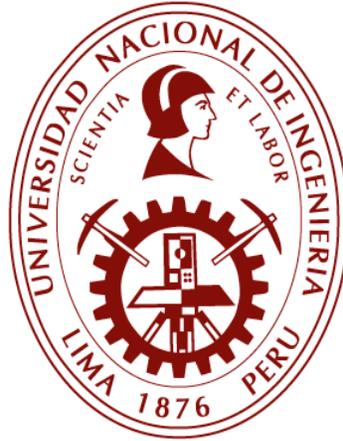


**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA**  
**FACULTAD DE CIENCIAS**



**TESIS**

“Desarrollo de un procedimiento de calibración de termómetros de indicación analógica de manera acreditada”

Para obtener el Título Profesional de:

**Ingeniero Físico**

Elaborado por

**Brian Juan Espejo Campos**

Asesor

**Mg. Clemente Luyo Caycho**

**Lima-Perú**

2022

## **Dedicatoria**

Este trabajo está dedicado a mis padres Edgar y Dora, a mis hermanos Jonathan y Kevin y a las personas que sin ser mi familia me han querido como tal.

## INDICE

<b>CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
1.1 Resumen y antecedentes.....	2
1.1.1 Resumen.....	2
1.1.2 Antecedentes.....	2
1.2 Problemática e Hipótesis .....	3
1.2.1 Problemática .....	3
1.2.2 Hipótesis General.....	3
1.2.3 Hipótesis General.....	3
1.3 Objetivos .....	4
1.3.1 Objetivo General.....	4
1.3.2 Objetivos Específicos .....	4
<b>CAPÍTULO 2. FUNDAMENTO TEÓRICO.....</b>	<b>6</b>
2.1. Temperatura.....	7
2.1.1 Definición .....	7
2.1.2. Escalas de temperatura.....	8

2.1.3. Escalas de temperatura internacional de 1990 (ITS-90).....	11
2.1.4. Termómetros.....	15
2.1.4.1 Termómetro de mercurio: .....	18
2.1.4.2 Pirómetros: .....	18
2.1.4.3 Termómetros de indicación analógica: .....	18
2.1.4.4 Termómetro de resistencia .....	20
2.1.5 Calibración de termómetros.....	21
2.1.5.1 Calibración por comparación en medios.....	21
2.1.5.2 Calibración por puntos fijos de la escala internacional de temperatura.....	22
2.1.6. Instrumentos para la calibración de termómetros por comparación directa.....	25
2.1.6.1 Medios Isotérmicos .....	25
2.1.6.2 Bloques secos o pozos.....	26
2.1.6.3 Baños líquidos.....	26
2.1.6.4 Termómetro de Resistencia de Platino.....	28
2.1.6.4.1 Conexionado de 2 hilos y 3 hilos .....	30
2.1.6.4.2 Conexionado de 4 hilos .....	32
2.2. Metrología .....	33

2.2.1 Sistema internacional de unidades .....	33
2.2.1.1 Los comités consultivos .....	33
2.2.1.2 El perfeccionamiento del SI.....	36
2.2.2 Magnitud.....	37
2.2.2.1 Magnitudes básicas o fundamentales .....	37
2.2.2.2 Magnitudes derivadas .....	38
2.2.3. Mensurando .....	38
2.2.4. Error de medición: valor medido de una magnitud menos un valor de referencia .....	38
2.2.6 Sesgo de medición: .....	39
2.2.7 Error aleatorio de medición: .....	39
2.2.8 Condición de repetibilidad de una medición: .....	39
2.2.9. Repetibilidad de medición: .....	39
2.2.10. Exactitud de medición: .....	39
2.2.11. Calibración.....	39
2.2.12 Trazabilidad metrológica .....	40
2.2.12.1 Trazabilidad de temperatura.....	41
2.2.13 Verificación: .....	42
2.2.14 Validación:.....	43

## IV

2.2.14.1 Veracidad de Medición:	43
2.2.14.2 Precisión de Medición:	43
2.2.14.3 Robustez:	43
2.2.15 Organismo de Evaluación de la conformidad (OEC):	43
2.2.16 Incertidumbre de medida	44
2.2.16.1 Evaluación tipo A:	45
2.2.16.2 Evaluación tipo B:	47
2.2.16.3 Tipos de distribuciones	49
2.2.16.4 Estimación de la incertidumbre combinada y la expandida. Factor de cobertura:	50
2.2.17. Interpolación por Mínimos cuadrados	53
2.2.18 Capacidad de medición y calibración (CMC):	57
<b>CAPÍTULO 3. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL</b>	<b>60</b>
3.1.3 Proceso de Calibración	62
3.1.4 Calibración:	63
3.1.5 Pruebas de estabilidad:	66
3.1.5.1 Prueba de Histéresis:	66
3.1.5.2 Prueba de Repetibilidad:	66
3.1.6 Análisis de datos	66

3.1.7 Estimación de la incertidumbre: .....	68
3.1.7.1 Cálculo de Incertidumbre .....	68
3.1.7.2 Estimación de la incertidumbre del sistema de calibración .....	68
3.1.7.3 Estimación de la incertidumbre de la corrección .....	71
3.2 Aplicación experimental del procedimiento de calibración de tres termómetros analógicos.....	72
3.2.1 Equipos bajo prueba: .....	72
3.2.2 Modelo de medición .....	73
3.2.3 Equipamiento usado.....	74
3.3 Inicio de prueba .....	77
3.3.1 Operaciones previas .....	77
3.3.2 Mediciones.....	78
<b>CAPÍTULO 4: RESULTADOS Y DISCUSIONES .....</b>	<b>83</b>
4.1 Cálculo del valor verdadero del instrumento de referencia (valor corregido del patrón).....	85
4.2 Cálculo de las correcciones: .....	91
4.3 Estimación de la incertidumbre: .....	92
4.4 Discusiones del resultado .....	106
4.4.1 Veracidad:.....	106

4.4.2 Evaluación de precisión y robustez .....	109
4.4.3 Determinación de la mejor incertidumbre del sistema de medición..	113
<b>CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES.....</b>	<b>116</b>
<b>CAPÍTULO 6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>117</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>120</b>
Anexo 1: Formato de calibración de termómetros analógicos .....	120
Anexo 2: Certificados de calibración de instrumentos de referencia (patrones de trabajo).....	122
Anexo 3: Oficio de INACAL otorgando la acreditación al procedimiento de calibración .....	126

**LISTA DE FIGURAS**

Fig. 1 : Movimiento de moléculas más alta a mayor temperatura [1].....	7
Fig. 2: Dos cuerpos A y C pueden estar en equilibrio térmico, aunque no estén en contacto. [2].....	8
Fig. 3 : En un termómetro al mismo nivel el punto triple del agua y en el cero absoluto [2] .....	11
Fig. 4 Ejemplo del termómetro tipo de dilatación de gas [5].....	19
Fig. 5: Ejemplo del Termómetro tipo bimetálico [5] .....	19
Fig. 6: Alcance de medición de algunos termómetros [18] .....	21
Fig. 7: Punto triple del agua reproducida físicamente en laboratorio [7].....	23
Fig. 8: Reproducción del Punto fijo del galio y su medición por un termómetro [7] .....	25
Fig. 9: Pozos secos (foto propia).....	26
Fig. 10: Baños termostáticos (foto propia).....	28
Fig. 11 : Relación lineal de la Resistencia vs Temperatura en distintos materiales [9] .....	29
Fig. 12: Circuito de conexión a dos hilos [8] .....	31
Fig. 13 Circuito de conexión a 3 hilos [8].....	31
Fig. 14: Circuito de conexión a 4 hilos [9].....	32
Fig. 15: El tratado del metro y los organismos que lo integran [10].....	35

## VIII

Fig. 16 Pirámide de trazabilidad [7].....	41
Fig 17: Termómetro de resistencia de platino ( foto propia) .....	74
Fig. 18 Baño termostático de agua (foto propia) .....	76
Fig 19 Baño termostático de alcohol (foto propia).....	76
Fig 20 Baño termostático de aceite (foto propia).....	76
Fig 21 Instrumento medidor de condiciones ambientales (foto propia) .....	77
Fig 22: Termómetro sumergido a diferentes profundidades (gráfica de elaboración propia).....	81
Fig. 23: Comparación de termómetros ( gráfica de elaboración propia) .....	82
Fig 24 Prueba de normalidad de los datos experimentales .....	108
Fig 25 Prueba de t-student de una muestra .....	108
Fig 26 Prueba de normalidad prueba 1 .....	110
Fig 27 Prueba de normalidad prueba 2 .....	111
Fig 28 Prueba de normalidad prueba 3 .....	111
Fig 29 Prueba de normalidad prueba 4 .....	112
Fig 30 Prueba de Bartlett para comparar las varianzas de las pruebas .....	112
Fig 31 Resultado de la prueba.....	113
Fig 32 Declaración alcance acreditado registrado en DM INACAL (página web del INACAL) [20].....	115

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Puntos fijos ITS 90 a la izquierda de la tabla con las sustancias y el estado de la materia correspondiente a la derecha [3].....	14
Tabla 2 Tipos de termómetros con el avance de la tecnología en la historia [4] .	15
Tabla 3 Límites de operación y clases de tolerancia [9] .....	33
Tabla 4 Magnitudes, nombres y símbolos del SI [12] .....	36
Tabla 5 Magnitudes base [13].....	37
Tabla 6 Características de instrumentos bajo prueba.....	73
Tabla 7 Baños termostático utilizados .....	75
Tabla 8 Tabla de condiciones ambientales.....	78
Tabla 9 Datos de prueba de profundidad de inmersión.....	79
Tabla 10 Indicación de los instrumentos tomados sin corregir.....	59
Tabla 11 Datos del certificado de calibración del patrón de referencia primer sensor .....	85
Tabla 12 Toma de datos corregidos del termómetro de referencia .....	89
Tabla 13 Correcciones de los instrumentos bajo calibración.....	91
Tabla 14 Estimación de las componentes de incertidumbres del método de calibración empleado .....	92
Tabla 15 Resultado final del termómetro 1 .....	104
Tabla 16 Resultado final del termómetro 2.....	105

Tabla 17 Resultados del termómetro 3 .....	105
Tabla 18 Resultados del método estandarizado vs Resultados de valores experimentales.....	107
Tabla 19 Diseño factorial de variación de condiciones .....	109
Tabla 20 Condiciones para cada prueba.....	110
Tabla 21 Prueba 1.....	110
Tabla 22 Prueba 2.....	111
Tabla 23 Prueba 3.....	111
Tabla 24 Prueba 4.....	112
Tabla 25 Condensado de los valores de incertidumbre en todo el alcance de medición.....	114
Tabla 26 Incertidumbre representativa.....	114

## **CAPÍTULO 1.**

### **INTRODUCCIÓN**

#### **1.1 Resumen y antecedentes**

##### 1.1.1 Resumen

El presente trabajo consistió en desarrollar un procedimiento de calibración para termómetros de indicación analógica y su acreditación.

Se desarrolló un conjunto de pasos e instrucciones, basados en los documentos técnicos de estos equipos y en procedimientos de calibración similares como el procedimiento PC-017 “Procedimiento para la calibración de termómetros digitales” de la dirección de metrología de INACAL.

Antes de iniciar las mediciones se mandaron a calibrar todos los equipos de referencia llamados patrones de trabajo, se evaluaron tanto los termómetros de referencia, como los medios isotermos y el medidor de condiciones ambientales.

Para la ejecución se usaron tres termómetros de indicación analógica los cuales tienen diferentes alcances de medición para poder realizar estas mediciones en un amplio espectro de temperaturas los cuales fueron  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  a  $200\text{ }^{\circ}\text{C}$  la propuesta

Se determino la capacidad de medición del procedimiento al evaluar las mejores incertidumbres que se pueden reportar en todo el alcance propuesto.

Se realizó la validación del método usando cuatro parámetros que permiten asegurar la amplitud de la validación y así satisfacer las necesidades de la aplicación veracidad, precisión, robustez e incertidumbre objetivo se cumplió con los criterios de aceptación concluyendo que el método es exacto y preciso.

El método demostró que tiene la capacidad de encontrar las correcciones de un instrumento de termómetros de indicación analógica en un rango de  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  a  $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ , con incertidumbres no menores a  $0,33\text{ }^{\circ}\text{C}$

Finalmente se presentó el trabajo ante el INACAL el cual mediante el oficio 215-2021 concluyó en darle la acreditación al laboratorio para el servicio de calibración de termómetros de indicación analógica.

### 1.1.2 Antecedentes

En el mundo el uso de termómetros de indicación analógica es bastante recurrente, por su practicidad, robustez y por ser económicos estos se usan en el control y la medición de la temperatura en la ciencia, la salud y la ingeniería.

En la industria peruana se exige a las empresas usuarias que los termómetros de indicación analógica estén calibrados de manera acreditada para la confiabilidad de sus mediciones, esta calibración lo dan los laboratorios acreditados por INACAL.

La acreditación asegura la competencia técnica de los laboratorios de calibración a través del uso de estándares normalizados, asegurando así la confiabilidad del procedimiento implementado.

Las acreditaciones que otorga INACAL-DA cuentan con reconocimiento internacional por ser parte de los Acuerdos de Reconocimiento Multilateral en ILAC (Cooperación Internacional de Acreditación de Laboratorios)

## **1.2 Problemática e Hipótesis**

### 1.2.1 Problemática

Hay una necesidad de que los termómetros de indicación analógica usadas en las empresas peruanas de la industria de alimentos, farmacéuticas, empresas de aerolíneas entre otras, estén calibrados por un laboratorio acreditado, exigencias requeridas para demostrar la confiabilidad de sus equipos, sin embargo, a pesar de la alta demanda que existe para la calibración de termómetros de indicación analógica, la oferta es baja, ya que hay solo dos empresas en todo el Perú acreditadas por DA INACAL (Dirección de acreditación del Instituto Nacional de Calidad) para este tipo de equipos, que son la empresa LO JUSTO S.A.C. y la empresa METROIL SAC, cuyos procedimientos son internos, es decir de uso propio no están libres en el mercado, y el ente nacional, no cuenta con un procedimiento público normalizado que las empresas puedan aplicar.

Es por eso por lo que en este trabajo planteamos realizar un procedimiento de calibración de termómetro de indicación analógica de tal manera que sea acreditada y reconocida por la dirección de acreditación de INACAL, para poder poner al alcance de cualquier empresa su uso y aplicación.

