

TRAZABILIDAD DE LA MAGNITUD LONGITUD EN CHILE

Ignacio Lira y Roberto Morales
Area de Metrología de DICTUC S.A., Pontificia Universidad Católica de Chile
Vicuña Mackenna 4860, Santiago, Chile
Teléfono-fax: +56 2 686 5889 email: ilira@ing.puc.cl

Resumen: En este trabajo se describe someramente la estructura general del sistema metrológico oficial vigente en Chile, y en particular, la situación de la magnitud longitud. Más adelante se presenta el procedimiento para la calibración de bloques patrón en el Laboratorio Nacional de Longitud, con énfasis en el cálculo de incertidumbre.

INTRODUCCIÓN

Hasta hace poco tiempo la metrología en Chile se desarrolló por iniciativa de algunos usuarios individuales, principalmente empresas y laboratorios de certificación de calidad, sin que existiera un organismo central que coordinara ni orientara estas actividades. Sin embargo, el notable incremento del comercio internacional que ha tenido lugar en los últimos años, regulado por guías y normas donde se alude específicamente al necesario control de los equipos e instrumentos de medición empleados en la producción y el comercio, ha hecho indispensable que el País cuente con una infraestructura metrológica destinada a asegurar la exactitud y confiabilidad de los mismos. En la construcción de dicha infraestructura han participado en forma conjunta el Estado y particulares, con la colaboración del Ministerio de Cooperación del Gobierno Alemán, según el modelo de **Red Nacional de Metrología (RNM)** que se describe en primer lugar. En seguida se detalla el enfoque adoptado para asegurar la trazabilidad de la magnitud longitud en el primer eslabón de la cadena de calibraciones efectuadas dentro del País.

LA METROLOGÍA EN CHILE

La infraestructura metrológica de muchos países descansa en un laboratorio central, llamado genéricamente **Instituto Nacional de Metrología (INM)**, donde residen, reconocidas por una decisión oficial, las más elevadas capacidades de medición del país. Se entiende a éstas como aquellos patrones e instrumentos que se encuentran más cercanos a las definiciones de las unidades. Cada magnitud (presión, temperatura, masa, longitud, fuerza, etc.) está representada por un **patrón nacional**, utilizado como fuente del proceso de disseminación de unidades hacia las organizaciones productivas del país, para lo cual su trazabilidad debe quedar asegurada.

La dificultad de este esquema radica en el alto costo de un único INM. Como la provisión de fondos para estos fines resulta completamente incompatible con las políticas de reducción del tamaño del aparato fiscal vigentes en Chile desde hace ya varios años, se hizo necesario buscar una alternativa que permitiera conjugar las necesidades de la metrología con las fuentes posibles de financiamiento. Por ello, se pensó en aprovechar y fortalecer las potencialidades ya existentes en algunas instituciones nacionales, pero integradas en un sistema que trabaje en forma coordinada. Este sistema pasó a denominarse **Red Nacional de Metrología (RNM)**, pues está compuesto de un primer conjunto de los así llamados **Laboratorios Custodios de Patrones Nacionales (LCPN)** que otorgan trazabilidad a un segundo conjunto de **Laboratorios de Calibración (LC)**, más numerosos, destinados a disseminar las unidades a la industria nacional. La Fig. 1 ilustra en forma esquemática la configuración de la RNM.

