-14	1,10E-14
11	1,91E-04	9,57E-05
12	3,07E-07	1,85E-07
<b>SUMA DE LOS TÉRMINOS DE 2° ORDEN:</b>		<b>1,79E-04</b>

Presupuesto de incertidumbre para un bloque determinado.

ESTIMACIÓN DE INCERTIDUMBRE POR LONGITUDES DE CADA BLOQUE

COMPONENTE	DESCRIPCIÓN DE LA COMPONENTE $u(x_i)$	(C) Coeficiente de sensibilidad	Longitud (mm)	100
			( $\mu$ ) Valor de la comp. de la inc., $\mu\text{m}$	( $\mu^2\text{C}^2$ ) $\mu\text{m}^2$
1	Bloque patrón de referencia	0,999999494	2,5E-02	0,00E+00
2	Errores aleatorios del comparador	1	0,0012	1,5E-06
3	Coef. Prom. de exp. térmica	-4400	5,1E-06	5,0E-04
4	Ciclo de variación en el tiempo	-0,880	0,031	7,5E-04
5	Dif. de los coef. de exp. térmica	-4400	4,45E-06	3,8E-04
6	Dif. de temp. entre los bloques	-0,77	0,025	3,8E-04
7	Errores sistemáticos	1	5,0E-04	2,5E-07
8	Deformación de los bloques	1	-1,73E-02	3,0E-04
9	Términos de segundo orden $D_{ij}$	1	1,34E-02	1,8E-04
			Suma	2,5E-03 $\mu\text{m}$
			$\sqrt{\quad}$	5,0E-02 $\mu\text{m}$
			Incertidumbre expandida: $u = U \cdot k$	0,10 $\mu\text{m}$

**Fig. 23. Coeficientes de sensibilidad e Incertidumbres estándar para estimar la incertidumbre expandida.**

### 3.6. LÍMITES DE VARIACIÓN DE TEMPERATURAS.

Una vez programada la hoja de cálculo se procede a conocer las tolerancias para los grados de exactitud de los bloques patrón, considerados en la norma NMX-CH-3650.

Longitud nominal mm	Grado 0		Grado 1		Grado 2	
	te; $\mu\text{m}$	tv; $\mu\text{m}$	te; $\mu\text{m}$	tv; $\mu\text{m}$	te; $\mu\text{m}$	tv; $\mu\text{m}$
$0,5 < l_n \leq 10$	$\pm 0,12$	0,10	$\pm 0,20$	0,16	$\pm 0,45$	0,30
$10 < l_n \leq 25$	$\pm 0,14$	0,10	$\pm 0,30$	0,16	$\pm 0,60$	0,30
$25 < l_n \leq 50$	$\pm 0,20$	0,10	$\pm 0,40$	,018	$\pm 0,80$	0,30
$50 < l_n \leq 75$	$\pm 0,25$	0,12	$\pm 0,50$	0,18	$\pm 1,00$	0,35
$75 < l_n \leq 100$	$\pm 0,30$	0,12	$\pm 0,60$	0,20	$\pm 1,20$	0,35

**Tabla 4. Grados de exactitud y tolerancias para los bloques patrón.**

Uno de los objetivos de esta investigación es conocer si la incertidumbre expandida del método para calibración de bloques patrón puede discriminar el grado de exactitud considerando 1/3 de la tolerancia de la clase de exactitud del bloque patrón.

La siguiente tabla muestra la consideración de 1/3 al valor de la desviación límite de longitud en cualquier punto desde la longitud nominal "te" (punto central) para

generar los límites que se compararán con el valor de la incertidumbre expandida y decidir si es posible discriminar el grado.

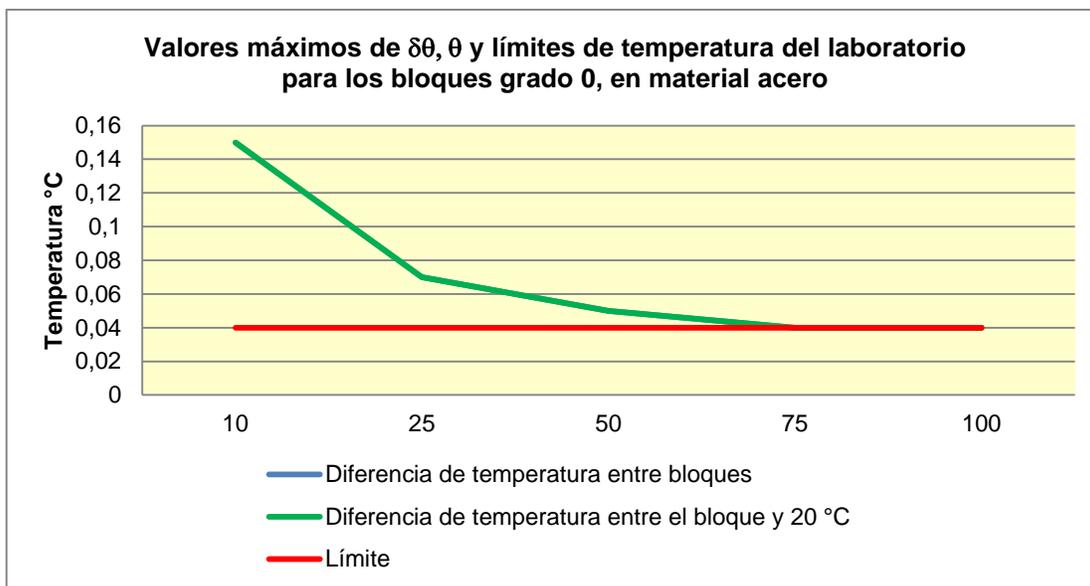
LONGITUD NOMINAL	Desviación límite de longitud en cualquier punto desde la longitud nominal “te”; $\mu\text{m}$		
	Grado 0	Grado 1	Grado 2
mm			
$0,5 < l_n \leq 10$	0,040	0,067	0,15
$> 10 < l_n \leq 25$	0,047	0,10	0,20
$> 25 < l_n \leq 50$	0,067	0,13	0,27
$> 50 < l_n \leq 75$	0,083	0,17	0,33
$> 75 < l_n \leq 100$	0,10	0,20	0,40

**Tabla 5. Límites de 1/3 de los grados de exactitud.**

Teniendo esta información se procede a realizar los cálculos para conocer en qué orden debemos de controlar las variables  $\theta$  y  $\delta\theta$  desviación de temperatura del bloque patrón respecto a 20 °C, diferencia de temperatura entre el bloque patrón e IBC, respectivamente.

Longitud nominal; mm	Grado 0		Grado 1		Grado 2	
	$\delta\theta$	$\theta$	$\delta\theta$	$\theta$	$\delta\theta$	$\theta$
	°C					
$0,5 < l_n \leq 10$	0,15	0,15	0,28	0,28	0,65	0,65
$> 10 < l_n \leq 25$	0,07	0,07	0,17	0,17	0,35	0,35
$> 25 < l_n \leq 50$	0,05	0,05	0,11	0,11	0,24	0,23
$> 50 < l_n \leq 75$	0,04	0,04	0,10	0,09	0,19	0,19
$> 75 < l_n \leq 100$	0,04	0,04	0,09	0,08	0,18	0,17

**Tabla 6. Variación de temperatura considerando material acero ( $11,5 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ) para el patrón e IBC.**

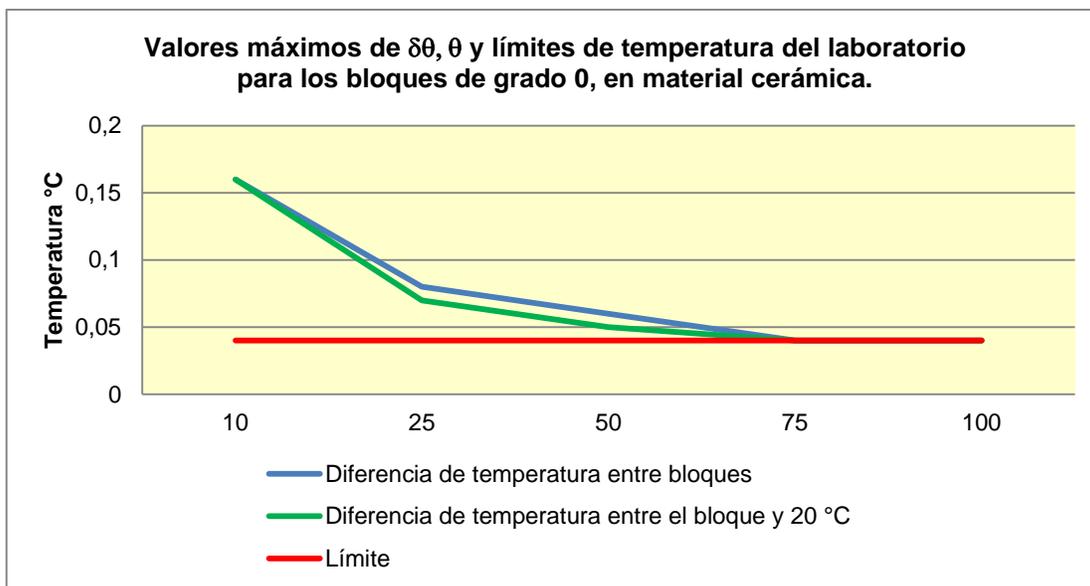


**Gráfica 1. Valores máximos de  $\delta\theta$ ,  $\theta$  y límites de temperatura para bloques grado 0 y material acero.**