### 1.2.2 Hipótesis general

- Es posible desarrollar un procedimiento propio de calibración de

termómetros de indicación analógica que sea acreditado y publicarlo para los laboratorios de calibración

### 1.2.3 Hipótesis específica

- Es posible determinar las correcciones y las componentes de la incertidumbre en la calibración de termómetros analógicos considerando todas las posibles fuentes de error y cuantificarlas para emitir los resultados
- Es posible que el procedimiento propio desarrollado permita tener los pasos y consideraciones adecuadas para realizar las medidas y que al validarlas presenten resultados de cumplimiento.
- Es posible obtener la acreditación del INACAL (Instituto nacional de calidad) para este procedimiento.

## **1.3 Objetivos**

### 1.3.1 Objetivo General

- Desarrollar un procedimiento propio de calibración de termómetros de indicación analógica para que ofrezcan los laboratorios de calibración

### 1.3.2 Objetivos Específicos

- Determinar las correcciones y las componentes de incertidumbre en la calibración de termómetros analógicos considerando

todas las posibles fuentes de error y cuantificarlas para emitir los resultados.

- Establecer un procedimiento propio que permita tener los pasos y consideraciones adecuadas para realizar las mediciones y que estas sean validadas de manera satisfactoria.
- Obtener la acreditación del INACAL (Instituto nacional de calidad) para este procedimiento y así confirmar su confiabilidad.

## *CAPÍTULO 2.*

### **FUNDAMENTO TEÓRICO**

#### **2.1. Temperatura**

##### 2.1.1 Definición

Es una magnitud física fundamental. Su importancia práctica es enorme ya que cada día se hacen millones de mediciones de temperatura en diversos campos de la actividad humana, desde las industrias, las fábricas, los laboratorios, la ciencia y la tecnología en general.

La temperatura es un concepto estadístico asociado a la energía de las moléculas. Entre mayor energía tengan las moléculas su temperatura será más alta. [1]. También está definida por el principio de la ley cero de la termodinámica. En la figura 1 se muestra de manera grafica como a mayor temperatura se tiene un mayor movimiento de las moléculas.

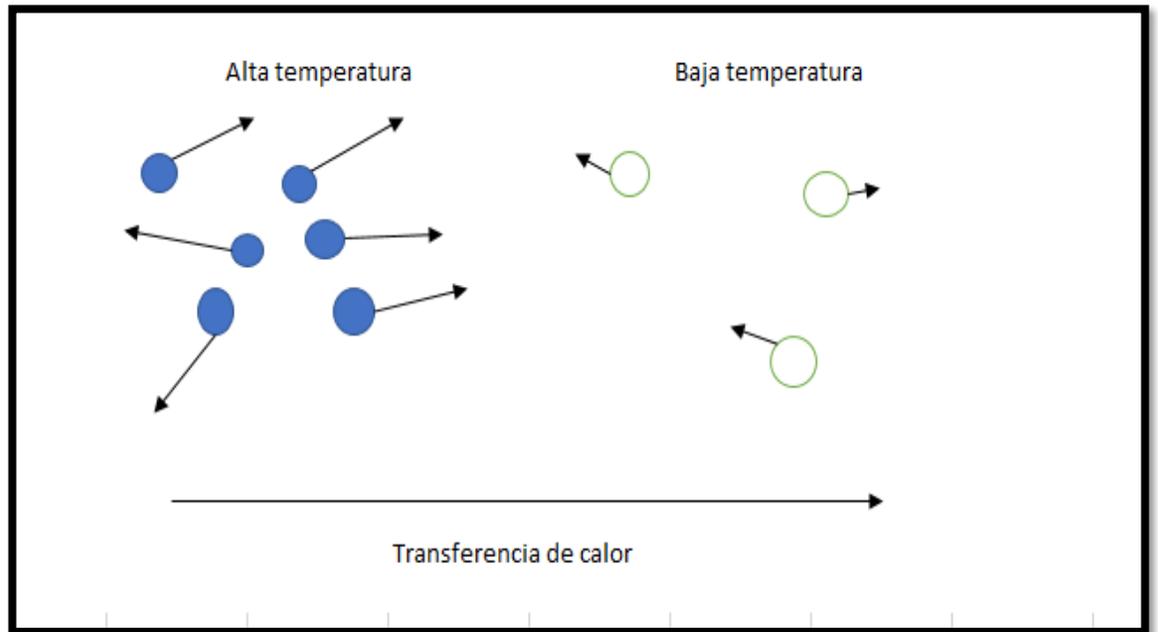


Fig. 1 : Movimiento de moléculas más alta a mayor temperatura [1]

La ley cero de la termodinámica establece que, si dos cuerpos se encuentran en equilibrio térmico con un tercero, están en equilibrio térmico entre sí. Si el tercer cuerpo se sustituye por un termómetro, la ley cero se puede volver a expresar como dos cuerpos que están en equilibrio térmico si ambos tienen la misma lectura de temperatura incluso si no están en contacto.

En la figura 2 se muestra la gráfica de tres cuerpos A, B, C en contacto, si A está en equilibrio térmico con B y B está en equilibrio térmico con C, entonces A está en equilibrio térmico con C. [2]

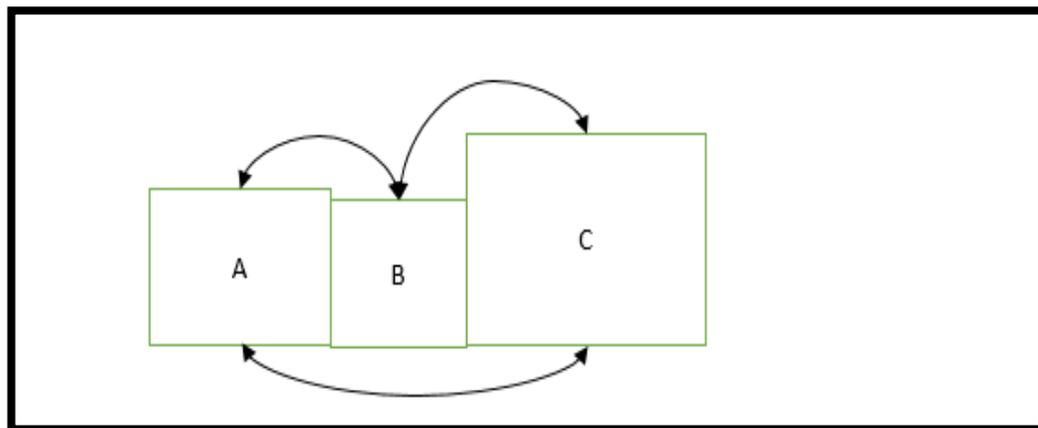


Fig. 2: Dos cuerpos A y C pueden estar en equilibrio térmico, aunque no estén en contacto. [2]

### 2.1.2. Escalas de temperatura

Las escalas de temperatura usadas actualmente en el SI son la escala Celsius (antes llamada escala centígrada; en 1948 se le cambió el nombre en honor de quien la diseñó, el astrónomo sueco A. Celsius, 1702-1744) y la escala Fahrenheit (en honor al fabricante de instrumentos alemán G. Fahrenheit, 1686-1736), respectivamente. En la primera a los puntos de hielo y de vapor se les asignaron originalmente los valores de  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  y  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ , respectivamente. Los valores correspondientes en la segunda son  $32\text{ }^{\circ}\text{C}$  y  $212\text{ }^{\circ}\text{F}$ . Ambas se conocen comúnmente como escalas de dos puntos dado que los valores de temperatura se asignan en dos puntos distintos. [2]

En termodinámica es muy conveniente tener una escala de temperatura independiente de las propiedades de cualquier sustancia o sustancias. Tal escala es la escala de temperatura termodinámica. La escala de temperatura termodinámica en el SI es

la escala Kelvin, llamada así en honor a lord Kelvin (1824-1907), cuya unidad de temperatura es el kelvin, designado por K (no °K; el símbolo de grado se eliminó de forma oficial del kelvin en 1967). La temperatura mínima en esta escala es el cero absoluto o 0 K. Se deduce entonces que sólo se requiere asignar un punto de referencia diferente a cero para establecer la pendiente de esta escala lineal. Por medio de técnicas de refrigeración poco comunes los científicos se han aproximado al cero absoluto kelvin (en 1989 lograron alcanzar 0.000000002 K) [2].

La escala de temperatura termodinámica en el sistema inglés es la escala Rankine, nombrada en honor a William Rankine (1820-1872), cuya unidad de temperatura es el Rankine, el cual se designa mediante R.

La escala Kelvin se relaciona con la Celsius mediante

$$[T] \text{ (K)} = [t] \text{ (}^\circ\text{C)} + 273,15 \quad (1)$$

Es una práctica común redondear la constante en la ecuación a 273

La escala Rankine se relaciona con la de Fahrenheit mediante

$$[T] \text{ (R)} = [t] \text{ (}^\circ\text{F)} + 459,67 \quad (2)$$

Es una práctica común redondear la constante en la ecuación a 460

La temperatura de referencia elegida en la escala Kelvin original fue 273,15 K (o 0 °C), que es la temperatura a la que se congela el agua (o se funde el hielo), sustancia que existe como una mezcla sólida-líquida en equilibrio a presión atmosférica estándar (el punto de hielo) [2]

En la Décima Conferencia General de Pesos y Medidas de 1954, el punto de referencia se cambió a un punto reproducible con mucha mayor precisión, el punto triple del agua (el estado en el cual coexisten en equilibrio las tres fases del agua), al cual se le asigna el valor de 273,16 K. La escala Celsius también se volvió a definir en esta conferencia en términos de la escala de temperatura del gas ideal y un solo punto fijo, que es de nuevo el punto triple del agua con un valor asignado de 0,01 °C. La temperatura de ebullición del agua (el punto de vapor) se determinó nuevamente de forma experimental como 100,00 °C y, por consiguiente, hubo una buena concordancia entre la anterior y la nueva escala Celsius [2].

En la figura 3 se presenta una gráfica de las equivalencias entre las escalas Celsius, Kelvin , Fahrenheit , Rankine , para el punto del cero absoluto y el punto triple del agua.

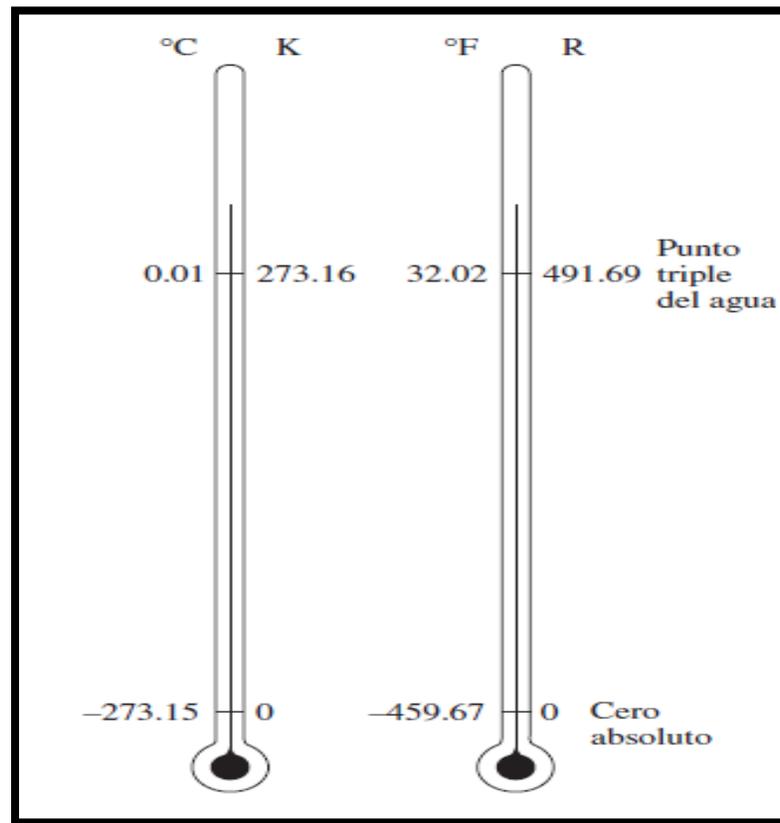


Fig. 3 : En un termómetro al mismo nivel el punto triple del agua y en el cero absoluto [2]

### 2.1.3. Escalas de temperatura internacional de 1990 (ITS-90)

La Escala de temperatura internacional de 1990, que sustituye a las de temperaturas prácticas internacionales de 1968 (IPTS-68), 1948 (ITPS-48) y 1927 (ITS-27), fue adoptada por el Comité Internacional de Pesos y Medidas en 1989 a solicitud de la Decimoctava Conferencia General de Pesos y Medidas. La ITS-90 es similar a sus predecesoras, pero posee valores más actualizados de temperaturas fijas, tiene un alcance amplio y se ajusta con mayor precisión a la escala de temperatura termodinámica. En la

ITS-90 la unidad de temperatura termodinámica  $T$  es también el kelvin (K), definida como la fracción  $1/273,16$  de la temperatura termodinámica del punto triple del agua, el cual es el único punto fijo de definición de esta escala y la Kelvin, además de funcionar como el punto fijo termométrico más importante usado en la calibración de termómetros para ITS-90. [2]

La unidad de temperatura Celsius es el grado Celsius ( $^{\circ}\text{C}$ ), que por definición es igual en magnitud al kelvin (K). Una diferencia de temperatura se puede expresar en kelvin o grados Celsius. El punto de hielo es el mismo en  $0^{\circ}\text{C}$  ( $273,15\text{ K}$ ) tanto en ITS-90 como en IPTS-68, pero el punto de vapor es  $99,975^{\circ}\text{C}$  en ITS-90 (con una incertidumbre de  $0,005^{\circ}\text{C}$ ) mientras que éste fue  $100,000^{\circ}\text{C}$  en IPTS-68. [2]

La ITS-90 se extiende hacia arriba desde  $0,65\text{ K}$  hasta la temperatura más alta medible prácticamente en términos de la ley de radiación de Planck mediante radiación monocromática. Se basa en especificar valores de temperatura definidos en varios puntos fijos reproducibles con facilidad para que sirvan como referencia y así expresar de forma funcional la variación de temperatura en cierto número de intervalos y semi intervalos. [2]

La Escala Internacional de Temperatura de 1990 (ITS-90) define tanto la Temperatura Kelvin Internacional, símbolo  $T_{90}$ , como la Temperatura Celsius Internacional, símbolo  $t_{90}$ . La relación entre  $T_{90}$  y  $t_{90}$  es la misma que existe entre  $T$  y  $t$ , es decir [3]

$$t_{90} / ^{\circ}\text{C} = T_{90} / \text{K} - 273,15 \quad (3)$$

La unidad de la magnitud física  $T_{90}$  es el kelvin, símbolo K y la de la magnitud

física  $t_{90}$ , es el grado Celsius, símbolo  $^{\circ}\text{C}$ ; igual que como para la temperatura termodinámica  $T$  y la temperatura Celsius  $t$ .