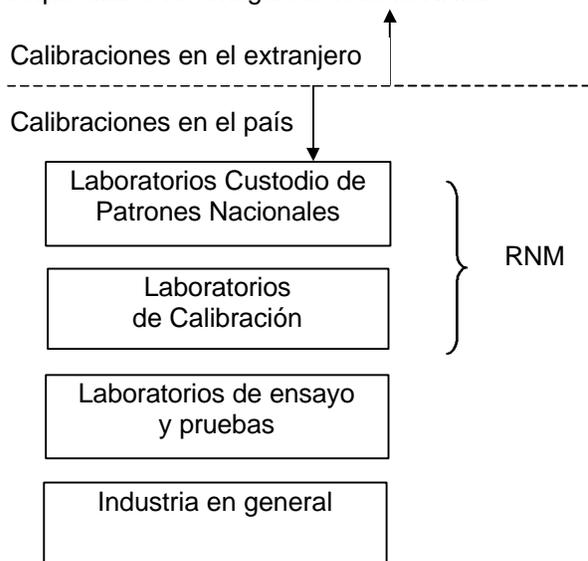


Fig. 1

En la actualidad los LCPN son los siguientes:

- **Longitud:** a cargo de DICTUC S.A., filial de la Pontificia Universidad Católica de Chile.
- **Masa y temperatura:** ambos operados por CESMEC: Centro de Estudios, Medición y Certificación de Calidad (empresa privada).
- **Fuerza:** ubicado en IDIC: Instituto de Investigaciones y Control del Ejército de Chile (abierto a la prestación de servicios para empresas civiles).
- **Presión:** a cargo de ENAER: Empresa Nacional de Aeronáutica.

Los LCPN obtuvieron su reconocimiento nacional por licitación pública ante CORFO (Corporación de Fomento de la Producción), organismo del Estado encargado de impulsar la actividad productiva nacional. El decreto correspondiente, firmado por el Presidente de la República, emanó del Ministerio de Economía, Fomento y Reconstrucción (MINECOM). Actualmente, estos laboratorios han sido acreditados por la recientemente formada División de Acreditación del Instituto Nacional de Normalización (INN). Además, con el objeto de asegurar su reconocimiento internacional, algunos de estos laboratorios han sido ya acreditados ante el Servicio Alemán de Acreditación (DKD) y el resto está en vías de lograrlo.

En la actualidad, la RNM opera según un reglamento establecido de común acuerdo entre todos los involucrados. La planificación, administración, control y supervisión de la Red está a cargo de la **Unidad de Coordinación y Supervisión (UCS)**, organismo que actúa como delegado de la autoridad nacional representada por el MINECOM. La UCS está radicada en la también recientemente creada División de Metrología del INN, de quien depende para su presupuesto operativo. El reglamento de la Red establece que la UCS es asesorada por un comité técnico especializado (CTM). El organigrama de la RNM se ilustra en la Fig. 2.

La puesta en marcha de la RNM se realizó con la importante colaboración de expertos del PTB de Alemania, a través de un convenio de colaboración que continúa vigente.

METROLOGÍA DE LONGITUD

El LCPN en la magnitud longitud (LCPN-L) está radicado en la empresa DICTUC S.A. (www.dictuc.cl). Esta empresa presta servicios a través de 11 divisiones, una de las cuales es la de Ingeniería Mecánica y Metalúrgica. De ella depende el Área de Metrología, que está compuesta del referido LCPN y de un LC. Este último presta diversos servicios de calibración acreditados en longitud (calibradores Vernier, micrómetros, relojes comparadores, etc.) y más recientemente en par torsional (llaves de torque).