Nota: Para los nominales menores a 5 mm se permiten variaciones mayores de 0,5 °C, el laboratorio decide fijar como límite de temperatura para todos los nominales menores de 10 mm de 0,15 °C.

Longitud nominal; mm	Grado 0		Grado 1		Grado 2	
	$\delta\theta$	$\theta$	$\delta\theta$	$\theta$	$\delta\theta$	$\theta$
	°C					
0,5 < ln ≤ 10	0,16	0,16	0,29	0,29	0,68	0,68
> 10 < ln ≤ 25	0,08	0,07	0,18	0,17	0,37	0,37
> 25 < ln ≤ 50	0,06	0,05	0,12	0,11	0,25	0,24
> 50 < ln ≤ 75	0,04	0,04	0,10	0,10	0,20	0,20
> 75 < ln ≤ 100	0,04	0,04	0,09	0,09	0,18	0,18

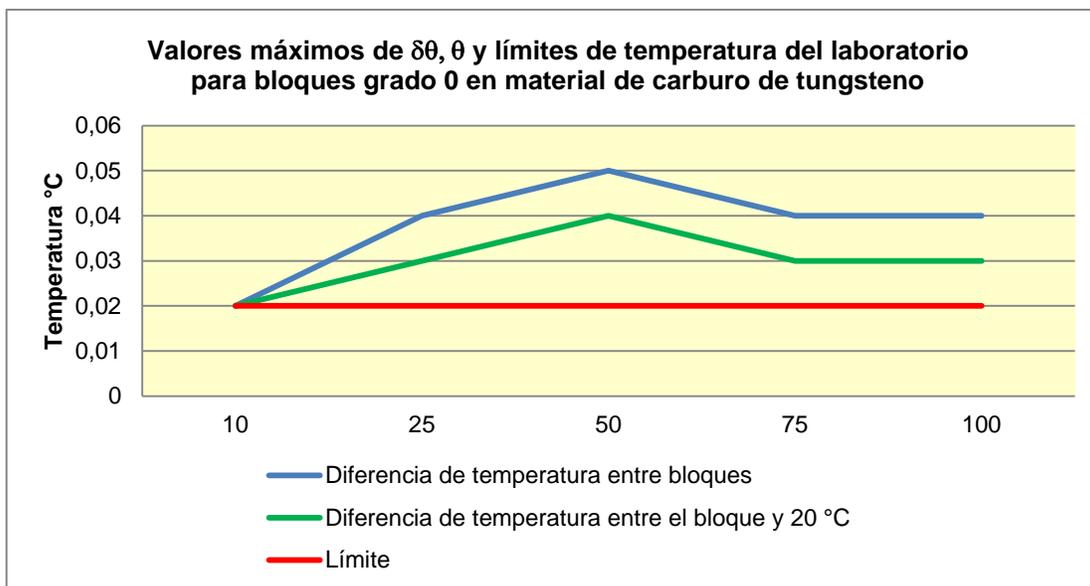
**Tabla 7. Variación de temperatura  $\theta$  considerando material acero patrón y cerámica ( $9,3 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ) para el IBC.**



**Gráfica 2. Valores máximos de  $\delta\theta$ ,  $\theta$  y límites de temperatura para bloques grado 0, patrón acero, IBC material cerámica.**

Longitud nominal; mm	Grado 0		Grado 1		Grado 2	
	$\delta\theta$	$\theta$	$\delta\theta$	$\theta$	$\delta\theta$	$\theta$
	°C					
$0,5 < l_n \leq 10$	0,02	0,02	0,25	0,24	0,66	0,66
$> 10 < l_n \leq 25$	0,04	0,03	0,17	0,16	0,35	0,35
$> 25 < l_n \leq 50$	0,05	0,04	0,11	0,11	0,24	0,24
$> 50 < l_n \leq 75$	0,04	0,03	0,10	0,09	0,20	0,19
$> 75 < l_n \leq 100$	0,04	0,03	0,09	0,08	0,18	0,17

**Tabla 8. Variación de temperatura considerando material acero patrón y carburo de tungsteno ( $5,5 \times 10^{-6} \text{°C}^{-1}$ ) para el IBC.**



**Gráfica 3. Valores máximos de  $\delta\theta$ ,  $\theta$  y límites de temperatura para bloques grado 0, patrón acero, IBC material carburo de tungsteno.**

Debido a que existen diferentes coeficientes de expansión térmica de un mismo material y en muchos casos se desconoce el mismo, se analizan los extremos.

Longitud nominal; mm	$\alpha = 11,5 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$		$\alpha = 10,8 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$	
	Grado "0"; °C			
	$\delta\theta$	$\theta$	$\delta\theta$	$\theta$
$0,5 < l_n \leq 10$	0,15	0,15	0,16	0,16
$> 10 < l_n \leq 25$	0,07	0,07	0,08	0,07
$> 25 < l_n \leq 50$	0,05	0,05	0,06	0,05
$> 50 < l_n \leq 75$	0,04	0,04	0,05	0,04
$> 75 < l_n \leq 100$	0,04	0,04	0,04	0,04

**Tabla 9. Variación de temperatura considerando los extremos de los coeficientes de expansión térmica del acero.**

Se observa que para algunos intervalos existen variaciones en el orden de 0,01 °C podría decirse que es una variación despreciable, sin embargo esta pequeña variación puede afectar los términos de segundo orden y provocar que la incertidumbre expandida sea mayor al límite deseado de 1/3 del grado de exactitud, para evitar esto se recomienda controlar la temperatura con una variación de 0,04 °C para todos los intervalos.

Longitud nominal; mm	$\alpha = 9,3 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$		$\alpha = 10,0 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$	
	Grado "0"; °C			
	$\delta\theta$	$\theta$	$\delta\theta$	$\theta$
$0,5 < l_n \leq 10$	0,16	0,16	0,15	0,15
$> 10 < l_n \leq 25$	0,08	0,07	0,07	0,07
$> 25 < l_n \leq 50$	0,06	0,05	0,05	0,05
$> 50 < l_n \leq 75$	0,04	0,04	0,04	0,04
$> 75 < l_n \leq 100$	0,04	0,04	0,04	0,04

**Tabla 10. Variación de temperatura considerando los extremos de los coeficientes de expansión térmica de cerámica.**

Longitud nominal; mm	$\alpha = 5,5 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$		$\alpha = 4,23 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$	
	Grado "0"; °C			
	$\delta\theta$	$\theta$	$\delta\theta$	$\theta$
$0,5 < l_n \leq 10$	0,02	0,02	0,02	0,02
$> 10 < l_n \leq 25$	0,04	0,03	0,04	0,03
$> 25 < l_n \leq 50$	0,05	0,04	0,04	0,02
$> 50 < l_n \leq 75$	0,04	0,03	0,04	0,03
$> 75 < l_n \leq 100$	0,04	0,03	0,04	0,03

**Tabla 11. Variación de temperatura considerando los extremos de los coeficientes de expansión térmica de carburo de tungsteno.**

Se comprueba de manera experimental que dentro de las cabinas para la calibración de bloques patrón es posible lograr las variaciones de temperatura calculadas y de esta manera garantizar la exactitud del bloque patrón, obteniendo las siguientes incertidumbres, ver tabla 12.

Para hacer posible el control de las variables de temperatura  $\theta$  y  $\delta\theta$ , es importante considera lo comentado en el punto 3.1.1.