Entre 0,65 K y 5,0 K la temperatura  $T_{90}$  se define por medio de las relaciones entre la presión de vapor de saturación y la temperatura del  $^3\text{He}$  y del  $^4\text{He}$ . Entre 3,0 K y el punto triple del neón (24,556 K), la temperatura  $T_{90}$  se define mediante el termómetro de gas de helio calibrado en tres temperaturas experimentalmente realizables que tienen valores numéricos asignados (puntos fijos de definición) y utilizando fórmulas de interpolación especificadas. Entre el punto triple del hidrógeno en equilibrio (13,8033 K) y el punto de solidificación de la plata (961,78  $^{\circ}\text{C}$ ) la temperatura  $T_{90}$  se define mediante termómetros de resistencia de platino calibrados en conjuntos especificados de puntos fijos de definición y utilizando procedimientos de interpolación especificados. Por encima del punto de solidificación de la plata (961,78  $^{\circ}\text{C}$ ), la temperatura  $T_{90}$  se define en términos de un punto fijo de definición y la ley de radiación de Planck. [3]

En la tabla 1 se muestra los puntos fijos de la escala internacional de temperatura según la ITS 90 donde los V: punto de presión de vapor, T: punto triple (temperatura a la cual las fases sólido, líquido y vapor están en equilibrio) G punto del termómetro de gas, M, F punto de fusión, punto de solidificación (temperatura a la presión de 101 325 Pa, a la cual las fases sólida y líquida están en equilibrio) [3]

Tabla 1. Puntos fijos ITS 90 a la izquierda de la tabla con las sustancias y el estado de la materia correspondiente a la derecha [3]

Temperatura		Sustancia	Estado b
T90/K	t90/ °C		
3 a 5	-270,15 a -268,15	e-H2	V
13,8033	-259,3467	e-H2	T
17	-256,15	e-H2	V (o G)
20,3	-252,85	e-H2	V(o G)
25	-248,5939	Ne	T
54	-218,7916	O2	T
84	-189,3442	Ar	T
234	-38,8344	Hg	T
273,16	0,01	H2O	T
303	29,7646	Ga	M
430	156,5985	In	F
505	231,928	Sn	F
693	419,527	Zn	F
933	660,323	Al	F
1234,93	961,78	Ag	F
1337,33	1064,18	Au	F
1357,77	1084,62	Cu	F

#### 2.1.4. Termómetros

Un termómetro es un instrumento cuya utilidad es medir la temperatura a través de diversos mecanismos y escalas. El más común de estos mecanismos fue la dilatación, propiedad de ciertos materiales de expandirse de cara a la presencia de calor, común entre los metales y otras sustancias, como los alcoholes. En la tabla 2 se muestra una breve reseña histórica de la evolución de la creación de los tipos de termómetros con respecto al avance de la tecnología [4]

Tabla 2 Tipos de termómetros con el avance de la tecnología en la historia [4]

Época	Quién	Procedimiento/ Instrumento
Antigua	Hipócrates	Comprobaba el calor de la piel del enfermo aplicando la mano sobre él, según la sensación que percibía, hacía la diferencia entre "el calor dulce" y la "fiebre ardiente". EL TACTO era la única herramienta para valorar la temperatura.
Siglo I (A.C.)	Hero de Alejandría	Inventaron el TERMOSCOPIO

---

		instrumento de vidrio provisto de una columna de agua que se movía de acuerdo con el calor que se le aplicara.
1594	Galileo Galilei	Diseñó básicamente en un TUBO DE VIDRIO VERTICAL, cerrado por ambos extremos, que contiene agua en al que se encuentran sumergidas varias esferas de vidrio cerradas, cada una de las esferas contiene, a su vez, una cierta cantidad de líquido coloreado. Este instrumento permitía registrar variaciones groseras de temperatura.
1612	Santorre Santorio (Sanctorious de Padua)	Introdujo una GRADUACIÓN NUMÉRICA al intentó de Galileo Galilei. Este tubo presentaba en la superficie exterior un sistema de graduación que permitía apreciar el grado de dilatación estableciendo mediciones comparativas. Era poco exacto.

---

---

1641	Fernando II de Medici, Duque de Toscana	Construyó el TERMOMETRO DE BULBO DE ALCOHOL con capilar sellado, como los que se usa actualmente. El avance de la tecnología en las actividades vinculadas con el vidrio fue fundamental para la construcción de este tipo de termómetro.
1709	Daniel Gabriel Fahrenheit	Construye el TERMÓMETRO DE ALCOHOL con graduación como los que se usan en la actualidad.
1714	Daniel Gabriel Fahrenheit	Construye el primer TERMÓMETRO A BASE DE MERCURIO perfeccionando así el "Termómetro de Galileo".
1866	Thomas Clifford Altbult	Diseñó un TERMÓMETRO PORTATIL para uso clínico de 12 cm. Que alcanza su punto de equilibrio más rápidamente siendo capaz de medir la temperatura en sólo 5 minutos.

---

---

1885	Calendar Van Dusen	Inventa el SENSOR DE TEMPERATURA con resistencia de platino (Se puede considerar el primer termómetro digital)
Actualidad	Recientes avances de la tecnología en varias ramas	Se han generado la fabricación de variados tipos de termómetros (incluso infrarrojos) cuyas exactitudes de medición son cada vez más avanzadas.

---

Entre los tipos más conocidos de termómetros están:

#### 2.1.4.1 Termómetro de mercurio:

Es un tubo de vidrio sellado que contiene mercurio, cuyo volumen cambia con la temperatura de manera uniforme. Este cambio de volumen se aprecia en una escala graduada.

#### 2.1.4.2 Pirómetros:

Termómetros para altas temperaturas, se utilizan en fundiciones, fábricas de vidrio, hornos para cocción de cerámica, etc.

#### 2.1.4.3 Termómetros de indicación analógica:

Instrumento que consiste en un vástago de detección de temperatura y

un cabezal conectado entre sí por un vástago rígido o por un capilar flexible, existen los termómetros bimetálicos que cuenta con una tira compuesta por dos chapas de metal de diferentes coeficientes de dilatación (“bimetal”), laminadas entre sí en forma inseparable, se deforma consecuencia de un cambio de temperatura [5]. La curvatura resultante es casi proporcional al cambio de temperatura. A partir de las tiras bimetálicas se desarrollaron dos diferentes formas de sistemas de medición el muelle helicoidal y el espiral, también están los que usan gas. El sistema de medición está compuesto de bulbo, capilar y tubo elástico en la caja. Estos componentes forman una unidad. El sistema de medida completo este relleno a presión con gas inerte. Si cambia la temperatura, cambia también la presión interior del bulbo. La presión deforma el muelle de medición, cuyo movimiento se transmite al indicador a través de un mecanismo de indicación. [5] En la figura 4 y 5 se muestran dos tipos de termómetros de indicación analógica.



Fig. 5: Ejemplo del Termómetro tipo bimetálico [5]



Fig. 4 Ejemplo del termómetro tipo de dilatación de gas [5]

#### 2.1.4.4 Termómetro de resistencia

Consiste en un alambre de algún metal cuya resistencia eléctrica cambia cuando varía la temperatura, el más común es el termómetro de platino, cuyo elemento sensible a las variaciones de temperatura constituido por una resistencia termométrica dentro de una vaina protectora, hilos de conexión internos y terminales externos, permiten su conexión a equipo de medida eléctricos [6]. Su resistencia es función de la temperatura, el termistor en cambio es construido con un material semiconductor cuya resistencia varía con la temperatura. [6] en la figura 6 un esquema que permite visualizar los diferentes alcances que tienen cada tipo de sensores en una escala numérica de valores de temperatura.

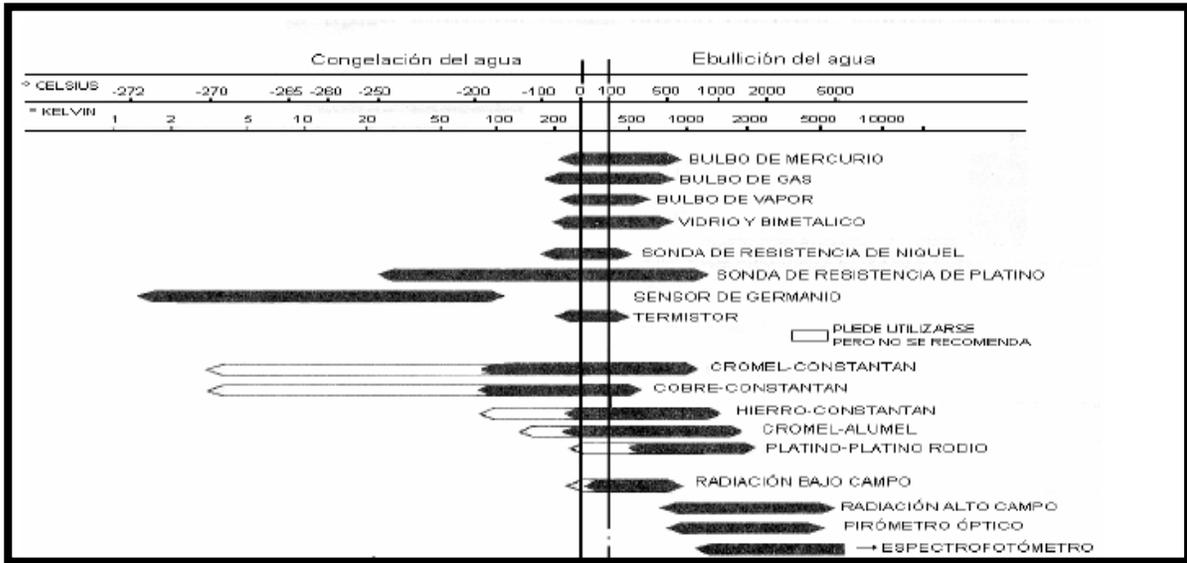


Fig. 6: Alcance de medición de algunos termómetros [18]

### 2.1.5 Calibración de termómetros

Existen dos maneras de calibrar los termómetros. La primera es por comparación en medios y la segunda es por puntos fijos o calibración absoluta [7]

#### 2.1.5.1 Calibración por comparación en medios

Este método consiste en comparar la lectura de un termómetro cuyas características son conocidas con la lectura del termómetro que estamos calibrando. Este método tiene su base científica en la ley cero. [7]

La ley cero de la termodinámica establece que, si dos sistemas están en equilibrio térmico, cada uno de ellos teniendo la misma temperatura que un tercer sistema, los dos

sistemas tienen la misma temperatura entre sí (están en equilibrio entre sí), aplicando esto a la calibración de temperatura, si un termómetro calibrado está a la misma temperatura que un baño de calibración, entonces el termómetro calibrado y el termómetro bajo prueba están a la misma temperatura. [7]

Esto es cierto solamente en un estado de equilibrio térmico, lo cual no siempre se puede dar como garantizado. El baño de calibración provee este requisito, y es en el cual se introducen los termómetros. Su uniformidad y estabilidad deben ser conocidas. Por lo cuales deben ser evaluados [7].

#### 2.1.5.2 Calibración por puntos fijos de la escala internacional de temperatura

La escala ITS 90 utiliza una serie de constantes fundamentales de la naturaleza conocidas como puntos fijos como hemos visto. Durante algún tiempo se utilizó el agua de hielo como uno de esos puntos fijos, pero fue reemplazado en 1954 por el punto triple del agua, el cual puede ser reproducido de forma más precisa que el punto del hielo. [7]

La ITS-90 indica que debe ser un Termómetro de Resistencia de Platino Estándar (SPRT) que se denomina un dispositivo de interpolación.

La escala ITS-90 especifica los requerimientos de los SPRT y también da las ecuaciones que nos permiten convertir la resistencia eléctrica de las SPRT en temperatura.

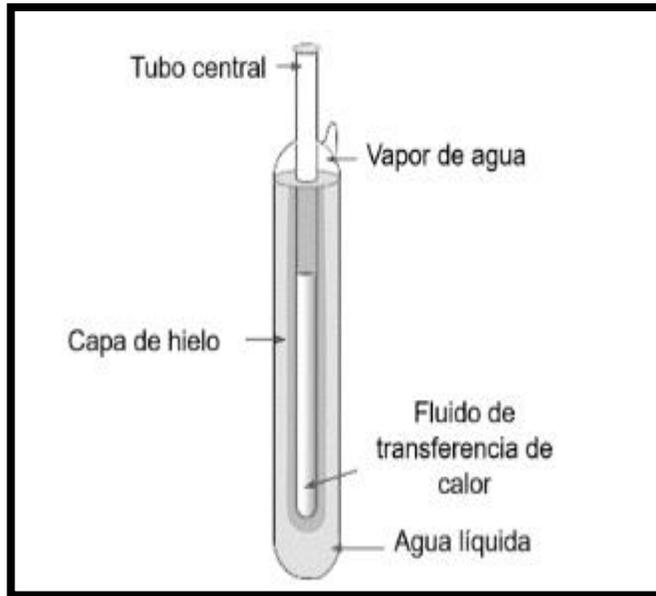


Fig. 7: Punto triple del agua reproducida físicamente en laboratorio [7]

En la figura 8 se muestra esquemáticamente la estructura y el funcionamiento de la reproducción del punto triple del agua.

El punto triple del agua es el más importante en la calibración de termómetros bajo la ITS-90 es la temperatura a la cual coexisten los estados sólido y líquido bajo su propio vapor de agua. Es el único punto fijo que es común tanto a la Escala Termodinámica de Kelvin como a la ITS 90. El valor asignado en estas escalas es 273,16 K y 0,01 °C, el intervalo de temperatura de 1 °C es idéntico al intervalo de 1K. [7]

El Galio es un metal que funde a 29,7646 °C. La célula de Galio, que es un recipiente sellado que contiene Galio puro con una cavidad central donde puede introducirse un termómetro, se coloca en el Baño de Galio. La función de este baño es

calentar o enfriar la celda o célula.

Como la célula al inicio del proceso está a la temperatura ambiente, el Galio se encuentra en estado sólido.