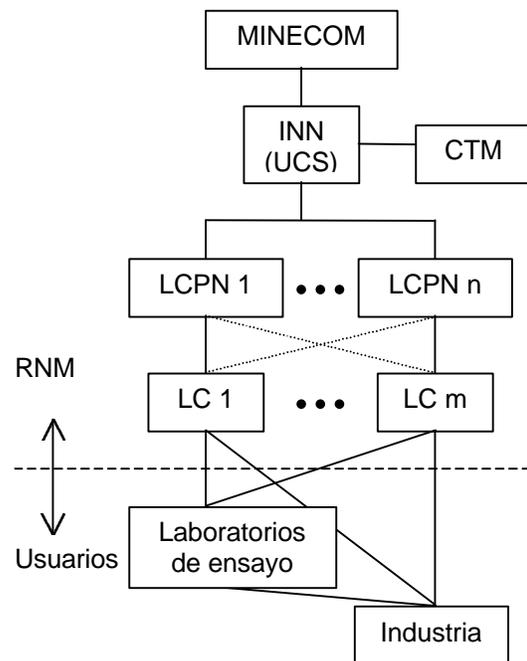


Fig. 2 Organigrama de la RNM. Actualmente $n=5$ y $m=20$

La trazabilidad de los LC en longitud está referida al LCPN-L. En él, el servicio principal consiste en la calibración de bloques patrón de acero por comparación mecánica. Se utiliza para ello un comparador de doble palpador con certificado de calibración vigente y un conjunto de bloques calibrados en el PTB por interferometría. El procedimiento de calibración que se describe a continuación fue empleado en la intercomparación internacional realizada en 2000 bajo el auspicio del Sistema Interamericano de Metrología (SIM) y cuyos resultados fueron analizados en el Congreso

Internacional de Metrología, METROCAL 2001, realizado en Abril de 2001 en Concepción (Chile) con la organización general de la Asociación Chilena de Metrología (CHILMET).

CALIBRACIÓN DE BLOQUES PATRÓN

La información generada durante la calibración se ingresa a un formulario de calibración (en adelante FC). Este formulario comprende tres partes: a) los datos que ingresará a mano el metrólogo; b) los resultados que produce el software del instrumento comparador y que son impresos por éste y c) los resultados que produce el programa desarrollado por el LCPN-L según el modelo de la sección 5.

La calibración se realiza a $(20 \pm 0,5)$ °C. Antes de la misma se procede a una inspección visual de los calibrandos para comprobar el estado de sus caras de medición. Se observa con especial cuidado la posible presencia de oxidación y de rayas superficiales.

La adherencia de las caras de medición se verifica pegándolas, con extremo cuidado, a un cristal plano óptico. Si la cara de medición se adhiere al cristal, se dice que la adherencia está *conforme*. De lo contrario, se dice que la adherencia está *no conforme*. Estos resultados son registrados en el FC e informados en el certificado de calibración.

Realizadas las verificaciones previas de los calibrandos, y habiendo determinado que estos son factibles de calibrar, los patrones y los calibrandos son puestos sobre una placa de acero rectificada al interior de la cúpula de protección del comparador, durante un tiempo mínimo de 8 horas.

Se ingresan todos los datos de la calibración al software del comparador según las instrucciones de su manual. Entre estos datos se cuenta la temperatura ambiente en la cúpula protectora. Sin embargo, para evitar que el instrumento realice correcciones por temperatura (por las razones que se explican en la Sec. 5) se le ingresa una temperatura ambiente igual a 20 °C.

Ingresados estos datos, el patrón y el calibrando se colocan sobre la plantilla de calibración del comparador. Si los bloques son de longitud nominal 10 mm o superior, se coloca un sensor de temperatura de contacto en cada bloque. Para bloques de menor longitud se coloca sólo un sensor en un bloque de 10 mm, el cual se pone junto a la

zona de calibración, en un área especialmente diseñada para esta función. De esta forma se tiene un valor confiable de la temperatura del calibrando y del patrón.

Posteriormente, y para todos los bloques, se espera un tiempo prudente de estabilización térmica. Al finalizar este tiempo, en el caso de calibrandos de longitud nominal 10 mm o superior, se registran ambas temperaturas de contacto en el FC. Para bloques con longitud nominal menor que 10 mm se registra la temperatura del bloque de 10 mm, según lo descrito en el párrafo anterior.