LONGITUD NOMINAL	Grado 0		
	$U_{\text{acero}}$	$U_{\text{cerámica}}$	$U_{\text{carburo de tung.}}$
mm	$\mu\text{m}$		
$0,5 < l_n \leq 10$	$\pm 0,022$	$\pm 0,022$	$\pm 0,040$
$> 10 < l_n \leq 25$	$\pm 0,033$	$\pm 0,033$	$\pm 0,046$
$> 25 < l_n \leq 50$	$\pm 0,055$	$\pm 0,053$	$\pm 0,068$
$> 50 < l_n \leq 75$	$\pm 0,080$	$\pm 0,077$	$\pm 0,080$
$> 75 < l_n \leq 100$	$\pm 0,91$	$\pm 0,10$	$\pm 0,099$

**Tabla 12. Incertidumbres controlando lo mejor posible la temperatura a 0,04 °C para todos los intervalos.**

En la tabla No. 13 se muestra la aportación del segundo orden y se refleja que su aportación puede ocasionar que en términos de incertidumbre no sea posible discriminado el grado de exactitud del bloque patrón.

La tabla demuestra que haciendo la estimación de incertidumbre solamente al primer orden, controlando las variables  $\delta\theta$  y  $\theta$ , se obtiene una incertidumbre expandida de  $\pm 0,095 \mu\text{m}$ , dicho valor se encuentra dentro del 1/3 del grado de exactitud considerado como límite, al agregar la aportación del segundo y variar a  $\delta\theta$  se observa que la incertidumbre expandida sobre pasa el límite, ocasionando no poder discriminar el grado de exactitud del bloque patrón.

Longitud nominal	$\delta\theta$	$\theta$	1 <sup>er</sup> . Orden; $\mu\text{m}$	2 <sup>do</sup> . Orden; $\mu\text{m}$	Aportación 2 <sup>do</sup> . Orden
mm	°C		$\pm U$		$\mu\text{m}$
100	0,04	0,04	0,095	0,10	2,54E-04
	0,05	0,04	0,103	0,11	3,56E-04

**Tabla 13. Aportación del segundo orden. Material cerámica ( $9,3 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ ), grado 0.**

### 3.7 AYUDAS VISUALES.

Las ayudas visuales son herramientas gráficas o visuales que nos permiten identificar errores, probables errores, desviaciones de temperaturas fuera de los límites tolerados, etc., que permiten a los metrologos evitar este tipo de situaciones.

Se han creado e implantado en el laboratorio ayudas visuales que minimizan la posibilidad de errores durante los procesos de calibraciones de bloques patrón.

Una vez conociendo los límites de las variables de temperatura que se deben controlar para garantizar el grado, se trabaja en programar alertas visuales en el formato de calibración para las variables  $\theta$  y  $\delta\theta$  y de esta manera el personal puede observar de manera inmediata si es posible seguir con la calibración o tomar acción para controlar las variables

Cuando las variaciones de temperatura se encuentran dentro del límite establecido en la hoja de toma de lecturas del formato aparece "OK" como señal de que puede proceder la calibración, en caso contrario aparecerá "CUIDADO" como alerta para tomar acciones y controlar las variables.

$\theta$ , Ciclo de var. de la T	0,057		
T del patrón, °C	T del calibrando, °C	$\delta\theta$ , Dif. de T	
20,000	19,950	0,050	CUIDADO
20,000	19,940	0,060	CUIDADO
20,000	19,940	0,060	CUIDADO

**Fig. 24. Ayuda visual cuando la variación de temperatura sobre pasa el límite.**

$\theta$ , Ciclo de var. de la T	0,044		
	¡O.K.!		
T del patrón, °C	T del calibrando, °C	$\delta\theta$ , Dif. de T	
20,000	19,956	0,044	¡O.K.!
20,000	19,956	0,044	¡O.K.!
20,000	19,956	0,044	¡O.K.!

**Fig. 25. Ayudas visuales cuando la variación de temperatura es aceptable**

También se programaron ayudas para que se confirme si la incertidumbre expandida es menor o igual al tercio del grado de exactitud y de forma automática se visualiza si se tiene la capacidad para discriminar el grado de exactitud.

VALOR NOMINAL, mm	INCERTIDUMBRE DE MEDIDA, $\mu\text{m}$	GRADO DE EXACTITUD	0
10,00	$\pm 0,024$	1/3 TOLERANCIA DEL GRADO	¿SE PUEDE DISCRIMINAR EL GRADO DE EXACTITUD DEL BLOQUE?
25,000	$\pm 0,029$	( $\mu\text{m}$ )	
50,000	$\pm 0,061$	$\pm 0,040$	SI
75,000	$\pm 0,050$	$\pm 0,047$	SI
100,000	$\pm 0,094$	$\pm 0,067$	SI
		$\pm 0,083$	SI
		$\pm 0,100$	SI

**Fig.26. Discriminando el grado ya que la incertidumbre es menor a 1/3 de la clase de exactitud.**

VALOR NOMINAL, mm	INCERTIDUMBRE DE MEDIDA, $\mu\text{m}$	GRADO DE EXACTITUD	0
10,00	$\pm 0,044$	1/3 TOLERANCIA DEL GRADO	¿SE PUEDE DISCRIMINAR EL GRADO DE EXACTITUD DEL BLOQUE?
25,000	$\pm 0,029$	( $\mu\text{m}$ )	
50,000	$\pm 0,061$	$\pm 0,040$	NO
75,000	$\pm 0,050$	$\pm 0,047$	SI
100,000	$\pm 0,113$	$\pm 0,067$	SI
		$\pm 0,083$	SI
		$\pm 0,100$	NO

**Fig. 27. No es posible discriminar el grado ya que la incertidumbre es mayor a 1/3 de la clase de exactitud.**

### 3.8. ANÁLISIS DE LA VARIACIÓN DE LONGITUD.

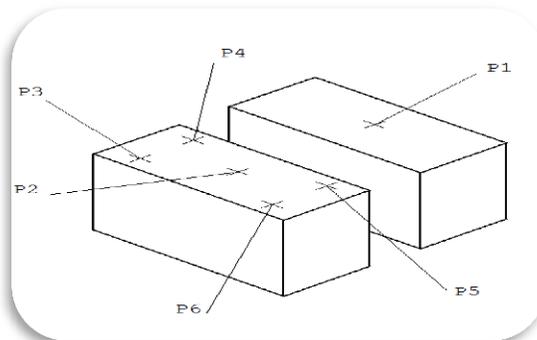
El análisis de la variación de longitud de los bloques no fue una actividad planificada para el tema de esta tesis. Sin embargo, por la relación estrecha que guarda con la determinación de la longitud central y como es parte de las características que se determinan durante la calibración de bloques patrón, se decide abordarlo en este trabajo.

#### 3.8.1. VARIACIÓN DE LONGITUD. GENERALIDADES.

Otra de las características metroológicas de los bloques patrón es la tolerancia para la variación de longitud “tv” (paralelismo entre superficies de referencia) también considerado por la norma NMX-CH-3650- IMNC (ver anexo A).

El paralelismo es la diferencia entre la longitud máxima y la longitud mínima del bloque.

Dentro del procedimiento de calibración para bloques patrón el laboratorio considera la forma para calcular la variación de longitud “tv”. Recordando la figura 5 en la que se muestra la identificación de los puntos de medición en los bloques rectangulares, se puede explicar cómo se calcula la variación de longitud.