Cuando el aparato se enciende y se pone en modo fusión, la temperatura llega a 30,2 °C. Inicialmente la célula sube la temperatura, pero este incremento de temperatura es frenado cuando el Galio comienza a fundir, es decir pasa de sólido a líquido. Durante este cambio, la temperatura permanece constante a 29,7646 °C producto del calor latente. Una vez que todo el Galio se ha fundido, la temperatura vuelve a recobrar la temperatura del baño. [7]

El periodo de temperatura constante llamado meseta de fusión dura muchas horas y durante este tiempo, un termómetro puede ser introducido en la perforación de la célula para calibrarlo. La temperatura está determinada no por la calidad del aparato de medida, sino por la pureza del metal, una constante de la naturaleza. En la figura 9 se muestra la medición de uno de los puntos fijos de la escala de temperatura, específicamente el punto fijo de galio, que se define a la temperatura de 29,76646 °C. [7]

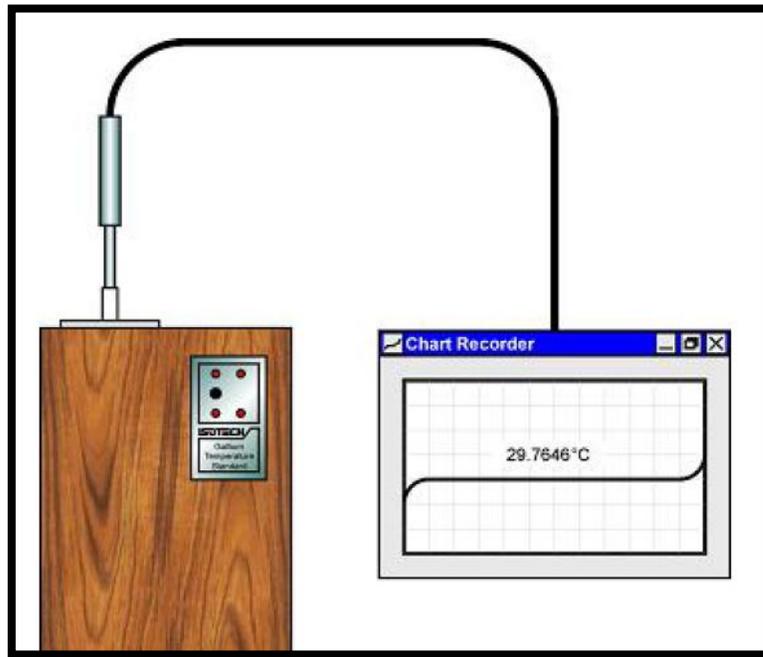


Fig. 8: Reproducción del Punto fijo del galio y su medición por un termómetro [7]

## 2.1.6. Instrumentos para la calibración de termómetros por comparación directa

### 2.1.6.1 Medios Isotérmicos

Aunque existen una gran cantidad de fuentes de calor para calibración industrial, los más comunes son los de bloque seco. Más recientemente, fuentes de calor multi-propósito y baños líquidos han llegado a ser de uso muy común. Todas las fuentes de calor deben tener mínimo de volumen para contener adecuadamente el termómetro y un controlador que fije la temperatura deseada [7].

### 2.1.6.2 Bloques secos o pozos

Los bloques secos, como su nombre indica, son bloques de metal donde se colocan los sensores de temperatura a calibrar. El bloque es calentado o enfriado a la temperatura deseada. Existen dos tipos: en uno de ellos, el bloque es perforado con un número de orificios que reciben a los sensores. Esta es una buena aproximación para lograr un buen contacto térmico. El segundo tipo tiene una sola abertura donde se pueden colocar diferentes tipos de insertos. Este sistema es más flexible y da resultados más precisos. [7] A continuación, se muestra como ejemplo un bloque seco.



Fig. 9: Pozos secos (foto propia)

### 2.1.6.3 Baños líquidos

Estos baños tienen un recipiente que contiene un líquido. El líquido es agitado o recirculado, calentado o enfriado a la temperatura deseada. Los sensores de temperatura se colocan directamente en el líquido evitando tener que usar bloques específicamente

taladrados. Son especialmente útiles para sensores de formas irregulares y sensores cortos. Así mismo, sensores en ángulo no pueden acomodarse en horno seco, pero sí en baño líquido. En términos generales son más precisos que los bloques metálicos o secos ya que no existen pérdidas por el espacio de aire entre sensor y metal y adicionalmente la temperatura es más uniforme en el líquido. Sus desventajas son el límite superior de temperatura que no puede ser muy alta debido a la formación de gases y el peligro de ignición cuando se utilizan líquidos diferentes al agua. [7]

Un parámetro importante cuando se utilizan baños líquidos es la profundidad de inmersión. Para altas precisiones y bajos valores de incertidumbre, se debe garantizar una suficiente inmersión que elimine el calor que fluye hacia arriba por la cubierta del termómetro causando un error grande llamado error de conducción del vástago o vaina. [7]

El líquido que se utilice determina la máxima temperatura a la cual se pueden usar estos baños. Los aceites de silicona tienen la limitación de que no pueden utilizarse por encima de los 300° C debido a la producción de humos y el riesgo de ignición. [7]

Por lo tanto, es importante prever la instalación de extractores de aire en los recintos donde operen estos baños. Se requieren no solamente a altas temperaturas, sino a bajas donde frecuentemente se utiliza alcohol. [7] En la figura 11 se muestra el ejemplo de un baño termostático. [7]



Fig. 10: Baños termostáticos (foto propia)

#### 2.1.6.4 Termómetro de Resistencia de Platino

Los termómetros de resistencia eléctrica se fundamentan en el principio de que la resistencia eléctrica de los materiales depende de la temperatura, y varía de modo casi lineal al valor de ésta.

El empleo del platino como sensor de temperatura fue propuesto por W.Siemens en 1871. El termómetro de resistencia de platino (RTD) es el instrumento indicado en la escala internacional de temperatura de 1990 (ITS-90) para ser usado en el alcance comprendido entre  $-259,3467\text{ }^{\circ}\text{C}$  punto triple del hidrógeno ( $\text{PT-H} = 13,8033\text{ K}$ ) y  $961,78^{\circ}\text{C}$  punto de solidificación de la plata ( $\text{PS-Ag} = 1234,93\text{ K}$ ) entre las características de este instrumento se listan: [8]

- Químicamente inerte a altas temperaturas.
- Punto de fusión alto (1772 °C)
- Resistente a la oxidación a altas temperaturas
- Coeficiente de resistividad relativamente alto de  $10 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot m$

(resistencia eléctrica específica de un determinado material)

- Relación altamente lineal de resistencia contra temperatura

En la figura 12, se muestra una gráfica que compara tres tipos de materiales, platino, cobre y níquel y su comportamiento de relación resistencia y temperatura. [9]

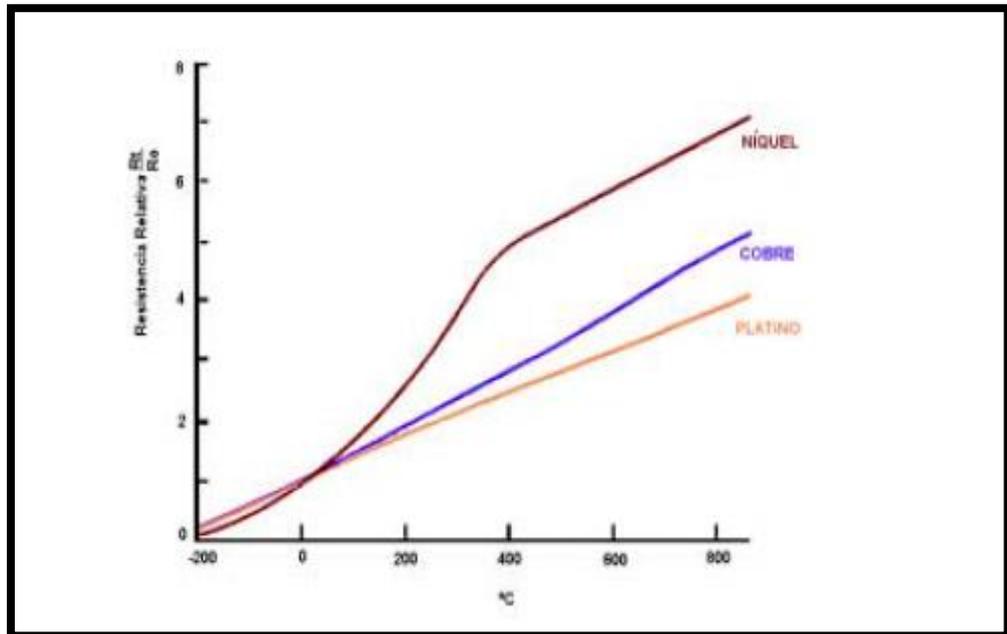


Fig. 11 : Relación lineal de la Resistencia vs Temperatura en distintos materiales [9]

Dos de las más importantes características que definen el desempeño de los termómetros de resistencia son el grado de pureza y el diámetro del alambre.

Los metales puros tienen un coeficiente de resistencia por temperatura positivo constante. El coeficiente de resistencia por temperatura es la razón de cambio de resistencia al cambio de temperatura. Un coeficiente positivo significa que la resistencia aumenta a medida que aumenta la temperatura. Si el coeficiente es constante, significa que el factor de proporcionalidad entre la resistencia y la temperatura es constante y que la resistencia y la temperatura se graficarán en una línea recta, en los RTD este coeficiente es conocido como alfa ( $\alpha$ ). [9]

El diámetro del alambre afecta directamente a su resistencia y esta característica es indicada mediante el valor de resistencia nominal en el punto triple del agua (PT-H<sub>2</sub>O = 0,01 °C) para un RTD patrón con la ITS-90, o en el punto de fusión del hielo (PF-H<sub>2</sub>O = 0,00 °C) para un RTD industrial. Un alambre más delgado tendrá una resistencia nominal menor. Existen varias calidades de termómetros de resistencia de platino como son los termómetros de resistencia de platino patrón (normado por la ITS-90) y los termómetros de resistencia de platino industriales, los cuales comparten ciertas características comunes satisfaciendo requisitos distintos. [9]

Para uso industrial se emplean habitualmente sensores de temperatura de resistencia Pt100 o Pt1000. Las características exactas de dichos sensores y el termómetro basado en ellas están especificados en la norma IEC 60751. existen tipos de conexiones para estos equipos:

#### 2.1.6.4.1 Conexión de 2 hilos y de 3 hilos

La resistencia del conductor al sensor entra como error en la medida. Por lo tanto,

no se recomienda este tipo de conexión con resistencias PT100 para las clases de precisión A y AA, ya que la resistencia eléctrica de los cables y sus efectos de temperatura entran en el resultado y falsifican el mismo [8]. En la figura 13 se muestra la conexión a dos hilos.

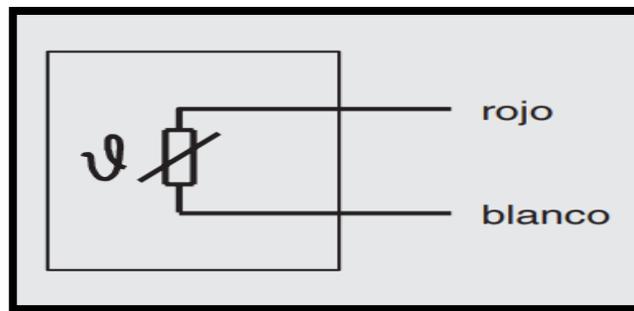


Fig. 12: Circuito de conexión a dos hilos [8]

En la conexión de 3 hilos, el efecto de la resistencia del conductor se compensa en gran medida.

La longitud máxima del cable de conexión depende de las opciones de compensación del módulo de evaluación (transmisor, indicación, regulador o sistema de

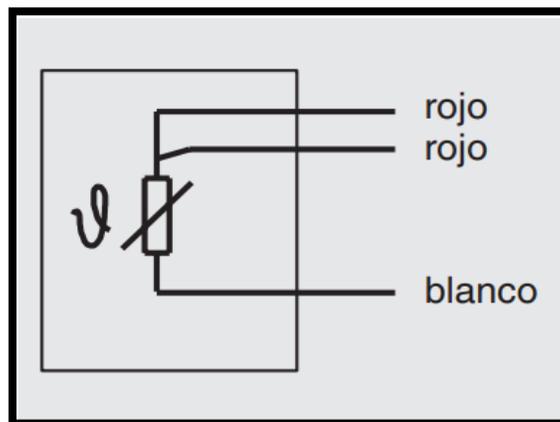


Fig. 13 Circuito de conexión a 3 hilos [8]

control de proceso) [9]. En la figura 14 se muestra la conexión a tres hilos.

#### 2.1.6.4.2 Conexión de 4 hilos

El efecto del cable conector queda completamente eliminado ya que se compensan también posibles asimetrías de la resistencia. La longitud máxima del cable depende de la sección del cable y de las opciones de compensación de los módulos de evaluación (transmisores, indicadores, reguladores o sistemas de control de proceso). Un conexionado de 4 hilos puede servir también como conexionado de 2 o 3 hilos, si no se conecta los hilos no necesarios, estos instrumentos se aplican para laboratorios de calibración y se consideran de clase de exactitud A o AA [8].

Las dos versiones del sensor (bobinado de hilo/ película delgada) se distinguen en relación con las precisiones posibles en las temperaturas de aplicación [8].

En la figura 15 se muestra el conexionado a cuatro hilos.

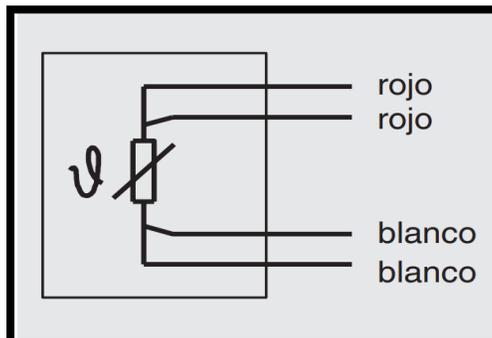


Fig. 14: Circuito de conexión a 4 hilos [9]

En la tabla 3 se muestra para cada clase de sensor el rango de temperatura y la desviación límite permitida para cada clase.