Se realizan 7 contactos siguiendo la secuencia de palpación indicada en la Fig. 3. En esta figura, los puntos 1 y 7 coinciden sobre el centro de las caras de medición del patrón; el punto 2 está en el centro de las caras de medición del calibrando y los puntos 3 al 6 están a aproximadamente 1,5 mm de las caras laterales del calibrando. Para cada par de bloques, la secuencia se repite:

- dos veces si las diferencias indicadas en cada punto no difieren en más de $0,02 \mu\text{m}$. Si las diferencias son menores de $0,02 \mu\text{m}$ el software entrega el valor mayor; de lo contrario entrega el promedio;
- tres veces si las diferencias entre las dos primeras series son mayores que $0,02 \mu\text{m}$. En este caso el software utiliza las dos series más parecidas y les aplica el tratamiento descrito en el pto. anterior.

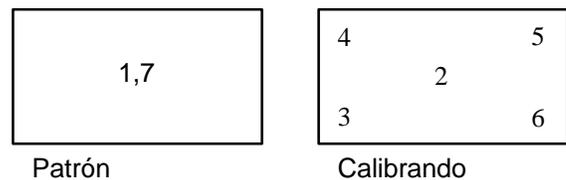


Fig. 3

El software del comparador entrega las diferencias entre las longitudes del calibrando en los puntos 2 al 6 y la longitud central del patrón. Estos valores, junto con la desviación central del patrón y las temperaturas del patrón y del calibrando, son ingresados al programa desarrollado por el LCPN-L. Este programa calcula la longitud central del calibrando a 20 °C con su respectiva incertidumbre. Los detalles del cálculo se explican a continuación.

EVALUACION DE LA INCERTIDUMBRE

El modelo que se presenta a continuación sigue las recomendaciones de la Ref. [1]. Se emplea la siguiente notación:

t_{ref} :	temperatura de referencia (20 °C)
t_{cal} :	temperatura del calibrando
t_{pat} :	temperatura del patrón
t_a :	temperatura ambiente en la cúpula
$l_{cal}(t_{ref})$:	longitud del calibrando a t_{ref}
$l_{pat}(t_{ref})$:	longitud del patrón a t_{ref}
$l_{cal}(t_{cal})$:	longitud del calibrando a t_{cal}
$l_{pat}(t_{pat})$:	longitud del patrón a t_{pat}
l_{cert} :	longitud en el certificado del patrón
l_n :	longitud nominal
l_c :	longitud central del calibrando
e_c :	desviación central del calibrando
l_{max} :	valor máximo de l_{cal}
l_{min} :	valor mínimo de l_{cal}
v :	variación de longitud ($l_{max} - l_{min}$)
f_o :	diferencia $l_{max} - l_c$
f_u :	diferencia $l_c - l_{min}$
q_{cal} :	diferencia algebraica $t_{cal} - t_{ref}$
q_{pat} :	diferencia algebraica $t_{pat} - t_{ref}$
q_a :	diferencia algebraica $t_a - t_{ref}$
d :	diferencia algebraica $l_{cal}(t_{cal}) - l_{pat}(t_{pat})$
l_{comp} :	lectura del comparador
a_{cal} :	coeficiente de expansión del calibrando
a_{pat} :	coeficiente de expansión del patrón
C_{sist} :	corrección por efect. sist. comparador
C_{sup} :	corrección por daños superficiales
C_{cent} :	corrección por ubicación punto central
C_{res} :	corrección por resolución del palpador
d_{der} :	deriva del patrón
C_{calib} :	corrección por efect. sist. sensor
C_{resol} :	corrección por resolución del sensor

Nota: la longitud del calibrando se entiende referida a cualquiera de los puntos 2 a 6 de la Fig. 3. La longitud del patrón se entiende siempre referida a su punto central (puntos 1 y 7 de la Fig. 3).