**Figura 5: Puntos para la medición de paralelismo.**

Primeramente es necesario conocer la desviación de longitud de los puntos (P2, P3, P4, P5, P6) con respecto al punto P1 y posteriormente con el estadístico rango podemos calcular la variación de longitud. Ejemplo: se tienen los siguientes datos:

$P2 = 0,03 \mu\text{m}$        $P3 = 0,05 \mu\text{m}$        $P4 = 0,08 \mu\text{m}$        $P5 = -0,04 \mu\text{m}$

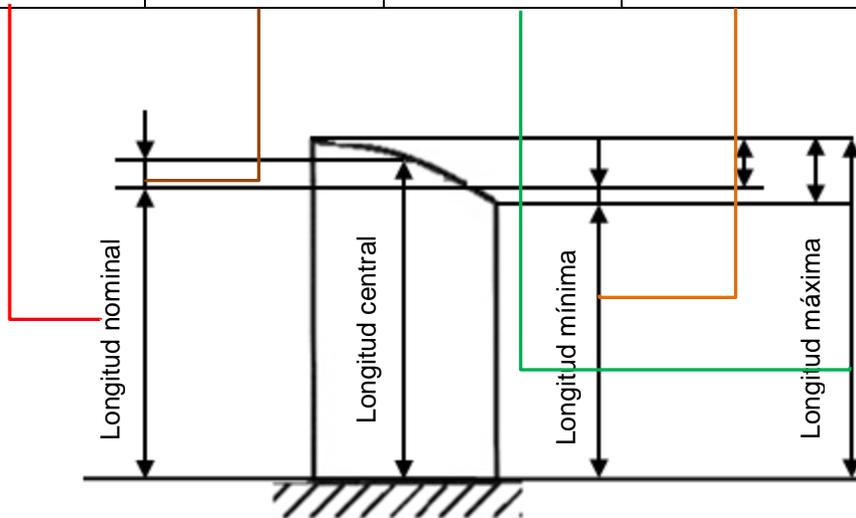
$P6 = 0,06 \mu\text{m}$

Se identifica las desviaciones extremas, es decir la desviación mayor y la desviación menor, para este caso se tiene que:

$“tv” = (P4 - P5) = (0,08 \mu\text{m}) - (-0,04 \mu\text{m}) = 0,12 \mu\text{m}$

Para esta característica la norma NMX-CH-3650-IMNC, también considera tolerancias de acuerdo a las longitudes y a los grados de exactitud, y es considerado un criterio para degradar la clase del bloque patrón, por esta razón es importante también considerar que la incertidumbre de esta prueba sea  $\leq 1/3$  de la tolerancia de “tv” y de esta manera poder discriminar el grado de exactitud.

Longitud nominal; $L_n$ ; mm	Desviación de la longitud central; $t_e$ ; $\mu\text{m}$	Desviación de la longitud máxima; $\mu\text{m}$	Desviación de la longitud mínima; $\mu\text{m}$	Paralelismo (Variación en longitud); $t_v$ ; $\mu\text{m}$
100	+0,02	+0,03	-0,02	0,05



**Figura 28: Determinación de las diferentes longitudes en un bloque patrón**

### 3.8.2. DETERMINACIÓN DE LA INCERTIDUMBRE PARA LA VARIACIÓN DE LONGITUD.

Los laboratorios de calibración en estos momentos solamente reportamos una incertidumbre tanto para la calibración de la longitud central del bloque patrón como para la calibración de la variación de longitud. Esta situación no es del todo correcta debido a que son dos características con tolerancias diferentes y que se determinan de otra manera.

La determinación de la incertidumbre para la variación de longitud es la estimación de la mejor capacidad para la calibración en la variación de longitud tv (paralelismo) y para la cual se propone el siguiente modelo.

$$// = l_b(\alpha \times \Delta T) + E_{al} + E_{sis} \quad (41)$$

Donde:

// Paralelismo del bloque que se calibra.

$l_b$  Longitud del bloque a calibrar.

$\alpha$  Coeficiente de expansión térmica del bloque a calibrar.

$\Delta T$  Variación de temperatura entre los extremos del bloque a calibrar.

$E_{al}$  Errores aleatorios del comparador de bloques.

$E_{sis}$  Errores sistemáticos del comparador de bloques.

Primer paso: Cálculo de los coeficientes de sensibilidad  $E_i$  y  $F_i$ .

$$E_1 = \frac{\partial //}{\partial l_b} = \alpha \Delta T$$

$$E_2 = \frac{\partial //}{\partial \alpha} = l_b \Delta T$$

$$E_3 = \frac{\partial //}{\partial \Delta T} = l_b \alpha$$

$$E_4 = \frac{\partial //}{\partial E_{al}} = 1$$

$$E_5 = \frac{\partial //}{\partial E_{sis}} = 1$$

Del análisis de los coeficientes de sensibilidad se puede observar que las variables que tienen influencia con la temperatura son significativas y por tal razón se procede a derivar al segundo orden.

Siguiendo la metodología mencionada en el punto 2.6.3, denotando las primeras derivadas como  $E$  y las segundas  $F$ .

Para el primer término se tiene:

$$E_1 = \alpha \Delta T$$

$$F_{11} = \frac{\partial}{\partial l_b} E_1 = 0 \quad F_{12} = \frac{\partial}{\partial \alpha} E_1 = \Delta T \quad F_{13} = \frac{\partial}{\partial \Delta T} E_1 = \alpha$$

Para el segundo término se tiene:

$$E_2 = l_b \Delta T$$

$$F_{14} = \frac{\partial}{\partial l_b} E_2 = \Delta T \quad F_{15} = \frac{\partial}{\partial \alpha} E_2 = 0 \quad F_{16} = \frac{\partial}{\partial \Delta T} E_2 = l_b$$

Para el tercer término se tiene:

$$E_3 = l_b \alpha$$

$$F_{17} = \frac{\partial}{\partial l_b} E_3 = \alpha \quad F_{18} = \frac{\partial}{\partial \alpha} E_3 = l_b \quad F_{19} = \frac{\partial}{\partial \Delta T} E_3 = 0$$

$$u_c^2(y) = E_1^2 u^2(l_b) + E_2^2 u^2(\alpha) + E_3^2 u^2(\Delta T) + E_4^2 u^2(E_{al}) + E_5^2 u^2(E_{sis}) + \left[ \frac{1}{2} [F_{12}^2 u^2(l_b) u^2(\alpha)] + \frac{1}{2} [F_{13}^2 u^2(l_b) u^2(\Delta T)] + \frac{1}{2} [F_{14}^2 u^2(\alpha) u^2(l_b)] + \frac{1}{2} [F_{16}^2 u^2(\alpha) u^2(\Delta T)] + \frac{1}{2} [F_{17}^2 u^2(\Delta T) u^2(l_b)] + \frac{1}{2} [F_{18}^2 u^2(\Delta T) u^2(\alpha)] \right]$$

(42)

Sustituyendo los valores de cada coeficiente de sensibilidad obtenemos:

$$u_c^2(y) = (\alpha\Delta T)^2 u^2(l_b) + (l_b\Delta T)^2 u^2(\alpha) + (l_b\alpha)^2 u^2(\Delta T) + (1)^2 u^2(E_{al}) + (1)^2 u^2(E_{sis}) +$$

$$\left[ \frac{1}{2} [\Delta T^2 u^2(l_b) u^2(\alpha)] + \frac{1}{2} [\alpha^2 u^2(l_b) u^2(\Delta T)] + \frac{1}{2} [\Delta T^2 u^2(\alpha) u^2(l_b)] + \frac{1}{2} [l_b^2 u^2(\alpha) u^2(\Delta T)] + \right.$$

$$\left. \frac{1}{2} [\alpha^2 u^2(\Delta T) u^2(l_b)] + \frac{1}{2} [l_b^2 u^2(\Delta T) u^2(\alpha)] \right]$$

(43)

Segundo paso: Estimación de las incertidumbres estándar ( $u_{xi}$ ).

a) Incertidumbre heredada del patrón ( $u_{l_b}$ ):

$$u(l_b) = \frac{U}{k}$$

b) Incertidumbre debida al coeficiente de expansión térmica ( $u_{\alpha}$ ):

$$u(\alpha) = \frac{(\alpha)(10\%)}{\sqrt{3}}$$

c) Incertidumbre debida a las diferencias de temperatura entre los sensores ( $u_{\Delta T}$ ):

$$u(\Delta T) = \frac{(T_{\text{sup}} - T_{\text{inf}})}{\sqrt{3}}$$

d) Incertidumbre debida a los errores aleatorios del comparador ( $u_{E_{al}}$ ):

$$u(E_{al}) = \sqrt{\left( \left( \frac{\text{Repetibilidad}}{2} \right)^2 + \left( \frac{\text{Reposicionamiento}}{2} \right)^2 + \left( \frac{\text{Linealidad}}{2} \right)^2 \right)}$$

e) Incertidumbre debida al error sistemático del comparador ( $u_{E_{sis}}$ ):

$$u(E_{sis}) = \frac{\text{Asimetría}}{\sqrt{3}}$$

Una vez que se han recopilado todos los datos se vacían en las hojas de cálculos diseñadas para este tipo de calibraciones y se estima la incertidumbre de la calibración de la variación de longitud.

Se realiza la estimación de incertidumbre auxiliándose de hojas de cálculo del software Excel.