Tabla 3 Límites de operación y clases de tolerancia [9]

Clase	Rango de temperatura en °C		Desviación Límite
	Hilo bobinado (W)	Película delgada (F)	
B	-196 ... +600	-50 ... +500	$\pm(0,30 + 0,0050   t  )^{1)}$
A	-100 ... +450	-30... + 300	$\pm(0,15 + 0,0020   t  )^{1)}$
AA	-50 ... +250	0 ... 150	$\pm ( 0,10 + 0,0017   t   )^{1)}$

Nota: t es la temperatura medida

## **2.2. Metrología**

### 2.2.1 Sistema internacional de unidades

Después de la Revolución Francesa los estudios para determinar un sistema de unidades único y universal concluyeron con el establecimiento del Sistema Métrico Decimal. La adopción universal de este sistema se consolidó con el Tratado del Metro (Convención del Metro), que se firmó en Francia el 20 de mayo de 1875, y en el cual se establece la creación de una organización científica que tuviera, por una parte, una estructura permanente que permitiera a los países miembros tener una acción común sobre todas las cuestiones que se relacionen con las unidades de medida y que asegure la unificación mundial de las mediciones físicas. [10]

#### 2.2.1.1 Los comités consultivos

Los organismos que fueron creados para establecer dicha estructura son los siguientes:

La Conferencia General de Pesas y Medidas (CGPM): Que actualmente se reúne cada 4 años, integrada por los representantes de los Gobiernos de los países firmantes del

Tratado del Metro. Bajo su autoridad se encuentra el Comité Internacional de Pesas y Medidas (CIPM), quien, a su vez, supervisa las actividades de la Oficina Internacional de Pesas y Medidas (Bureau International des Poids et Mesures, BIPM) que es el laboratorio científico permanente.[10]

Cada Conferencia General recibe el informe del Comité Internacional sobre los trabajos desarrollados, discute y examina las disposiciones necesarias para asegurar la extensión y el mejoramiento del Sistema Internacional de Unidades, sanciona los resultados de las nuevas determinaciones metrológicas fundamentales, adopta las resoluciones científicas de carácter internacional en el campo de la metrología y las decisiones importantes que afecten a la organización y al desarrollo de la Oficina Internacional de Pesas y Medidas.[10]

El CIPM prepara el programa de trabajo de la Conferencia General, establece un informe anual a los Gobiernos de las Altas Partes Contratantes sobre la situación administrativa y financiera del BIPM. Sus reuniones y discusiones son el objeto de informes detallados que publica el BIPM.[10]

El CIPM, ha creado Comités Consultivos que reúnen a los expertos mundiales en cada campo particular de la metrología los que son consejeros sobre todas las cuestiones científicas y técnicas. Los Comités Consultivos estudian de manera profunda los progresos científicos y técnicos que puedan tener una influencia directa sobre la metrología, preparan recomendaciones que son discutidas por el CIPM, organizan comparaciones internacionales de patrones y aconsejan al CIPM sobre los trabajos científicos a efectuar en el BIPM. Estos Comités tienen relación con los grandes laboratorios de metrología.

Los Comités Consultivos son actualmente diez y son los siguientes [10]

Comité consultivo de Electricidad (CCE)

Comité consultivo de Fotometría y Radiometría (CCPR)

Comité consultivo de Termometría (CCT)

Comité Consultivo de las Longitudes (CCL)

Comité Consultivo de Tiempo y Frecuencia

Comité Consultivo de las Radiaciones Ionizantes (CCRI)

Comité Consultivo para la Masa y Magnitudes relacionadas (CCM),

Comité Consultivo para la Cantidad de Sustancia (CCQM),

Comité Consultivo de Unidades (CCU),

Comité Consultivo de Acústica, ultrasonidos y

Vibraciones (CCAUV),

En la figura 16 esquemáticamente se ven los organismos por orden de importancia en la estructura.

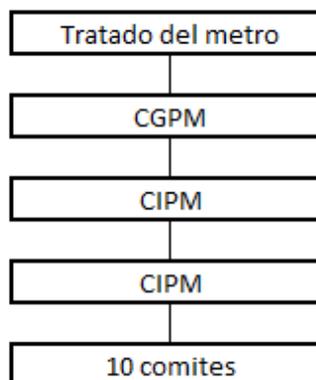


Fig. 15: El tratado del metro y los organismos que lo integran [10]

### 2.2.1.2 El perfeccionamiento del SI

Ha transcurrido cerca de medio siglo desde que empezó a integrarse el Sistema Internacional de Unidades, en los cuales se ha logrado simplificar su estructura sin dejar de cubrir todo el campo del conocimiento humano. La incorporación de nuevas unidades, de sus definiciones, del cambio de ellas motivado por el avance científico y tecnológico, ha sido únicamente después de laboriosas investigaciones y de interesantes debates efectuados en cada uno de los organismos citados que regulan la metrología científica; este sistema, por lo tanto, no es estático, sino que se adapta para responder a las exigencias de un mundo cuyas necesidades en materia de mediciones crecen. Son 7 unidades sobre las que se basa el sistema y de cuya combinación se obtienen todas las unidades derivadas [11]. En la tabla 4 se muestran para cada magnitud fundamental, la unidad y símbolo que le corresponden.

Tabla 4 Magnitudes, nombres y símbolos del SI [12]

Magnitud	Unidad	Símbolo
Longitud	metro	m
masa	kilogramo	kg
tiempo	segundo	s
corriente eléctrica	ampere	A
temperatura termodinámica	kelvin	K
intensidad luminosa	candela	cd
cantidad de sustancia	mol	mol

## 2.2.2 Magnitud

Propiedad de un fenómeno, cuerpo o sustancia, que puede expresarse cuantitativamente mediante un número y una referencia, es todo aquello que se puede medir, existen dos tipos [12]:

### 2.2.2.1 Magnitudes básicas o fundamentales

De un subconjunto elegido por convención, dentro de un sistema de magnitudes dado, de tal manera que ninguna magnitud del subconjunto pueda ser expresada en función de las otras (tabla 5) [12]

Tabla 5 Magnitudes base [13]

Magnitud de base	Símbolo de la dimensión
longitud	L
masa	M
Tiempo	T
Corriente eléctrica	I
Temperatura termodinámica	$\theta$
Cantidad de sustancia	N
Intensidad luminosa	J

#### 2.2.2.2 Magnitudes derivadas

Magnitud, dentro de un sistema de magnitudes, definida en función de las magnitudes de base de ese sistema. Por ejemplo, en un sistema de magnitudes que tenga como magnitudes de base la longitud y la masa, la densidad de masa es una magnitud derivada definida como el cociente entre una masa y un volumen (longitud elevada al cubo) [12]

#### 2.2.3. Mensurando

Magnitud que se desea medir [12]

2.2.4. Error de medición: valor medido de una magnitud menos un valor de referencia

NOTA 1 El concepto de error de medición puede emplearse:

a) cuando exista un único valor de referencia, como en el caso de realizar una calibración mediante un patrón cuyo valor medido tenga una incertidumbre de medición despreciable, o cuando se toma un valor convencional, en cuyo caso el error de medición es conocido.

b) cuando el mensurando se supone representado por un valor verdadero único o por un conjunto de valores verdaderos, de amplitud despreciable, en cuyo caso el error de medición es desconocido [12].

#### 2.2.5 Error sistemático de medición:

Componente del error de medición que, en mediciones repetidas, permanece constante o varía de manera predecible, para compensar un error sistemático conocido

puede aplicarse una corrección. El error sistemático es igual al error de medición menos el error aleatorio [12].

#### 2.2.6 Sesgo de medición:

Valor estimado de un error sistemático [12].

#### 2.2.7 Error aleatorio de medición:

Componente del error de medición que, en mediciones repetidas, varía de manera impredecible [12].

#### 2.2.8 Condición de repetibilidad de una medición:

Condición de medición, dentro de un conjunto de condiciones que incluye el mismo procedimiento de medición, los mismos operadores, el mismo sistema de medición, las mismas condiciones de operación y el mismo lugar, así como mediciones repetidas del mismo objeto o de un objeto similar en un periodo corto de tiempo [12].

#### 2.2.9. Repetibilidad de medición:

Precisión de medición bajo un conjunto de condiciones de repetibilidad [12].

#### 2.2.10. Exactitud de medición:

Grado de concordancia entre un valor medido y un valor verdadero de un mensurando [12].

#### 2.2.11. Calibración

Operación que, bajo condiciones especificadas, establece en una primera etapa, una relación entre los valores y sus incertidumbres de medición asociadas obtenidas a

partir de los patrones de medición, y las correspondientes indicaciones con sus incertidumbres asociadas y, en una segunda etapa, utiliza esta información para establecer una relación que permita obtener un resultado de medición a partir de una indicación [12].

#### 2.2.12 Trazabilidad metrológica

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 [12]

- En esta definición, la referencia puede ser la definición de una unidad de medida, mediante una realización práctica, un procedimiento de medida que incluya la unidad de medida cuando se trate de una magnitud no ordinal, o un patrón. [12]
- La trazabilidad metrológica requiere una jerarquía de calibración establecida. [12]
- La ILAC considera que los elementos necesarios para confirmar la trazabilidad metrológica son: una cadena de trazabilidad metrológica ininterrumpida a un patrón internacional o a un patrón nacional, una incertidumbre de medida documentada, un procedimiento de medida documentado, una competencia técnica reconocida, la trazabilidad metrológica al SI y los intervalos entre calibraciones. [12]
- Algunas veces el término abreviado “trazabilidad” se utiliza en lugar de “trazabilidad metrológica” así como para otros conceptos, como trazabilidad de una muestra, de un documento, de un instrumento, de un material,

etc., cuando interviene el historial (“traza”) del elemento en cuestión. Por tanto, es preferible utilizar el término completo “trazabilidad metrológica” para evitar confusión. [12]

#### 2.2.12.1 Trazabilidad de temperatura

Un laboratorio primario realiza la escala ITS 90, proporcionando los estándares nacionales de temperatura. La figura 17 ilustra cómo trabaja la trazabilidad. En la cúspide se encuentra el Laboratorio Primario realizando los estándares de temperatura definidos por la ITS 90. Debajo están los Laboratorios Secundarios (los laboratorios acreditados). Los estándares que estos laboratorios utilizan son trazables a la escala ITS 90 a través de los SPRT calibrados en los Laboratorios Primario. [3]

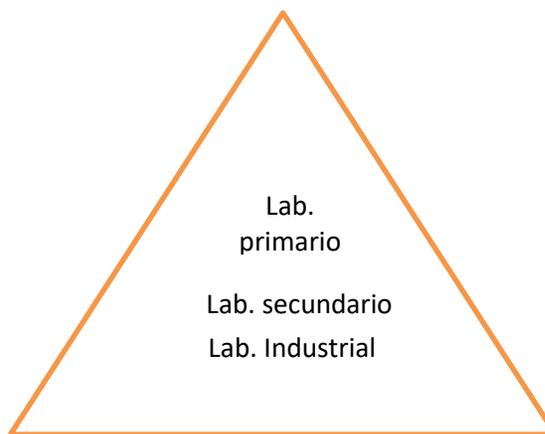


Fig. 16 Pirámide de trazabilidad [7]

En la base, se sitúan los usuarios cuyos equipos han sido comparados con los estándares de los Laboratorios Secundarios que a su vez han sido comparados con los Estándares Primarios [7]

Se reconoce la trazabilidad a:

- Laboratorios de calibración acreditados por el INACAL-DA
  - La Dirección de Metrología [13]
  - Laboratorios de calibración acreditados por organismos de acreditación signatarios de Acuerdos de Reconocimiento Mutuo de IAAC (Cooperación Interamericana de Acreditación), ILAC ó APLAC (Cooperación Asia Pacífico de laboratorios de acreditación) [13]
- Un INM (Instituto Nacional de Metrología) cuyo servicio esté cubierto por el CIPM MRA (Acuerdo de reconocimiento mutuo CIPM) [13]
  - UN INM cuyo servicio es adecuado para la necesidad prevista, pero no está cubierto por el CIPM MRA. En este caso, el OEC (Organismo de evaluación de la conformidad) deberá proporcionar al INACAL-DA la información que sustente la elección de esta opción. [13]
  - Un laboratorio de calibración acreditado cuyo servicio es adecuado para la necesidad prevista, pero que no está cubierto por el Acuerdo ILAC o por acuerdos regionales reconocidas por ILAC. En este caso, el OEC deberá proporcionar al INACAL-DA la información que sustente la elección de esta opción [13]

#### 2.2.13 Verificación:

Aportación de evidencia objetiva de que un elemento dado satisface los requisitos

especificados [12].

#### 2.2.14 Validación:

Verificación, donde los requisitos especificados son adecuados para un uso previsto.

Ejemplo: Un procedimiento de medición habitualmente utilizado para la medición de la concentración en masa de nitrógeno en agua, puede también validarse para la medición en el suero humano [12].

2.2.14.1 Veracidad de Medición: Grado de concordancia entre la media de un número infinito de valores medidos repetidos y un valor de referencia. [12]

2.2.14.2 Precisión de Medición: Grado de concordancia entre las indicaciones o los valores medidos obtenidos en mediciones repetidas de un mismo objeto o de objetos similares bajo condiciones especificadas. [12]

2.2.14.3 Robustez: La robustez de un procedimiento analítico es una medida de su capacidad para permanecer no afectado por pequeñas variaciones premeditadas de los parámetros del método. Proporciona una indicación de la fiabilidad del método durante su uso normal. [19]

#### 2.2.15 Organismo de Evaluación de la conformidad (OEC):

Organismo que desarrolla actividades de evaluación de la conformidad, tales como el ensayo o análisis, la calibración, la inspección y la certificación; y que puede ser objeto de la acreditación [14].

### 2.2.16 Incertidumbre de medida

Parámetro no negativo que caracteriza la dispersión de los valores atribuidos a un mensurando, a partir de la información que se utiliza [12].

*Nota 1:* 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. [12]

*Nota 2:* El parámetro puede ser, por ejemplo, una desviación típica, en cuyo caso se denomina incertidumbre típica de medida (o un múltiplo de ella), o la semi amplitud de un intervalo con una probabilidad de cobertura determinada. [12]

*Nota 3:* 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. [12]

Siguiendo la GUM podemos agrupar las componentes de incertidumbre en dos categorías según el método de evaluación, “tipo A” y “tipo B”. La clasificación en tipo A y tipo B no implica ninguna diferencia de naturaleza entre las componentes de estos tipos, consiste únicamente en dos formas diferentes de evaluar las componentes de

incertidumbre, y ambos se basan en distribuciones de probabilidad. [15]

#### 2.2.16.1 Evaluación tipo A

La evaluación tipo A de la incertidumbre se utiliza cuando se realizan  $n$  observaciones independientes entre sí de una de las magnitudes de entrada  $X_i$  bajo las mismas condiciones de medida. En la mayor parte de los casos, la mejor estimación disponible de la esperanza matemática  $q$  de una magnitud  $q$  que varía al azar, de la que se han obtenido  $n$  observaciones independientes en las mismas condiciones de medida, es la media aritmética de la  $n$  observaciones [15]

$$\bar{q} = \frac{\sum_{k=1}^n q_k}{n} \quad (8)$$

Los valores de las observaciones individuales  $q_k$  difieren entre sí debido a variaciones aleatorias de las magnitudes de influencia o de efectos aleatorios. La varianza  $\sigma^2$  de la distribución

de probabilidad de  $q$  se estima mediante la varianza experimental  $s^2$  de las observaciones, y viene dada por [15]:

$$s(q_k)^2 = \frac{\sum_{k=1}^n (q_k - \bar{q})^2}{n-1} \quad (9)$$

Esta estimación de la varianza y su raíz cuadrada, denominada desviación típica experimental, caracterizan la variabilidad de los valores observados  $q_k$  o, más específicamente, su dispersión alrededor de su media.