Del modelo

$$d = l_{cal}(t_{cal}) - l_{pat}(t_{pat}) \\ = l_{cal}(t_{ref}) [1 + a_{cal}q_{cal}] - l_{pat}(t_{ref}) [1 + a_{pat}q_{pat}]$$

se obtiene

$$l_{cal}(t_{ref}) = \{ d + l_{pat}(t_{ref}) [1 + a_{pat}q_{pat}] \} / [1 + a_{cal}q_{cal}]$$

Con coeficientes de sensibilidad $c[x] \equiv \partial l_{cal}(t_{ref}) / \partial x$

$$c[d] = 1 / [1 + a_{cal}q_{cal}] \\ c[l_{pat}(t_{ref})] = [1 + a_{pat}q_{pat}] / [1 + a_{cal}q_{cal}] \\ c[a_{pat}] = l_{pat}(t_{ref}) q_{pat} / [1 + a_{cal}q_{cal}] \\ c[q_{pat}] = l_{pat}(t_{ref}) a_{pat} / [1 + a_{cal}q_{cal}] \\ c[a_{cal}] = -q_{cal} \{ d + l_{pat}(t_{ref}) [1 + a_{pat}q_{pat}] \} / [1 + a_{cal}q_{cal}]^2 \\ c[q_{cal}] = -a_{cal} \{ d + l_{pat}(t_{ref}) [1 + a_{pat}q_{pat}] \} / [1 + a_{cal}q_{cal}]^2$$

la incertidumbre típica de $l_{cal}(t_{ref})$ queda

$$u^2[l_{cal}(t_{ref})] = c^2[d]u^2[d] + c^2[l_{pat}(t_{ref})]u^2[l_{pat}(t_{ref})] + \\ c^2[a_{pat}]u^2[a_{pat}] + c^2[q_{pat}]u^2[q_{pat}] + \\ c^2[a_{cal}]u^2[a_{cal}] + c^2[q_{cal}]u^2[q_{cal}]$$

Nota: Sólo existe correlación positiva entre las diferencias de temperatura q_{pat} y q_{cal} , las demás magnitudes de entrada son todas independientes. Como $c[q_{pat}]$ es positivo y $c[q_{cal}]$ es negativo, una correlación positiva entre q_{pat} y q_{cal} disminuirá la incertidumbre de l_{cal} . En consecuencia, en forma conservadora se toma un coeficiente de correlación entre q_{pat} y q_{cal} , igual a cero.

La lectura del comparador l_{comp} es igual a la diferencia d , no corregida. A esta diferencia es necesario sumar correcciones por efectos sistemáticos del comparador (C_{sist}), por daños imperceptibles en las cuatro superficies que entran en contacto con los palpadores (C_{sup}), por ubicación incorrecta del punto central del patrón (C_{cent}) y por resolución del comparador (C_{res}). En consecuencia, del modelo

$$d = l_{comp} + C_{sist} + C_{sup} + C_{cent} + C_{res}$$

se obtiene

$$u^2[d] = u^2[l_{comp}] + u^2[C_{sist}] + u^2[C_{sup}] + u^2[C_{cent}] + u^2[C_{res}]$$

Suponiendo que todas las correcciones son nulas, queda:

$$d = l_{comp}$$

donde el valor de l_{comp} se obtiene directamente del comparador.

La incertidumbre $u[l_{comp}]$ se debe a la repetitividad de las indicaciones. Se evalúa como la desviación estándar de una distribución rectangular de semiancho igual a 0,02 μm , que corresponde a la máxima diferencia aceptable entre mediciones sobre el mismo punto de los bloques. Por lo tanto:

$$u[l_{comp}] = 0,02 / \sqrt{3} \mu\text{m} = 11,5 \text{ nm}$$

Los efectos sistemáticos del comparador corresponden a no-linealidad de las indicaciones, histéresis, etc. Según el certificado de calibración del comparador, sus indicaciones no difieren en más de 0,02 μm del valor "correcto". Sin embargo, a dicho valor conviene sumar una diferencia adicional de 0,01 μm debido a la posible desalineación de los palpadores. Por lo tanto, para la incertidumbre de c_{sist} se usa una distribución rectangular de semiancho igual a 0,03 μm . Entonces:

$$u[c_{s comp}] = 0,03 / \sqrt{3} \mu\text{m} = 17,3 \text{ nm}$$

Los daños superficiales corresponden a ralladuras, indentaciones y otros defectos imperceptibles. Para la incertidumbre de c_{sup} se usa una distribución rectangular de ancho igual a 0,01 μm . Por lo tanto

$$u[c_{sup}] = 0,01 / \sqrt{12} \mu\text{m} = 2,9 \text{ nm}$$

Similares suposiciones son válidas para las correcciones por ubicación incorrecta del punto central del patrón (c_{cent}) y por resolución (c_{res}). Para esta última, el valor 0,01 μm corresponde a la resolución del comparador. Luego

$$u[c_{cent}] = u[c_{res}] = 0,01 / \sqrt{12} \mu\text{m} = 2,9 \text{ nm}$$

Queda entonces

$$u^2[d] = (0,02^2/3) \mu\text{m}^2 + (0,03^2/3) \mu\text{m}^2 + 3(0,01^2/12) \mu\text{m}^2 = 0,0004583 \mu\text{m}^2$$

Para $l_{pat}(t_{ref})$ se usa el modelo

$$l_{pat}(t_{ref}) = l_{cert} + d_{der}$$

donde l_{cert} es la longitud informada en el certificado de calibración del patrón y d_{der} es la variación de longitud por deriva del patrón, cuyo valor estimado es cero. Queda, en consecuencia,

$$l_{pat}(t_{ref}) = l_{cert}$$

y

$$u^2[l_{pat}(t_{ref})] = u^2[l_{cert}] + u^2[d_{der}]$$

La incertidumbre expandida de la longitud central del patrón, l_{cert} , con factor de cobertura $k = 2$, está dada en el certificado por la expresión

$$U^2[l_{pat cert}] = (0,02 \mu\text{m})^2 + (0,18 \times 10^{-6} l_n)^2$$

luego

$$u^2[l_{cert}] = [0,02^2 + (0,18 \times 10^{-6} l_n)^2] / 4 \mu\text{m}^2.$$

La incertidumbre de d_{der} se evalúa como la desviación estándar de una distribución rectangular de semiancho igual a la máxima variación permitida por año por la norma ISO 3650 [2] para la longitud del bloque, igual a 0,02 $\mu\text{m} + (0,25 \times 10^{-6} l_n)$. Luego

$$u^2[d_{der}] = [0,02 + (0,25 \times 10^{-6} l_n)]^2 / 3 \mu\text{m}^2$$

Queda entonces

$$u^2[l_{pat}(t_{ref})] = [0,02^2 + (0,18 \times 10^{-6} l_n)^2] / 4 \mu\text{m}^2 + [0,02 + (0,25 \times 10^{-6} l_n)]^2 / 3 \mu\text{m}^2$$

Nota: en esta expresión la longitud nominal l_n está expresada en mm.

Los valores de a_{pat} y a_{cal} se toman iguales a $10,9 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ para el acero con una incertidumbre obtenida de una distribución rectangular de ancho $4 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$. Luego

$$a_{pat} = a_{cal} = 10,9 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$$

$$u[a_{pat}] = u[a_{cal}] = 4 \times 10^{-6} / \sqrt{12} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$$

Los valores de q_{pat} y q_{cal} se obtienen de las indicaciones de los sensores del contacto. Para ambas diferencias se usa el modelo

$$q = t - t_{ref} + c_{calib} + c_{resol}$$

donde t es la indicación del sensor (t_{cal} o t_{pat} , según corresponda), c_{calib} es la corrección por calibración del equipo y c_{resol} es la corrección por resolución del mismo. El valor estimado de ambas correcciones es cero, quedando:

$$q = t - t_{ref}$$

con

$$u^2[q] = u^2[t] + u^2[c_{calib}] + u^2[c_{resol}]$$

La incertidumbre de t es debida a la repetitividad de las indicaciones, y puede suponerse igual a cero pues, debido a su inercia térmica, la temperatura del