Datos:

$$l_b = 100 \text{ mm}$$

$$Ul_b = 0,049 \text{ } \mu\text{m}$$

Coeficientes de sensibilidad de primer orden:

$$l_b \quad \text{Longitud del bloque: } 100 \text{ 000 } \mu\text{m}$$

$$\alpha \quad \text{Coeficiente de expansión térmica: } 1,15\text{E-}05^\circ\text{C}^{-1}$$

$$\Delta T \quad \text{Variación de temperatura (superior e inferior): } 0,01^\circ\text{C}$$

$$E_1 = \frac{\partial //}{\partial l_b} = \alpha \Delta T = 1,15 \times 10^{-6}^\circ\text{C}^{-1} \times 0,01^\circ\text{C} = 1,15 \times 10^{-7}$$

$$E_2 = \frac{\partial //}{\partial \alpha} = l_b \Delta T = 100 \text{ 000 } \mu\text{m} \times 0,01^\circ\text{C} = 1,00 \times 10^{+3} \mu\text{m}^\circ\text{C}$$

$$E_3 = \frac{\partial //}{\partial \Delta T} = l_b \Delta T = 100 \text{ 000 } \mu\text{m} \times 1,15 \times 10^{-6}^\circ\text{C}^{-1} = 1,15 \mu\text{m}^\circ\text{C}^{-1}$$

$$E_4 = \frac{\partial //}{\partial E_{al}} = 1$$

$$E_5 = \frac{\partial //}{\partial E_{sis}} = 1$$

Coeficientes de sensibilidad de segundo orden:

$$F_{12} = \frac{\partial E_1}{\partial \alpha} = \Delta T = 0,01^\circ\text{C}$$

$$F_{13} = \frac{\partial E_1}{\partial \Delta T} = \alpha = 1,15 \times 10^{-5}^\circ\text{C}^{-1}$$

$$F_{14} = \frac{\partial E_2}{\partial l_b} = \Delta T = 0,01^\circ\text{C}$$

$$F_{16} = \frac{\partial E_2}{\partial \Delta T} = l_b = 100\,000 \mu m$$

$$F_{17} = \frac{\partial E_2}{\partial l_b} = \alpha = 11,15 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$$

$$F_{18} = \frac{\partial E_2}{\partial \alpha} = l_b = 100\,000 \mu m$$

Estimación de las incertidumbres individuales:

- Incertidumbre heredada del patrón:

$$u_{l_b} = \frac{U}{k} = \frac{0,049 \mu m}{2} = 0,025 \mu m$$

- Incertidumbre por coeficiente de expansión térmica:

$$u_\alpha = \frac{\alpha \times 10\%}{\sqrt{3}} = \frac{(1,15 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}) \times 10\%}{\sqrt{3}} = 6,64 \times 10^{-7} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$$

- Incertidumbre por diferencias de temperatura:

$$u_{\Delta T} = \frac{\Delta T}{\sqrt{3}} = \frac{0,01 \text{ } ^\circ\text{C}}{\sqrt{3}} = 0,0057 \text{ } ^\circ\text{C}$$

- Incertidumbre por errores aleatorios del comparador:

$$u_{E_{al}} = \sqrt{\left(\frac{\text{Repetibilidad}}{2}\right)^2 + \left(\frac{\text{Reposicionamiento}}{2}\right)^2 + \left(\frac{\text{Linealidad}}{2}\right)^2}$$

$$u_{E_{al}} = \sqrt{\left(\frac{0,001}{2}\right)^2 + \left(\frac{0,001}{2}\right)^2 + \left(\frac{0,002}{2}\right)^2}$$

$$u_{E_{al}} = 0,0012 \mu m$$

- Incertidumbre por errores sistemáticos del comparador:

$$u_b = \frac{\text{Asimetría}}{k} = \frac{0,001\mu\text{m}}{2} = 0,0005\mu\text{m}$$

Determinación de la incertidumbre estándar combinada  $u_c$ :

$$u_c^2(y) = (1,15 \times 10^{-7})^2 (0,025\mu\text{m})^2 + (1 \times 10^3 \mu\text{m}^\circ\text{C})^2 (6,64 \times 10^{-7} \circ\text{C}^{-1})^2 + (1,15\mu\text{m}^\circ\text{C}^{-1})^2 (0,0057^\circ\text{C})^2 + (1)^2 (0,0012\mu\text{m})^2 + (1)^2 (0,0005\mu\text{m})^2 +$$

$$\left[ \frac{1}{2} [(0,01^\circ\text{C})^2 (0,025\mu\text{m})^2 (6,64 \times 10^{-7} \circ\text{C}^{-1})^2] + \frac{1}{2} [(1,15 \times 10^{-5} \circ\text{C}^{-1})^2 (0,025\mu\text{m})^2 (0,0057^\circ\text{C})^2] + \frac{1}{2} [(0,01^\circ\text{C})^2 (6,64 \times 10^{-7} \circ\text{C}^{-1})^2 (0,025\mu\text{m})^2] + \right.$$

$$\left. \frac{1}{2} [(100000\mu\text{m})^2 (6,64 \times 10^{-7} \circ\text{C}^{-1})^2 (0,0057^\circ\text{C})^2] + \frac{1}{2} [(1,15 \times 10^{-5} \circ\text{C}^{-1})^2 (0,0057^\circ\text{C})^2 (0,025\mu\text{m})^2] + \right.$$

$$\left. \frac{1}{2} [(100000\mu\text{m})^2 (0,0057^\circ\text{C})^2 (6,64 \times 10^{-7} \circ\text{C}^{-1})^2] \right]$$

$$u_c^2(y) = 4,6 \times 10^{-5} \mu\text{m}$$

$$u_c = \sqrt{4,6 \times 10^{-5} \mu\text{m}}$$

$$u_c = 0,0068\mu\text{m}$$

$$U = (u_c)(k)$$

$$U = \pm 0,014 \mu\text{m}$$

Longitud nominal; $l_n$ (mm)			
	Grado 0	Grado 1	Grado 2
$0,5 \leq l_n \leq 10$	0,10	0,16	0,30
$10 \leq l_n \leq 25$	0,10	0,16	0,30
$25 \leq l_n \leq 50$	0,10	0,18	0,30
$50 \leq l_n \leq 75$	0,12	0,18	0,35
$75 \leq l_n \leq 100$	0,12	0,20	0,35

**Tabla 14: Tolerancias para variación en longitud (tv).**

Como en la calibración de la longitud central para la calibración de la variación en longitud se exige también que la incertidumbre de medición sea igual o menor a 1/3 del error máximo tolerado de la variación en longitud.

Longitud nominal; $l_n$ (mm)	Tolerancia para la variación de longitud; $t_v$ ( $\mu\text{m}$ )		
	Grado 0	Grado 1	Grado 2
$0,5 \leq l_n \leq 10$	0,03	0,05	0,10
$10 \leq l_n \leq 25$	0,03	0,05	0,10
$25 \leq l_n \leq 50$	0,03	0,06	0,10
$50 \leq l_n \leq 75$	0,04	0,06	0,12
$75 \leq l_n \leq 100$	0,04	0,07	0,12

**Tabla 15: Tercio de las tolerancias para variación en longitud ( $t_v$ )**

Comparando la incertidumbre expandida obtenida ( $\pm 0,014 \mu\text{m}$ ) contra el límite máximo permitido para la variación de longitud (0,040) se observa que la incertidumbre es menor cumpliendo así con el criterio de 1/3.

Bajo estas consideraciones se hace el estudio de temperatura  $\Delta T$  para obtener la variación máxima de la misma que puede aceptarse para lograr el tercio del error máximo permitido para la variación en longitud considerando el valor nominal del bloque patrón.

Grado 0			
Longitud (mm)	Variación de temperatura $\Delta T$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	Incertidumbre expandida ( $\pm \mu\text{m}$ )	Tercio de la tolerancia de variación de longitud $t_v$ Considerado como límite ( $\mu\text{m}$ )
10	0,22	0,03	0,03
25	0,09	0,03	0,03
50	0,45	0,03	0,03
75	0,04	0,04	0,04
100	0,03	0,04	0,04

**Tabla 16: Variaciones máximas de temperatura para obtener el tercio de la tolerancia de variación de longitud.**

#### 4. DESARROLLO FUTURO.

Los bloques patrón que abarca esta tesis tienen longitudes nominales hasta 100 mm (4 pulg. en sistema inglés). Sin embargo los bloques que se calibran en CIDESI llegan hasta 500 mm (20 pulg. en sistema inglés). Esta metodología en este trabajo descrita fue desarrollada en su totalidad considerando bloques hasta 100 mm.