La mejor estimación de la varianza de la media [15]:

$$\sigma(\bar{q})^2 = \sigma^2/n \quad (10)$$

Viene dada por la varianza experimental de la media [15]:

$$s(\bar{q})^2 = s(q_k)^2/n \quad (11)$$

Que, junto con la desviación típica experimental de la media  $s(q_k)$ , cuantifican la bondad con que se estima la esperanza matemática  $q$ . Para una magnitud de entrada  $X_i$  determinada

partir de  $n$  observaciones repetidas e independientes, la incertidumbre típica de su estimación es [15]

$$\mu(x_i) = s(\bar{X}_i) = \frac{s(x_i)}{\sqrt{n}} \quad (12)$$

Se denomina incertidumbre tipo normal

#### 2.2.16.2 Evaluación tipo B

La evaluación tipo B de la incertidumbre típica se utiliza cuando la estimación  $x_i$  de una magnitud de entrada  $X_i$  no ha sido obtenida a partir de observaciones repetidas. La varianza estimada asociada  $\mu^2(x_i)$ , o la incertidumbre típica  $\mu(x_i)$ , se obtiene entonces mediante decisión científica

basada en la información disponible acerca de la variabilidad posible de  $X_i$ . El conjunto de la información puede comprender [15]

- resultados de medidas anteriores
- la experiencia o el conocimiento general del comportamiento y propiedades de los materiales y los instrumentos utilizados
- las especificaciones del fabricante
- los datos suministrados por certificados de calibración u otros certificados
- la incertidumbre asignada a valores de referencias procedentes de libros y manuales.

Según la fuente de la que se obtiene esa incertidumbre tipo B, ésta se estimará de

distinta manera.

Algunos ejemplos de evaluación tipo B son:

- Incertidumbre debida al patrón o instrumento calibrado

La incertidumbre típica se obtiene dividiendo la incertidumbre expandida dada en el certificado de calibración del patrón  $U(p)$  por el factor de cobertura  $k$  indicado:

$$\mu(p) = U(p)/k \quad (13)$$

- Incertidumbre debida a la resolución

Una de las fuentes de incertidumbre de un instrumento es la resolución de su dispositivo indicador, si se trata de un instrumento digital, o la incertidumbre debida a la resolución de lectura, si se trata de un instrumento analógico. En el caso del instrumento analógico la resolución depende del operador o de los medios que éste emplee en la lectura (amplificación óptica, p. ej.).

Si la resolución del dispositivo indicador es  $\delta x$ , el valor de señal de entrada que produce una indicación dada  $X$  puede situarse con igual probabilidad en cualquier punto dentro del intervalo que va de  $(X-\delta x/2)$  a  $(X+\delta x/2)$ . La señal de entrada puede describirse

entonces por medio de una distribución rectangular de rango  $\delta x$  y varianza  $\mu^2 = (\delta x)^2 / 12$ , lo que supone una incertidumbre típica para cualquier indicación de: [15]

$$\mu(d) = \delta x / \sqrt{12} \quad (14)$$

- Incertidumbre debida a la deriva del patrón

La deriva de un patrón no es fácil de determinar en muchos casos, y es un parámetro independiente y característico de cada patrón. Su valor depende, entre otros factores, de las condiciones de uso y mantenimiento, de la frecuencia de utilización, de la exactitud del instrumento, del periodo entre calibraciones, etc. Para su cálculo, se puede partir del histórico de calibraciones sucesivas del patrón y estimar una variación del valor certificado  $\delta p$ . Para la evaluación de la incertidumbre podremos aplicar un tipo de distribución rectangular o triangular según los conocimientos que tengamos del histórico del patrón [16].

#### 2.2.16.3 Tipos de distribuciones

Antes de combinar contribuciones de la incertidumbre que tienen distribuciones diferentes, es necesario representar los valores de las incertidumbres originales como incertidumbres estándar.

Para ello se determina la desviación estándar de la distribución asignada a cada fuente [16].

- Distribución normal

La desviación estándar experimental de la media calculada a partir de los resultados de una medición repetida ya representa la incertidumbre estándar. Cuando se dispone de valores de una incertidumbre expandida  $U$ , como los presentados por ejemplo en certificados de calibración, se divide  $U$  entre el factor de cobertura  $k$ , obtenido ya sea directamente o a partir de un nivel de confianza dado [16]

$$\mu(x_i) = U/k \quad (15)$$

- 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:

$$x_i = (a_+ + a_-)/2 \quad (16)$$

Y la incertidumbre estándar se calcula por:

$$\mu(x_i) = (a_+ - a_-)/\sqrt{12} \quad (17)$$

2.2.16.4 Estimación de la incertidumbre combinada y la expandida. Factor de cobertura

Una medición física, por simple que sea, tiene asociado un modelo que se aproxima al proceso real. El modelo físico se representa mediante un modelo matemático que en muchos casos supone aproximaciones. [16]

En la mayor parte de los casos, el mensurando Y, no se mide directamente, sino que se determina a partir de otras N magnitudes, X1, X2; .....; Xn, mediante una relación funcional f [15]:

$$Y = f(X_i) \quad (18)$$

La función f no expresa tanto una ley física como el proceso de medida y debe contener todas las magnitudes que contribuyen al resultado final, incluyendo las correcciones, aunque estas sean de valor nulo, para poder considerar las incertidumbres de dichas correcciones. En principio, mediante evaluación tipo A o evaluación tipo B, seríamos capaces de conocer las funciones de distribución de cada una de las magnitudes de entrada y podría derivarse de aquí la función de distribución de la magnitud indirecta. Teniendo en cuenta el desarrollo en serie de Taylor de primer orden en torno al valor esperado, gracias a las propiedades de la varianza podemos obtener la ley de propagación de incertidumbres, la cual facilita la estimación de éstas. [16]

$$\mu_c^2(y) = \sum_{i=1}^N \left( \frac{\delta f}{\delta x_i} \right)^2 (u_{x_i})^2 + 2 \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N \frac{\delta f}{\delta x_i} \frac{\delta f}{\delta x_j} \mu(x_i, x_j) \quad (19)$$

$$\mu_c^2(y) = \sum_{i=1}^N (c_i \mu(x_i))^2 + 2 \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N c_i c_j \mu(x_i)(x_j) r(x_i, x_j) \quad (20)$$

La incertidumbre combinada esta denotada con  $\mu_c(y)$

Los términos  $c_i$ ,  $c_j$  son los coeficientes de sensibilidad e indican el peso que supone cada una de las distintas magnitudes de entrada en la magnitud de salida, representada por la función de medición. El segundo término es el término de covarianza en el que aparece la influencia de unas magnitudes de entrada sobre otras, en el caso de que estas estén correlacionadas. Si las magnitudes de entrada son independientes puede simplificarse la ecuación, desapareciendo el segundo término y quedando únicamente el primero. [15]

- Incertidumbre expandida y Factor de cobertura

La incertidumbre típica combinada sirve para caracterizar la calidad de las medidas. En la práctica lo que se necesita es conocer el intervalo dentro del cual es razonable suponer, con alta probabilidad de no equivocarse, que se encuentran los infinitos valores que pueden ser “razonablemente” atribuidos al mensurando. Nos podríamos preguntar si podríamos emplear la incertidumbre típica combinada para definir dicho intervalo ( $y - u_c(y)$ ,  $y + u_c(y)$ ). En este caso, la probabilidad de que el valor verdadero del mensurando esté comprendido en el intervalo es baja ya que, en el supuesto de que la función de distribución del mensurando “y” sea una función normal, estamos hablando de un 68,3 % [16].

Para aumentar la probabilidad hasta valores más útiles de cara a la toma posterior de decisiones, podemos multiplicar la incertidumbre combinada por un número denominado “factor de cobertura”  $k$  y emplear el intervalo ( $y - \mu_c(y) k$ ,  $y + \mu_c(y) k$ ).

El producto  $k\mu_c(y) = U_p$  se denomina incertidumbre expandida, donde  $k$  es el factor de cobertura para un nivel de confianza  $p$  [16].

La incertidumbre expandida  $U$  indica entonces un intervalo que representa una fracción  $p$  de los valores que puede probablemente tomar el mesurando. El valor  $p$  también es llamado nivel de confianza y puede ser elegido a conveniencia.

En el medio industrial, a menudo se elige el nivel de confianza de manera tal que corresponde a un factor de cobertura como un número entero de desviaciones estándar en una distribución normal.

Por ejemplo, en una distribución normal,  $k=1$  corresponde a  $p=68,27\%$ ,  $k=2$  a  $p=95,45\%$  [16].

#### 2.2.17. Interpolación por Mínimos cuadrados

El método de mínimos cuadrados sirve para interpolar valores, es decir encontrar valores usando como referencia otras muestras del mismo evento.

El método consiste en acercar una línea o curva según se escoja, lo más posible a los puntos determinados por las coordenadas  $[x, f(x)]$  que normalmente corresponden a muestra de algún proceso de medición.

Sea  $(x_k, y_k)_{k=1}^n$  un conjunto de  $n$  pares con abscisas distintas y sea  $(f_j(x))_{j=1}^m$  un conjunto de  $m$  funciones literalmente independientes ( en un espacio vectorial de funciones) que se llamaran funciones base. Se desea encontrar una función  $f(x)$  de dicho espacio o sea combinación lineal de las funciones base, tomando por ello la forma:

$$(c_1 * f_1(x) + c_2 * f_2(x) + \dots + c_m * f_m(x)) = \sum_{j=1}^m c_j * f_j(x) \quad (21)$$

Ello equivale por tanto a hallar los m coeficientes:  $(c_j(x))_{j=1}^n$ . En concreto, se desea que tal función f(x) sea la mejor aproximación a los n pares  $(x_k, y_k)_{k=1}^n$  empleando, como criterio de "mejor", el criterio del mínimo error cuadrático medio de la función f(x) con respecto a los puntos  $(x_k, y_k)_{k=1}^n$

El error cuadrático medio será para tal caso:

$$E_{cm} = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n e_k^2}{n}} = \sqrt{\frac{1}{n} * \sum_{k=1}^n (y_k - f(x_k))^2} =$$

$$\sqrt{\frac{1}{n} * \sum_{k=1}^n (y_k - \sum_{j=1}^m c_j * f_j(x))^2} \quad (22)$$

Minimizar el error cuadrático medio es equivalente a minimizar el error cuadrático, definido como el radicando del error cuadrático medio, esto es:

$$E_{cm} = \sum_{k=1}^n (y_k - \sum_{j=1}^m c_j * f_j(x))^2 \quad (23)$$

Así los  $C_j$  minimizan  $E_{cm}$  también minimizan  $E_c$ , y podrán ser calculados derivando e igualando a cero este último:

$$\frac{\partial E_c}{\partial c_i} = \sum_{k=1}^n 2 * (y_k - \sum_{j=1}^m c_j * f_j(x)) * (-f_i(x)) = 0 \quad (24)$$

Siendo  $i=1, 2, \dots, m$ .

Se obtiene un sistema de m ecuaciones con m incógnitas, que recibe el nombre de "Ecuaciones normales de Gauss" Operando con ellas:

$$\sum_{k=1}^n (\sum_{j=1}^m c_j * f_j(x_k)) * f_i(x_k) = \sum_{k=1}^n y_k * f_i(x_k) \quad (25)$$

Para  $i=1,2,3,\dots,m$ .

$$\sum_{j=1}^m (\sum_{k=1}^n f_i(x_k)) * f_j(x_k) * c_j = \sum_{k=1}^n y_k * f_i(x_k) \quad (26)$$

Para  $i=1,2,\dots,m$ .

Si se desarrolla la suma, se visualiza la ecuación “i-esima” del sistema de m ecuaciones normales:

$$\begin{aligned} & \sum_{k=1}^n f_i(x_k) * f_1(x_k) * c_1 + \sum_{k=1}^n f_i(x_k) * f_2(x_k) * c_2 + \dots + \\ & \sum_{k=1}^n f_i(x_k) * f_m(x_k) * c_m \\ & = \sum_{k=1}^n y_k * f_i(x_k) \quad (27) \end{aligned}$$

Para cada  $i=1, 2,\dots, m$ .

Lo cual, en forma matricial, se expresa como:

$$\begin{array}{ccccccc} (f_1, f_1)_d & (f_1, f_2)_d & \dots & (f_1, f_m)_d & c_1 & & (f_1, f_1)_d \\ (f_2, f_1)_d & (f_2, f_2)_d & \dots & (f_2, f_m)_d & c_2 & = & (f_1, f_1)_d \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & & \dots \\ (f_m, f_1)_d & (f_m, f_2)_d & \dots & (f_m, f_m)_d & c_m & & (f_1, f_1)_d \end{array}$$

Siendo  $(a, b)_d$  el producto escalar discreto, definido para dos funciones dadas  $h(x)$

y  $g(x)$  como:

$$(h(x), g(x))_d = \sum_{k=1}^m h(x_k)g(x_k) \quad (28)$$

La resolución de dicho sistema permite obtener, para cualquier base de funciones derivables localmente, la función  $f(x)$  que sea mejor aproximación mínimos cuadrados al conjunto de puntos antes mencionado. La solución es óptima –esto es, proporciona la mejor aproximación siguiendo el criterio de mínimo error cuadrático–, puesto que se obtiene al optimizar el problema.