bloque no registra oscilaciones durante la calibración. Por lo tanto:

$$u[f] = 0$$

Según el certificado de calibración del termómetro, la incertidumbre de las indicaciones es igual a

$$u[C_{\text{calib}}] = 0,025 \text{ } ^\circ\text{C}$$

La incertidumbre de c_{resol} se evalúa mediante una distribución rectangular de ancho igual a la resolución del termómetro, esto es, $0,01 \text{ } ^\circ\text{C}$. Por lo tanto

$$u[c_{\text{resol}}] = 0,01 / \sqrt{12} \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Queda entonces

$$u^2[q] = 0,025^2 \text{ } ^\circ\text{C}^2 + (0,01^2 / 12) \text{ } ^\circ\text{C}^2 \\ = 0,0006333 \text{ } ^\circ\text{C}^2$$

La desviación central, e_c , se obtiene como la diferencia entre la longitud central y la longitud nominal. Como esta última no tiene asociada una incertidumbre, la incertidumbre de la desviación central es igual a la incertidumbre de la longitud central.

La variación de longitud, v , se obtiene como la suma de las magnitudes $f_o = l_{\text{max}} - l_c$ y $f_u = l_c - l_{\text{min}}$, donde l_{max} y l_{min} corresponden a los valores máximo y mínimo de l_{cal} en cualquiera de los puntos 2 al 6 de la Fig. 3. En consecuencia, para $v = l_{\text{max}} - l_{\text{min}}$, $f_o = l_{\text{max}} - l_c$ y $f_u = l_c - l_{\text{min}}$, se usa el modelo

$$x = l_1 - l_2$$

donde x es igual a v , f_o o f_u ; y l_1 y l_2 son iguales a l_{max} , l_c o l_{min} .

En el modelo para x no es necesario realizar correcciones por temperatura, pues ésta afecta por igual a las magnitudes l_1 y l_2 . Por otra parte, la diferencia entre l_1 y l_2 se calcula restando las indicaciones del comparador l_{comp} en los puntos correspondientes. Dichas indicaciones son iguales a las diferencias $d = l_{\text{cal}}(t_{\text{cal}}) - l_{\text{pat}}(t_{\text{pat}})$. Por lo tanto, al hacer la diferencia $l_1 - l_2 = l_{\text{comp1}} - l_{\text{comp2}} = d_1 - d_2$ la longitud del patrón se cancela y su incertidumbre no es relevante. En consecuencia, suponiendo que d_1 y d_2 son independientes, queda:

$$u^2[x] = 2 u^2[d]$$

Finalmente, si bien los usuarios de todo certificado de calibración solamente emplearán la incertidumbre típica, la costumbre internacional es reportar la incertidumbre expandida. En este caso, la magnitud $l_{\text{cal}}(t_{\text{ref}})$ se determina sobre la base de un número suficientemente grande de magnitudes de entrada como para justificar la suposición de distribución de salida normal. En consecuencia, el factor de cobertura $k = 2$ es adecuado para establecer un intervalo con nivel de confianza cercano al 95 %.

CONCLUSIONES

En este trabajo se ha descrito en términos generales la organización de la metrología en Chile, basada sobre un sistema de Red compuesta por laboratorios independientes acreditados. Actualmente, este sistema permite otorgar trazabilidad al sistema S.I. en las magnitudes longitud, masa, temperatura, fuerza y presión. En longitud, la trazabilidad se logra mediante calibración de bloques patrón por comparación mecánica, según el procedimiento descrito más arriba. Parte importante de dicho procedimiento es el modelo desarrollado para la evaluación de la correspondiente incertidumbre.

REFERENCIAS

- [1] ISO Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement, BIPM, IEC, IFCC, IUPAC, IUPAP, OIML (1995).
- [2] ISO 3650 Geometrical Product Specifications (GPS) – Length Standards – Gauge Blocks, 1998.