Un trabajo a futuro mediano es el desarrollo de la metodología para bloques mayores a 100 mm hasta 500 mm conocidos como “bloques barra larga”.

Generalmente el juego de bloques patrón se compone de 8 piezas con valores nominales de 125 mm, 150 mm, 175 mm, 200 mm, 250 mm, 300 mm, 400 mm, 500 mm, según la norma NXM-CH-3650-IMNC y su equivalente en sistema inglés 5 pulg., 6 pulg., 7 pulg., 8 pulg., 10 pulg., 12 pulg., 16 pulg., 20 pulg. según la norma ASME B89.1.9. El laboratorio actualmente cuenta con este servicio de calibración acreditado bajo la norma NMX-CH-17025-IMNC por la ema.

Nuestros patrones para este tipo de servicio son bloques patrón de grado “0”, y una máquina unidimensional con resolución de visualización de 0,01  $\mu\text{m}$  con alcance de medida de 600 mm. A su vez la máquina unidimensional cuenta con tres sensores de contacto para censar la temperatura, cada uno de ellos con resolución de 0,01  $^{\circ}\text{C}$ .

Para la calibración de estos patrones el método sugiere que la colocación de los bloques patrón sea en posición horizontal cuidando que los apoyos sean en los puntos “Airy” estos se encuentran grabados directamente en el bloque patrón.



**Figura 29. Sistema para calibración de bloques mayores a 100 mm.**

Se tiene como objetivo lograr controlar las condiciones ambientales para el correcto desarrollo de este método de calibración para, de esta forma, alcanzar incertidumbres de medida  $\leq 1/3$  de la tolerancia del grado de exactitud en la desviación límite de longitud en cualquier punto desde la longitud nominal “te” y en la variación de longitud “tv” según norma NXM-CH-3650-IMNC, mismas que se muestran en la siguiente tabla de tolerancias y la equivalencia a un 1/3.

Longitud nominal; ln	Grado 0		Grado 1		Grado 2	
	Desviación límite de longitud en cualquier punto desde la longitud nominal	Tolerancia para la variación de longitud	Desviación límite de longitud en cualquier punto desde la longitud nominal	Tolerancia para la variación de longitud	Desviación límite de longitud en cualquier punto desde la longitud nominal	Tolerancia para la variación de longitud
(mm)	$\pm te$ ( $\mu\text{m}$ )	tv ( $\mu\text{m}$ )	$\pm te$ ( $\mu\text{m}$ )	tv ( $\mu\text{m}$ )	$\pm te$ ( $\mu\text{m}$ )	tv ( $\mu\text{m}$ )
$100 \leq ln \leq 150$	0,40	0,14	0,80	0,20	1,60	0,40
$150 \leq ln \leq 200$	0,50	0,16	1,00	0,25	2,00	0,40
$200 \leq ln \leq 250$	0,60	0,16	1,20	0,25	2,40	0,45
$250 \leq ln \leq 300$	0,70	0,18	1,40	0,25	2,80	0,50
$300 \leq ln \leq 400$	0,90	0,20	1,80	0,30	3,60	0,50
$400 \leq ln \leq 500$	1,10	0,25	2,20	0,35	4,40	0,60

**Tabla 17: Tabla de desviaciones límites de longitud y tolerancias para las variaciones de longitud.**

Longitud nominal; ln	Grado 0		Grado 1		Grado 2	
	1/3 de la desviación límite de longitud en cualquier punto desde la longitud nominal	1/3 de la tolerancia para la variación de longitud	1/3 de la desviación límite de longitud en cualquier punto desde la longitud nominal	1/3 de la tolerancia para la variación de longitud	1/3 de la desviación límite de longitud en cualquier punto desde la longitud nominal	1/3 de la tolerancia para la variación de longitud
(mm)	$\pm te$ ( $\mu\text{m}$ )	tv ( $\mu\text{m}$ )	$\pm te$ ( $\mu\text{m}$ )	tv ( $\mu\text{m}$ )	$\pm te$ ( $\mu\text{m}$ )	tv ( $\mu\text{m}$ )
$100 \leq ln \leq 150$	0,13	0,05	0,27	0,07	0,53	0,13
$150 \leq ln \leq 200$	0,17	0,05	0,33	0,08	0,67	0,13
$200 \leq ln \leq 250$	0,20	0,05	0,40	0,08	0,80	0,15
$250 \leq ln \leq 300$	0,23	0,06	0,47	0,08	0,93	0,17
$300 \leq ln \leq 400$	0,30	0,07	0,60	0,10	1,20	0,17
$400 \leq ln \leq 500$	0,37	0,08	0,73	0,12	1,47	0,20

**Tabla 18: Tabla de 1/3 desviaciones límites de longitud y 1/3 tolerancias para las variaciones de longitud.**

## 5. CONCLUSIONES.

1. Se estableció en el procedimiento de calibración del laboratorio el requisito de temperatura que se deberá cumplir en todas las calibraciones de bloques patrón, en dependencia de la clase de exactitud, para garantizar la calidad de las mismas.

2. Al analizar la no linealidad corroboramos que es imprescindible incluir términos de orden mayor en la serie de Taylor para la expresión de la incertidumbre.

3. Queda demostrado que la variable temperatura aporta hasta los términos de segundo orden en la serie de Taylor.

4. Se corroboran las capacidades de calibración que el laboratorio obtiene en condiciones cotidianas de trabajo.

5. Los estudios de variaciones de temperaturas en los diferentes bloques patrón, nos demostraron que las condiciones ambientales son perfectamente obtenibles y pueden ser reproducidas por el laboratorio.

6. La introducción de ayudas visuales en las hojas de cálculo previene al especialista cuando las diferencias de temperatura sobrepasan los límites establecidos y garantizan que los niveles de incertidumbre sean los adecuados para discriminar los grados de exactitud de los bloques.

## 6. BIBLIOGRAFÍA.

### LIBROS:

- [1] Ramón Zeleny, Carlos Gonzalez (1999). Metrología Dimensional México. Ed. MC GRAM HILL.

### NORMAS:

- [1] NMX-CH-3650-IMNC-2004 “Especificaciones geométricas de producto (EGP) – Patrones de longitud – Bloques patrón”
- [2] ASME B89.1.9-2002. “Gage blocks”, Reaffirmed 2007
- [3] NMX-CH-140-IMNC-2002 “Guía para la expresión de incertidumbre en las mediciones”.
- [4] Guía técnica de trazabilidad metrológica e incertidumbre de medida en Metrología Dimensional. ema-cenam, diciembre 2013.
- [5] Guía para estimar la incertidumbre de la medición 2000
- [6] Certificados de inspección de los fabricantes de bloques patrón.
- [7] NMX-CH-100-IMNC-2005 “Especificaciones geométrica de producto (GPS) – Temperatura de referencia normalizada para especificaciones y verificaciones geométricas de los productos. (esta norma mexicana concuerda totalmente con la norma internacional ISO 1: 2002 “Geometrical Product Specification” (GPS) Standard reference temperature for geometrical product specification and verification”

### ARTÍCULOS:

- [1] Carlos Colín Castellanos, Dr. Miguel Viliesid Alonso, Juan Carlos Zárraga Torres, Trinidad Chávez Rodríguez, “Informe del ensayo de aptitud en la calibración de bloques patrón por comparación mecánica: EMA-CENAM-DIM-02, pág. 13, 2010”.

## ANEXO A

### EXTRACTO DE LA NORMA NMX-CH-3650-IMNC-2004. PATRONES DE LONGITUD – BLOQUES PATRÓN. ESPECIFICACIONES GEOMÉTRICAS DE PRODUCTO (EGP)- : DEFINICIONES, CLASIFICACIÓN DE GRADOS Y TOLERANCIAS

Esta norma es el documento oficial para los bloques patrón, se extraen definiciones y criterios de interés a esta investigación.

#### DEFINICIONES BÁSICAS:

##### 3.1 BLOQUE PATRÓN:

Medida materializada de sección rectangular, hecha de material resistente al desgaste, con un par de superficies de medición planas, paralelas entre sí, las cuales pueden ser adheridas a las superficies de medición de otros bloques patrón para hacer ensambles compuestos, o a superficies de platinas auxiliares de acabado similar para mediciones de longitud.