Tenemos un conjunto de datos:

N= 5	$x_i$	$y_i$
1	$x_1$	$y_1$
2	$x_2$	$y_2$
3	$x_3$	$y_3$
4	$x_4$	$y_4$
5	$x_5$	$y_5$

$$\begin{array}{cccccc}
 n & 1 & 2 & 3 & 4 & \\
 1 & N & \sum_{i=1}^N x_i & \sum_{i=1}^N x_i^2 & \sum_{i=1}^N x_i^3 & C1 \\
 2 & \sum_{i=1}^N x_i & \sum_{i=1}^N x_i^2 & \sum_{i=1}^N x_i^3 & \sum_{i=1}^N x_i^4 & C2 \\
 3 & \sum_{i=1}^N x_i^2 & \sum_{i=1}^N x_i^3 & \sum_{i=1}^N x_i^4 & \sum_{i=1}^N x_i^5 & C3 \\
 4 & \sum_{i=1}^N x_i^3 & \sum_{i=1}^N x_i^4 & \sum_{i=1}^N x_i^5 & \sum_{i=1}^N x_i^6 & C4
 \end{array} * =$$

$$\begin{array}{c}
 \sum_{i=1}^N y_i \\
 \sum_{i=1}^N x_i * y_i \\
 \sum_{i=1}^N x_i^2 * y_i \\
 \sum_{i=1}^N x_i^3 * y_i
 \end{array} \quad (29)$$

La resolución de dicho sistema involucra hallar la matriz inversa y operar para que nos de los coeficientes de la ecuación:

$$\begin{array}{l}
 \mathbf{C1} \\
 \mathbf{C2} \\
 \mathbf{C3} \\
 \mathbf{C4}
 \end{array}
 =
 \begin{array}{c}
 \mathbf{n} \\
 \mathbf{1} \\
 \mathbf{2} \\
 \mathbf{3} \\
 \mathbf{4}
 \end{array}
 \begin{array}{cccc}
 \mathbf{1} & \mathbf{2} & \mathbf{3} & \mathbf{4} \\
 N & \sum_{i=1}^N x_i & \sum_{i=1}^N x_i^2 & \sum_{i=1}^N x_i^3 \\
 \sum_{i=1}^N x_i & \sum_{i=1}^N x_i^2 & \sum_{i=1}^N x_i^3 & \sum_{i=1}^N x_i^4 \\
 \sum_{i=1}^N x_i^2 & \sum_{i=1}^N x_i^3 & \sum_{i=1}^N x_i^4 & \sum_{i=1}^N x_i^5 \\
 \sum_{i=1}^N x_i^3 & \sum_{i=1}^N x_i^4 & \sum_{i=1}^N x_i^5 & \sum_{i=1}^N x_i^6
 \end{array}
 \begin{array}{l}
 \\
 \\
 \\
 \\
 \end{array}
 \mathbf{-1} *$$

$$\begin{array}{l}
 \sum_{i=1}^N y_i \\
 \sum_{i=1}^N x_i * y_i \\
 \sum_{i=1}^N x_i^2 * y_i \\
 \sum_{i=1}^N x_i^3 * y_i
 \end{array}
 \quad (30)$$

Por ello tomando en cuenta que justamente los certificados de los patrones de termómetros PT-100 se realizan en 5 puntos y el polinomio de interpolación es de grado 3.

$$C1*x^3 + c2x^2 + c3x^3 + c4 = y \quad (31)$$

#### 2.2.18 Capacidad de medición y calibración (CMC)

Para obtener la acreditación en el procedimiento de calibración es necesario elaborar y presentar la mejor capacidad de medición en la calibración con dicho procedimiento, una CMC es una capacidad de medición y calibración que especifica el alcance de acreditación (rango de temperatura, resolución etc.), la cual está publicada en la página web del Instituto nacional de calidad como evidencia y disponible para los clientes. [17]

En esta declaración se deberán estimar las incertidumbres de medición de acuerdo con la "Guía para la Expresión de la Incertidumbre de la Medición" (GUM).

El alcance de la acreditación de un laboratorio de calibración expresada en la CMC debe contener:

- a) mensurando o material de referencia
- b) método/procedimiento de calibración/medición y/o el tipo de instrumento/material a ser calibrado/medido
- c) rango de medición y parámetros adicionales en caso sean aplicables, por ejemplo, la frecuencia de la tensión eléctrica aplicada
- d) incertidumbre de la medición

No debe haber ambigüedad en la expresión de la CMC especificada en los alcances de la acreditación ni, en consecuencia, en la mejor incertidumbre de la medición que un laboratorio pueda esperar lograr durante una calibración o una medición. Se debe tomar especial cuidado cuando el mensurando cubre un rango de valores. Esto se consigue generalmente mediante la utilización de uno o más de los siguientes métodos para la expresión de la incertidumbre: [17]

- (a) Un valor único, el cual sea válido en todo el rango de medición
- (b) Un rango. En este caso, el laboratorio de calibración debe definir y especificar claramente las reglas adecuadas para realizar sin dudas la interpolación con el fin de encontrar la incertidumbre en los valores intermedios.
- (c) Una función explícita del mensurando o un parámetro.
- (d) Una matriz donde los valores de la incertidumbre dependen de los valores del

mesurando y de parámetros adicionales.

(e) Una forma gráfica, siempre que haya suficiente resolución en cada eje para obtener al menos dos cifras significativas para la incertidumbre. No se permiten los intervalos abiertos en la especificación de las incertidumbres.

La incertidumbre que abarca la CMC se expresará como la incertidumbre expandida que tiene una probabilidad de cobertura específica de aproximadamente 95%. La unidad de la incertidumbre siempre será la misma que la del mesurando, por ejemplo, un porcentaje. [17]

Los laboratorios de calibración deberán proporcionar evidencia de que pueden realizar las calibraciones para sus clientes conforme de modo que las incertidumbres de medición sean iguales a aquellas abarcadas por la CMC. En la formulación de la CMC, los laboratorios deberán tomar nota del desempeño del "mejor dispositivo existente", que está disponible para una categoría específica de las calibraciones. Se debe incluir una razonable contribución a la incertidumbre por la repetibilidad y contribuciones por la reproducibilidad, cuando estén disponibles. Por otro lado, no debe existir ninguna contribución significativa a la componente de incertidumbre de la CMC atribuible a efectos físicos que pueden originarse por imperfecciones de aún el mejor dispositivo existente bajo calibración o medición. [17]

NOTA: El término "mejor dispositivo existente" se entiende como un instrumento a ser calibrado por el laboratorio o medido que esté disponible, comercialmente o no, para los clientes, incluso si tiene un desempeño especial (estabilidad) o tiene un largo historial de calibración. [17]

## **CAPÍTULO 3.**

### **PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL**

En este capítulo se presenta el desarrollo del procedimiento de calibración de termómetros analógicos y las pruebas realizadas para la definición de la CMC.

#### **3.1 Procedimiento de calibración**

##### 3.1.1 Propósito

Este procedimiento tiene por finalidad establecer y definir la sistemática a seguir por el técnico metrólogo en las calibraciones de termómetros de indicación analógica por comparación con termómetros patrones en medios isoterma de temperatura estabilizada y controlada.

##### 3.1.2 Alcance

Este procedimiento se aplica a termómetros de indicación analógica, en el alcance de  $-30\text{ °C}$  a  $200\text{ °C}$  que emplean como sensor la expansión de sólidos, gases y líquido, usando una aguja como cursor de indicación de temperatura, sobre una escala graduada

a) Los datos se anotarán en el formato de registro vigente que el laboratorio implemente.

b) El termómetro a calibrar debe estar identificado con al menos, un número de serie o código. Si no lo estuviera se procederá a la identificación por el laboratorio y se registrará en el formato correspondiente.

c) Los sensores tanto del termómetro patrón como el termómetro a calibrar deberán limpiarse antes de empezar la calibración y al intercambiarlo de un medio isotérmico a otro.

d) Se anotarán las condiciones ambientales al iniciar y al finalizar la calibración: temperatura y humedad relativa.

e) El termómetro a calibrar debe ser inspeccionado con detalle, para detectar si existen problemas de limpieza, rupturas en el visualizador que impidan ver la escala, vástago doblado, graduación defectuosa de la escala (marcas demasiado gruesas, irregularidades en la separación de las marcas de escala, numeración errada, marcas borradas), en caso detectarse se puede rechazar un termómetro.

f) En general debe rechazarse si por cualquier motivo se advierte que el termómetro presenta problemas con el dial, esto se puede probar: Antes de empezar la calibración, sumergir el vástago del termómetro por lo menos una vez en los baños termostáticos fríos y calientes con temperaturas en el valor máximo y mínimo de la calibración, si se identifica problemas con el dial se detendrá la calibración.

### 3.1.3 Proceso de Calibración

a) Registrar en el formato F-CAL-TIA-01 “Registro de Calibración de Termómetros de Indicación Analógica”. (Anexo 1)

b) Antes de comenzar las medidas debe asegurarse una profundidad de inmersión adecuada en el medio isoterma de los sensores del termómetro a calibrar, para evitar problemas de conducción térmica. La profundidad de inmersión se determina introduciendo en su totalidad el sensor en el medio isoterma y sacándolo paulatinamente hasta observar que existen variaciones significativas de las medidas del termómetro. La profundidad de inmersión está en el margen en el que la temperatura no varía significativamente. Esta prueba se realizará en una temperatura bastante alejada de la temperatura ambiente que esté dentro del margen de calibración del termómetro (valores cercanos al máximo o mínimo del alcance). En el caso de los termómetros que cuente con una conexión roscada la profundidad de inmersión debe considerar dicha conexión.

c) Alcanzada la temperatura de calibración, ubicar el sensor del termómetro patrón y el termómetro a calibrar en el medio isotérmico, dar ligeros golpes con el dedo sobre la luneta del termómetro a calibrar para eliminar esfuerzos mecánicos internos posibles.

d) Colocar el sensor del termómetro a calibrar en el medio isotérmico lo más cercano posible a los sensores de los termómetros patrones (tener en cuenta que estos no se encuentren en contacto).

e) Se comienza la calibración en el punto de temperatura más baja. La calibración

se realizará en puntos de temperaturas crecientes.

f) Las lecturas del termómetro a calibrar se harán con la mayor aproximación posible de la división de escala, evitando el error de paralaje, para lo cual si se considera necesario se podrá hacer uso de un dispositivo óptico la aproximación dependerá de la uniformidad de las marcas de escala, la distancia entre ellas, espesor, agudeza visual y experiencia del observador.

g) Si el termómetro a calibrar tiene posibilidad de ajuste, se realizarán las medidas previas necesarias y suficientes para determinar si el termómetro necesita ajuste. El ajuste solo se hará previa consulta con el cliente; si se realiza el ajuste se anotará las correcciones del termómetro previas al ajuste en la hoja de medición para incluirlas en el certificado de calibración.

#### 3.1.4 Calibración

Para comprobar si el medio isoterma está lo suficientemente estable se seguirá el siguiente proceso de lectura, que se repetirá para cada punto de calibración:

- 1) Lectura del primer patrón, corregida según su certificado,  $t_{11}$ .
- 2) Lectura del termómetro a calibrar,  $t_{x1}$ .
- 3) Lectura del segundo patrón, corregida según su certificado,  $t_2$ .
- 4) Lectura del termómetro a calibrar,  $t_{x2}$ .
- 5) Lectura del primer patrón, corregida según su certificado,  $t_{12}$ .

En este proceso, si el valor absoluto de la diferencia entre la temperatura del primer patrón (promedio de  $t_{11}$  y  $t_{12}$ ) y del segundo ( $t_2$ ) es mayor que la peor uniformidad obtenida para el medio isoterma durante su caracterización y/o calibración, entonces se repetirá la medida por no haber suficiente uniformidad en el medio isoterma.

De la misma manera se repetirá la medida en el punto de calibración por falta de estabilidad si se observa que el valor absoluto de las diferencias entre las dos lecturas del primer patrón  $|t_{11} - t_{12}|$  es mayor que el doble de la peor estabilidad obtenida para el medio isoterma durante su caracterización y/o calibración (Anexo 2)

Se considera que la diferencia entre las lecturas de los dos patrones puede ser debida a la falta de uniformidad del medio isoterma. Se permite que dicha diferencia esté dentro de los límites de la uniformidad del medio isoterma utilizado, para asegurarse de que las medidas se han tomado con el medio isoterma suficientemente uniforme (sistema bajo control estadístico), si persiste la condición de falta de uniformidad se debe evaluar las condiciones del baño termostático para un mantenimiento y una nueva caracterización y/o calibración.

Se considera que la diferencia entre la primera y la segunda medida del primer patrón puede ser debida a la falta de estabilidad del medio isoterma. Se permite que dicha diferencia esté dentro de los límites de estabilidad del medio isoterma utilizado, para asegurarse de que las medidas se han tomado con el medio isoterma suficientemente estable (sistema bajo control estadístico). Se toma el doble de la peor estabilidad obtenida durante la caracterización y/o calibración del medio isoterma debido a que dicho valor da la peor variación esperada para las ondas térmicas de pico a pico, si persiste la condición de falta de estabilidad, se debe evaluar las condiciones del baño termostático para un mantenimiento y una nueva caracterización y/o calibración.

La temperatura asignada a cada punto de calibración será la media de las temperaturas obtenidas con los patrones corregidos según sus certificados de calibración. Esta media se obtiene primero para las temperaturas determinadas por el primer patrón ( $t_1$ ) y después se vuelve a hacer la media para los dos patrones.

En cada punto de calibración se recomienda hacer sólo uno de los ciclos indicados y no se realizará ningún tipo de cálculo estadístico con dichas medidas ya que están altamente correlacionadas. El tomar dos medias de los patrones y dos del termómetro a calibrar es para asegurarse de la estabilidad y uniformidad del baño tal como se ha visto arriba.

La medida de la dispersión estadística es costosa en tiempo, por lo que se prefiere hacer pruebas de repetibilidad en un único punto de calibración seleccionado.

La temperatura asignada a cada punto de calibración es la media de las temperaturas obtenidas con los patrones. Esta media se obtiene primero para las temperaturas determinadas por el primer patrón ( $t_1$ ) y después se vuelve a realizar la media para los dos patrones.

### 3.1.5 Pruebas de estabilidad

#### 3.1.5.1 Prueba de Histéresis:

Una vez alcanzado el punto de temperatura más alto (en sentido ascendente) se procede a elevar un poco más la temperatura del baño, una vez que el termómetro a calibrar alcance esa temperatura se procede a bajar la temperatura del medio isoterma (sentido descendente) hasta alcanzar los mismos puntos (o valores muy cercanos) alcanzados cuando se realizó el sentido ascendente. Se anotan los valores dados.

#### 3.1.5.2 Prueba de Repetibilidad:

Llevamos el medio isoterma a un punto seleccionado, una vez medido el primer valor del termómetro se procede a retirar este del medio isoterma, esperar entre 3 a 5 minutos aproximadamente, e introducirlo nuevamente en el medio isoterma. Se esperan los tiempos de estabilización correspondientes y se anota la lectura, se repite hasta obtener 5 lecturas.

### 3.1.6 Análisis de datos

Para cada punto de calibración se anota los siguientes datos:

Los valores en grados Celsius que indican los patrones,  $t1$  y  $t2$  (cuya media es  $t1$  y  $t2$ ). Con estos datos se realizan los cálculos correspondientes para asegurar la estabilidad y uniformidad del baño.

Los valores en grados Celsius que indican el termómetro a calibrar,  $tx1$  y  $tx2$ , con los que se calcula la media,  $tx$ .