##### 3.2 LONGITUD DE UN BLOQUE PATRÓN: $l$

Distancia perpendicular entre cualquier punto particular de la superficie de medición y la superficie platina auxiliar del mismo material y acabado superficial, sobre la cual la otra superficie de medición ha sido adherida.

##### 3.3 LONGITUD CENTRAL DE UN BLOQUE PATRÓN $l_c$ .

Longitud de un bloque patrón tomada en el punto central de la superficie de medición libre.

##### 3.4 DESVIACIÓN DE LONGITUD EN CUALQUIER PUNTO DESDE LA LONGITUD NOMINAL

Diferencia algebraica  $l-l_n$

### 3.5 DESVIACIÓN DE PLANITUD $fd$ :

Es la distancia mínima entre dos planos paralelos entre los cuales se encuentran todos los puntos de la superficie de medición.

### 3.6 VARIACIÓN DE LONGITUD $v$ :

Diferencia entre la longitud máxima  $l_{máx}$  y la longitud mínima  $l_{mín}$

### 3.7 ADHERENCIA:

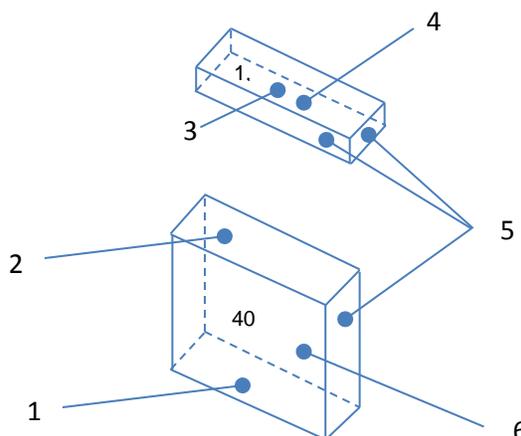
Es la propiedad de las superficies de medición de los bloques patrón que les permite adherirse a otras superficies de medición con planitud y acabado superficial similar, como resultado de las fuerzas moleculares.

## 4 NOMENCLATURA DE LAS SUPERFICIES

Para longitudes nominales  $l_n < 6$  mm

Para longitudes nominales  $l_n = 6$  mm

- 1) Superficie de medición izquierda.
- 2) Superficie de medición derecha.
- 3) Superficie de medición sin marcas.
- 4) Superficie de medición marcada.
- 5) Superficies laterales.
- 6) Superficie lateral marcada.



## 5. TRAZABILIDAD DE LA LONGITUD DE UN BLOQUE PATRÓN.

La longitud medida de un bloque patrón es trazable a patrones nacionales o internacionales de longitud, si el resultado de la medición puede ser relacionado mediante una cadena ininterrumpida de mediciones por comparación, cada una con incertidumbres establecidas, aun bloque patrón que ha sido calibrado mediante interferometría usando las longitudes de onda normalizadas apropiadas.

## 6. TEMPERATURA DE REFERENCIA Y PRESIÓN NORMAL:

La longitud nominal y las longitudes medidas de un bloque patrón aplican a la temperatura de referencia de 20°C y la presión normal 101 325 Pa = 1,01325 bar.

Nota: El efecto sobre la longitud de un bloque patrón causado por desviaciones de la presión normal puede ser ignorado bajo condiciones atmosféricas normales.

## 7. ORIENTACIÓN DE REFERENCIA DE BLOQUES PATRÓN.

La longitud de un bloque patrón hasta e incluyendo 100 mm de longitud nominal se refiere a la orientación vertical con las superficies de medición horizontales.

La longitud de un bloque patrón mayor de 100 mm en longitud nominal, se refiere a la orientación horizontal con el bloque soportado sobre una de las superficies laterales angostas, sin esfuerzo adicional, mediante soportes adecuados cada uno a una distancia de 0,211 veces la longitud nominal desde los extremos. Cuando tal bloque patrón es medido por la interferometría en la orientación horizontal, el peso de la platina auxiliar adherida a una de las superficies de medición deberá ser compensado.

## 8. PROPIEDADES DEL MATERIAL.

### 8.1. MATERIAL.

Los bloques patrón deben ser fabricados de acero de alto grado o de otro material similarmente resistente al desgaste capaz de lograr un acabado de sus superficies para que se adhiera fácilmente y los cuales deberán ser estables en longitud dentro de las tolerancias mostradas en la tabla 2.

Grado	Máximo cambio permisible en longitud por año
K 0	$\pm(0,02\mu\text{m} + 0,25 \times 10^{-6} \times l_n)$
1	$\pm(0,05\mu\text{m} + 0,5 \times 10^{-6} \times l_n)$

2	
	Nota: $l_n$ es expresada en mm

**Tabla A1: Estabilidad dimensional.**

## 8.2. COEFICIENTES DE EXPANSIÓN TÉRMICA.

El coeficiente de expansión térmica de bloques patrón de acero en el intervalo de temperatura de 10°C a 30°C deberá ser  $(11,5 \pm 1,0) \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ .

El coeficiente de expansión con su incertidumbre estimada deberá ser suministrado con bloques patrón de acero grado K y también para todos los bloques patrón, de todos los grados fabricados de diferentes materiales al acero endurecido.

## 8.3. MARCADO.

Cada bloque patrón deberá estar marcado permanentemente con su longitud nominal en mm y deberá ser permanente e individualmente identificable en caracteres no menores a 1,5 mm de alto. Los bloques patrón menores a 6 mm de longitud nominal pueden estar marcados sobre una superficie de medición, pero deberá dejarse libre de cualquier marcado un área de 9 mm x 12 mm en el centro de la superficie de medición y una área de 2,5 mm x 25 mm en cada una de las 4 esquinas.

Si el grado es indicado en el bloque patrón, se utilizarán las siguientes marcas.

Grado calibración K:

Grado 0: 0

Grado 1: -

Grado 2: =

**Desviación límite,  $t_e$ , de la longitud en cualquier punto de la superficie de medición desde la longitud nominal y tolerancia,  $t_v$ , para la variación de longitud.**

Longitud nominal $l_n$  (mm)	Grado calibración K		Grado 0		Grado 1		Grado 2	
	Desviación límite de longitud en cualquier punto desde la longitud nominal $\pm te$ ( $\mu\text{m}$ )	Tolerancia para la variación de longitud $tv$ ( $\mu\text{m}$ )	Desviación límite de longitud en cualquier punto desde la longitud nominal $\pm te$ ( $\mu\text{m}$ )	Tolerancia para la variación de longitud $tv$ ( $\mu\text{m}$ )	Desviación límite de longitud en cualquier punto desde la longitud nominal $\pm te$ ( $\mu\text{m}$ )	Tolerancia para la variación de longitud $tv$ ( $\mu\text{m}$ )	Desviación límite de longitud en cualquier punto desde la longitud nominal $\pm te$ ( $\mu\text{m}$ )	Tolerancia para la variación de longitud $tv$ ( $\mu\text{m}$ )
$0,5 \leq l_n \leq 10$	$\pm 0,20$	0,05	$\pm 0,12$	0,10	$\pm 0,20$	0,16	$\pm 0,45$	0,30
$10 \leq l_n \leq 25$	$\pm 0,30$	0,05	$\pm 0,14$	0,10	$\pm 0,30$	0,16	$\pm 0,60$	0,30
$25 \leq l_n \leq 50$	$\pm 0,40$	0,06	$\pm 0,20$	0,10	$\pm 0,40$	0,18	$\pm 0,80$	0,30
$50 \leq l_n \leq 75$	$\pm 0,50$	0,06	$\pm 0,25$	0,12	$\pm 0,50$	0,18	$\pm 1,00$	0,35
$75 \leq l_n \leq 100$	$\pm 0,60$	0,07	$\pm 0,30$	0,12	$\pm 0,60$	0,20	$\pm 1,20$	0,35
$100 \leq l_n \leq 150$	$\pm 0,80$	0,08	$\pm 0,40$	0,14	$\pm 0,80$	0,20	$\pm 1,60$	0,40
$150 \leq l_n \leq 200$	$\pm 1,00$	0,09	$\pm 0,50$	0,16	$\pm 1,00$	0,25	$\pm 2,00$	0,40
$200 \leq l_n \leq 250$	$\pm 1,20$	0,10	$\pm 0,60$	0,16	$\pm 1,20$	0,25	$\pm 2,40$	0,45
$250 \leq l_n \leq 300$	$\pm 1,40$	0,10	$\pm 0,70$	0,18	$\pm 1,40$	0,25	$\pm 2,80$	0,50
$300 \leq l_n \leq 400$	$\pm 1,80$	0,12	$\pm 0,90$	0,20	$\pm 1,80$	0,30	$\pm 3,60$	0,50
$400 \leq l_n \leq 500$	$\pm 2,20$	0,14	$\pm 1,10$	0,25	$\pm 2,20$	0,35	$\pm 4,40$	0,60
$500 \leq l_n \leq 600$	$\pm 2,60$	0,16	$\pm 1,30$	0,25	$\pm 2,60$	0,40	$\pm 5,00$	0,70
$600 \leq l_n \leq 700$	$\pm 3,00$	0,18	$\pm 1,50$	0,30	$\pm 3,00$	0,45	$\pm 6,00$	0,70
$700 \leq l_n \leq 800$	$\pm 3,40$	0,20	$\pm 1,70$	0,30	$\pm 3,40$	0,50	$\pm 6,50$	0,80
$800 \leq l_n \leq 900$	$\pm 3,80$	0,20	$\pm 1,90$	0,35	$\pm 3,80$	0,50	$\pm 7,50$	0,90
$900 \leq l_n \leq 1\ 000$	$\pm 4,20$	0,25	$\pm 2,00$	0,40	$\pm 4,20$	0,60	$\pm 8,00$	1,00

**Tabla A2: Desviación límite  $te$ , de la longitud en cualquier punto de la superficie de medición desde la longitud nominal y tolerancia,  $tv$ , para la variación de longitud.**

## 8.4. MEDICIÓN POR COMPARACIÓN

### 8.4.1. PRINCIPIO DE MEDICIÓN.

Con el propósito de determinar la longitud de un bloque patrón por comparación, la diferencia de su longitud central con respecto a la del bloque patrón de referencia es medida y aplicada algebraicamente a la longitud de referencia para el palpado, las superficies de medición de cada bloque son tocadas desde direcciones opuestas.

### 8.4.2. LONGITUD CENTRAL.

Una medición por comparación transfiere la longitud central de un bloque patrón de referencia a un bloque patrón bajo prueba. El bloque patrón de referencia

puede haber sido medido directamente por interferometría o relacionado a través de una o varias etapas por comparación a un patrón de referencia medido por interferometría.

### **8.4.3. MÉTODO PARA DETERMINAR LA LONGITUD POR COMPARACIÓN.**

La relativamente pequeña diferencia en longitud central entre un bloque patrón de referencia de longitud central conocida y otro patrón de longitud central desconocida es medida mediante un indicador de longitud de alta resolución.

### **8.4.4. VARIACIÓN EN LONGITUD.**

La medición por comparación puede ser usada para explorar la variación de longitud. Las variaciones entre lecturas en el centro y en las cuatro esquinas de la superficie de medición aproximadamente 1,5 mm desde las superficies laterales pueden ser consideradas como representativas para determinar la variación de longitud. Si se usan puntos representativos diferentes a los cercanos a las esquinas de las superficies de medición para la determinación de la variación en longitud, su posición deberá ser descrita.

### **8.4.5. CORRECCIONES.**

Cuando se calcule el resultado de comparación para la longitud de bloques patrón, hecha de acuerdo con 8.4.2 deben hacerse las siguientes correcciones.

- Desviación del equipo de medición
- Influencia de temperaturas diferentes de 20°C y diferentes coeficientes de expansión térmica de los dos bloques patrón bajo comparación.

Influencia de diferentes deformaciones en los contactos de los palpadores con las superficies de medición de los dos bloques patrón fabricados de diferentes materiales.

#### **8.4.6. CERTIFICADO O INFORME DE CALIBRACIÓN.**

El certificado o informe de calibración deberá contener los resultados de la medición, en particular la longitud central  $l_c$ , o la desviación de la longitud central respecto de la nominal  $l_c - l_n$ , las incertidumbres estimadas y un enunciado de trazabilidad.

El certificado o informe de calibración deberá también contener el coeficiente de expansión térmica del bloque patrón usado para hacer la corrección de acuerdo con 8.4.5.

## ANEXO B

### TABLA DE COEFICIENTES DE EXPANSIÓN TÉRMICA.

Marca del bloque patrón	Material	Coefficiente de expansión térmica $\times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$
OPUS	Acero	$11,0 \pm 1,0$
	Cerámica	9,7
	Carburo de Tungsteno	4,23
Mitutoyo	Acero	11,5 (hasta 1994) $10,9 \pm 1,0$ (de 1995 hasta 2004) $10,8 \pm 0,5$ (de 2005 a la fecha)
	Cerámica	$10,0 \pm 1,0$ (hasta 1994) $9,3 \pm 1,0$ (de 1995 hasta 2004) $9,3 \pm 0,5$ (de 2005 a la fecha)
	Carburo de Tungsteno	$5,5 \pm 1,0$
TESA	Acero	$11,5 \pm 1,0$
	Cerámica	$9,7 \pm 0,8$
	Carburo de Tungsteno	$4,23 \pm 0,1$
MAHR	Acero	11,5
	Cerámica Circomar	9,5
Fowler	Acero	11,5
	Carburo de Tungsteno	4,23
Starrett Webber	Acero	11,5
	Cerámica	9,9
	Carburo de cromo	8,5
	Carburo de Tungsteno	8,3 a 8,6
KOBA	Acero	$11,9 \pm 1,0$
	Cerámica	$10,0 \pm 1,0$
	Carburo de Tungsteno	4,5

### ANEXO C

#### COMPORTAMIENTO DE TEMPERATURAS DENTRO DE LA CABINA PARA CALIBRACIÓN DE BLOQUES PATRÓN.

Hora	Temperatura dentro de la cabina °C	Diferencia de temperatura entre la cabina y 20 °C	Temperatura del patrón °C	Temperatura del IBC (bloque a calibrar)	Diferencia entre patrón e IBC ( $\delta\theta$ )
8:00	19,220	0,780	19,251	19,274	0,023
8:30	19,554	0,446	19,562	19,583	0,021
9:00	19,814	0,186	19,813	19,835	0,022
9:30	19,886	0,114	19,897	19,872	0,025
10:00	20,007	0,007	19,998	19,986	0,012
10:30	20,010	0,010	20,008	20,012	0,004
11:00	20,015	0,015	20,012	20,035	0,023
11:30	20,022	0,022	20,025	20,047	0,022
12:00	20,025	0,025	20,027	20,041	0,014
12:30	20,028	0,028	20,030	20,043	0,013
13:00	20,035	0,035	20,038	20,022	0,016
13:30	20,044	0,044	20,047	20,038	0,009
14:00	20,040	0,040	20,042	20,039	0,003
14:30	20,035	0,035	20,040	20,031	0,009
15:00	20,027	0,027	20,030	20,042	0,012
15:30	20,050	0,050	20,055	20,077	0,022
16:00	20,087	0,087	20,080	20,097	0,017
16:30	20,102	0,102	20,097	20,105	0,008
17:00	20,088	0,088	20,092	20,102	0,010

## ANEXO D

### LISTA DE ACRÓNIMOS Y SÍMBOLOS

#### ACRÓNIMOS

NMX-	Norma mexicana.
IMNC	Instituto mexicano de normalización y certificación.
ema	Entidad mexicana de acreditación, a. c.
CENAM	Centro Nacional de Metrología.
CIDESI	Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial.
CONACYT	Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología.
NIST	National Institute of Standards and Technology. (Centro Nacional de Metrología de Estados Unidos de Norteamérica).
PTB	Physikalisch-Technische Bundesanstalt. (Centro Nacional de Metrología de Alemania).
INMETRO	Instituto Nacional de Metrología, Qualidade e Tecnología. (Centro Nacional de Metrología del Brasil).
lbc ó IBC	Instrumento bajo calibración o ítem de medición.
EMT	Error máximo tolerado (permisible).

#### SIMBOLOGÍA

$u$	Incertidumbre estándar, parcial o individual.
$u_c$	Incertidumbre estándar combinada.
$U$	Incertidumbre expandida.

Micrómetro.- Es la unidad de longitud que equivale a una millonésima parte del metro ( $1 \times 10^{-6}$  m).

Nanómetro.- es la unidad de longitud que equivale a una mil millonésima parte del metro ( $1 \times 10^{-9}$  m).