La corrección,  $C$ , según:

$$C = t1 + t2/2 - tx \quad (33)$$

Los resultados de la calibración se indican en una tabla donde aparece para cada punto de calibración: la temperatura de los patrones (media de  $t1$  y  $t2$ ), del termómetro ( $tx$ ), corrección ( $C$ ) e incertidumbre de calibración.

b) Prueba de Histéresis

La histéresis:

La histéresis se obtiene por punto:

$$h = \text{Máximo (Casc;Cdesc)} - \text{Mínimo (Casc;Cdesc)}$$

Casc: Corrección ascendente

Cdesc: Corrección descendente

### 3.1.7 Estimación de la incertidumbre:

#### 3.1.7.1 Cálculo de Incertidumbre

Para el cálculo de las incertidumbres del sistema de calibración (patrones y medios isotermos) y por otro las correspondientes al termómetro a calibrar, durante la calibración, que variarán según sus características y comportamiento. Las del sistema son debidas a la calibración, deriva, lectura y resolución de los patrones, magnitudes de influencia sobre los patrones, interpolación o correcciones del certificado no realizadas y a la estabilidad y uniformidad de los baños. Para el termómetro a calibrar siempre tendremos la incertidumbre de lectura (resolución), la debida a la repetibilidad, histéresis y/o uniformidad (según el sensor y las magnitudes de influencia).

#### 3.1.7.2 Estimación de la incertidumbre del sistema de calibración

La temperatura indicada por los patrones,  $t_{ref}$ , es la media de los dos patrones utilizados,  $t_1$  y  $t_2$ , ya corregidas según los resultados del certificado de calibración y con una serie de correcciones adicionales que intervienen, escribimos a continuación:

$$t_{ref} = \frac{1}{2} [t_1 + \delta t_{c1} + \delta t_{d1} + \delta t_{1,res} + \delta t_{1,mi} + \delta t_{1,int} + t_2 + \delta t_{c2} + \delta t_{d2} + \delta t_{2,res} + \delta t_{2,mi} + \delta t_{2,int}] + \delta t_u + \delta t_e \quad (1)$$

$\delta t_{c1}$ ,  $\delta t_{c2}$ : correcciones en la temperatura indicada por el primer y segundo patrón debido a la incertidumbre de calibración.

$\delta t_{d1}$ ,  $\delta t_{d2}$ : correcciones en la temperatura indicada por el primer y segundo patrón debido a la deriva entre calibraciones.

$\delta t_{1,res}, \delta t_{2,res}$ : correcciones en la temperatura indicada por el primer y segundo patrón debido a la resolución de los termómetros patrón.

$\delta t_{1,mi}, \delta t_{2,mi}$ : correcciones en la temperatura indicada por el primer y segundo patrón debido a magnitudes de influencia.

$\delta t_{1,int}, \delta t_{2,int}$ : correcciones en la temperatura indicada por el primer y segundo patrón debidas al error de interpolación en los resultados del certificado.

$\delta t_u$ : correcciones en la temperatura indicada por los patrones debido a la falta de uniformidad del baño de calibración.

$\delta t_e$ : correcciones en la temperatura indicada por los patrones debido a la falta de estabilidad del baño de calibración.

$\delta t_{x,res}$ : corrección en la temperatura indicada por el termómetro a calibrar debido a la resolución.

$\delta t_{x,mi}$ : corrección en la temperatura indicada por el termómetro a calibrar debido a las magnitudes de influencia con efectos significativos sobre él.

$\delta t_r$ : corrección en la temperatura indicada por el termómetro a calibrar debido a su falta de repetibilidad

$\delta t_h$ : corrección en la temperatura indicada por el termómetro a calibrar debido a su histéresis.

Para el cálculo de la incertidumbre se aplica la ley de propagación de incertidumbre en la ecuación (1), donde se considera que las correcciones de temperatura

son nulas, se hacen correcciones a las lecturas de los patrones por incertidumbre de calibración, deriva, resolución, error de interpolación, magnitudes de influencia y estabilidad, y uniformidad de los baños, pero estas son nulas, mientras que no lo son sus incertidumbres. Se considera también que todas las variables de (1) no tienen correlación

$$\begin{aligned}
 u^2(t_{ref}) = & c1^2u^2t1 + c2^2u^2t2 + c3^2u^2(\delta t1) + c4^2u^2(\delta tc2) + \\
 & c5^2u^2(\delta td1) + c6^2u^2(\delta td2) + c7^2u^2(\delta td2) + c8^2u^2t1, res + c9^2u^2\delta t1, min + \\
 & c10^2u^2(\delta t2, min) + c11^2u^2(\delta 1, min) + c12^2u^2(\delta t2, min) + \\
 & 2c7c8r(\delta t1res, \delta t2res)u(\delta t1, res)u(\delta t2, res) + 2c1c2r(t2, t2)u(t1)u(t2) + \\
 & 2c3c4r(\delta tc1, \delta tc2)u(\delta ct1)u(\delta ct2) + + u^2(\delta te) + u^2(\delta tu) \quad (34)
 \end{aligned}$$

En la ecuación (2), los términos de  $u(t1)$  y  $u(t2)$  en general no se consideran, ya que no se hacen medidas estadísticamente significativas en cada punto de calibración. Se han incluido los términos de correlación que pueden ser distintos de cero, las lecturas y la resolución, en el caso de que las lecturas de los patrones se realicen con el mismo equipo de lectura, o la incertidumbre de calibración, en el caso de que las calibraciones se hayan realizado con los mismos equipos o procedimientos. El resto de las variables se considera que no están correlacionadas. En cuanto a los coeficientes de sensibilidad, sólo se han escrito los que salen distintos de 1 al derivar con respecto a cada variable en (2), que valen:

$$c1 = c2 = c3 = c4 = c5 = c6 = c7 = c8 = c9 = c10 = c11 = c12 = 1 / 2 \dots\dots\dots (35)$$

Un caso particular es el de correlación total (de incertidumbre más alta o cota superior a la incertidumbre) cuando los coeficientes de correlación  $r(t1, t2)$

$r(\delta t1, res, \delta t2, res)$  y  $r(\delta tc1, \delta tc2)$  toman como máximo el valor 1. En este caso la ecuación (1) se puede simplificar de la forma.

$$u^2(t_{ref}) = 1/4(u(t1) + u(t2))^2 + 1/4(u(\delta tc1) + u(\delta tc2))^2 + 1/4(u(\delta t1, res) + u(\delta t2, res))^2 + \frac{1}{4}u^2(\delta td1) + \frac{1}{4}u^2(\delta td2) + \frac{1}{4}u^2(\delta ti, min) + 1/4 u^2(\delta t2, min) + 1/4u^2(\delta t1, int) + 1/4u^2(\delta t2, int) + u^2(\delta te) + u^2(\delta tu) \quad (36)$$

### 3.1.7.3 Estimación de la incertidumbre de la corrección

Se calcula la corrección C, del termómetro, es decir, la diferencia entre la temperatura del baño que indican los patrones,  $t_{ref}$ , y la indicada por el termómetro,  $t_x$ , con sus correcciones, en cada apunto de calibración:

$$C = t_{ref} - (t_x + \delta t_{xres} + \delta t_h + \delta t_r + \delta t_{xmin}) \dots (37)$$

Estimación de la incertidumbre de la corrección:

$$u^2(C) = u^2(t_x) + u^2(\delta t_{x, res}) + u^2(\delta t_h) + u^2(\delta t_r) + u^2(t_{x, min}) + u^2(\delta t_{ref}) \dots (38)$$

Cada término de incertidumbre se explica a continuación:

$u(t_x)$ : Es la incertidumbre de la lectura del termómetro. Como no se hacen medidas estadísticamente significativas en cada punto de calibración no se puede considerar esta contribución.

$u(t_{x,div})$ : La incertidumbre debida a la división de escala determinada del termómetro entre  $a\sqrt{3}$  donde  $a$  es el número de partes en que se puede subdividir la división de escala del termómetro a calibrar.

$u(\delta t_r)$  :La repetibilidad se estima según la desviación estándar dada, la incertidumbre se obtiene de dividirla por  $\sqrt{n}$  donde  $n$  es el número de repeticiones.

$u(\delta t_h)$ : La histéresis se obtiene de dividir la histéresis  $h$  por  $\sqrt{3}$ .

$u(\delta t_{mi})$ : En algunos casos pueden existir magnitudes de influencia con efectos significativos, sobre el termómetro a calibrar, en cuyo caso sería necesario evaluar su influencia en las condiciones de calibración.

$u(t_{ref})$ : la incertidumbre del sistema de calibración.

### **3.2 Aplicación experimental del procedimiento de calibración de tres termómetros analógicos**

#### 3.2.1 Equipos bajo prueba:

En este trabajo se van a realizar las pruebas de tres termómetros de indicación analógica cuyas características se presentan en la tabla 6, están denominados como Termómetro 1, Termómetro 2, y Termómetro 3.

Tabla 6 Características de instrumentos bajo prueba

	Termómetro 1	Termómetro 2	Termómetro 3
Alcance	0 °C a 200 °C	-20 °C a 60 °C	0 °C a 160 °C
Resolución	1 °C	1 °C	1 °C
Identificación	8281	KT19-131	KT19-132
Puntos de calibración	0 °C; 70 °C; 200 °C	-20 °C; 0 °C; 60 °C	10 °C; 80 °C; 160 °C
EMP (Error máximo permisible)	1 °C	2 °C	2 °C

### 3.2.2 Modelo de medición

El mensurando corresponde a la corrección de indicación del termómetro para cada uno de los puntos de calibración.

La corrección aplicada a la indicación del termómetro a calibrar en cada uno de los puntos de calibración se define como:

$$C = T - tx \quad (32)$$

Donde:

T: Temperatura Kelvin Internacional definida por la ITS-90.

tx: Temperatura indicada por el termómetro sometido a calibración

- Método de calibración:

Los equipos sujetos a calibración son termómetros analógicos con sensores

bimetálicos, la calibración se realiza por método directo de comparación entre la lectura del termómetro bajo calibración contra el valor de las lecturas del termómetro patrón.

La corrección se determina a partir de la diferencia entre el valor calculado de la temperatura convencionalmente verdadera (TCV) obtenida con el sistema de medición menos el promedio de las lecturas del termómetro bajo calibración.

### 3.2.3 Equipamiento usado

Se usa los instrumentos de referencia (patrones) siguientes:

- a) Termómetro de platino patrón

Marca: Delta Ohm

Modelo: HD2107.2

Certificado de calibración: TE-333-B-2020 (Anexo 2)



Fig 17: Termómetro de resistencia de platino ( foto propia)

## b) Baños termostáticos de temperatura controlada

En la siguiente tabla se muestra los baños termostáticos que se usaron para nuestro experimento.

Tabla 7 Baños termostático utilizados

	Baño termostático de alcohol	Baño termostático de agua	Baño termostático de aceite
Marca	JULABO	LAUDA	JULABO
Modelo	FP40	RA8	FK31-SE
Certificado	LT-0680-2020 (Anexo 2)	LT-0744-2020 (Anexo 2)	LT-0882-2020 (Anexo 2)
Rango de uso	-30 °C a 0 °C	10 °C a 80 °C	80 °C a 200 °C

En las siguientes figuras se muestran los modelos de los baños termostáticos

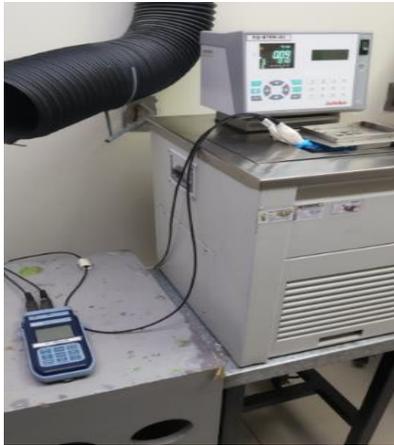


Fig. 19 Baño termostático de alcohol (foto propia)



Fig 18 Baño termostático de agua (foto propia)



Fig 20 Baño termostático de aceite (foto propia)

c) Medidor de condiciones ambientales

Para las mediciones de condiciones ambientales (temperatura y humedad) se usó el siguiente instrumento.

Marca: Delta Ohm

Modelo: HD2001

Alcance: 10 °C a 35 °C / 10 %hr a 90 %hr

Certificado de Calibración: LH-093-2020 (Anexo 2)



Fig 21 Instrumento medidor de condiciones ambientales (foto propia)

### **3.3 Inicio de prueba**

#### 3.3.1 Operaciones previas

Se tomaron las condiciones ambientales durante la calibración de cada termómetro analógico, tal como indica nuestro procedimiento.

Tabla 8 Tabla de condiciones ambientales

## Condiciones ambientales termómetro 1

Temperatura inicial: 20,5 °C	Humedad Relativa Inicial: 49 %
Temperatura final: 21,2 °C	Humedad Relativa Final: 50 %

## Condiciones ambientales termómetro 2

Temperatura inicial: 22 °C	Humedad Relativa Inicial: 49 %
Temperatura final: 21,9 °C	Humedad Relativa Final: 50,1 %

## Condiciones ambientales termómetro 3

Temperatura inicial: 22 °C	Humedad Relativa Inicial: 49,7 %
Temperatura final: 22,2 °C	Humedad Relativa Final: 50,4 %

## 3.3.2 Mediciones

La longitud de los sensores es de 15 cm, inicialmente se sumergen por completo y posteriormente la profundidad de los sensores en el líquido lo vamos disminuyendo para observar si en algún punto hay un cambio de temperatura de

acuerdo con lo que se muestra en la tabla 9.

Tabla 9 Datos de prueba de profundidad de inmersión

Instrumento 1		
Profundidad total	15,0 cm	- 10 °C
Profundidad 1	10,0 cm	-10 °C
Profundidad 2	5,0 cm	-10 °C
Profundidad 3	3,0 cm	-10 °C
Profundidad 4	1,0 cm	-10 °C
Instrumento 2		
Profundidad total	15,0 cm	15 °C
Profundidad 1	10,0 cm	15 °C
Profundidad 2	5,0 cm	15 °C
Profundidad 3	3,0 cm	15 °C
Profundidad 4	1,0 cm	15 °C

## Instrumento 3

---

Profundidad total	15,0 cm	15 °C
Profundidad 1	10,0 cm	15 °C
Profundidad 2	5,0 cm	15 °C
Profundidad 3	3,0 cm	15 °C
Profundidad 4	1,0 cm	15 °C

---

Observamos si hubiera alguna variación en el cambio de su temperatura, se ve que no hay variación de esta manera aseguramos que no hay pérdida de calor al tener diferente profundidad de inmersión.

Podemos concluir que no hay variación de temperatura para los tres termómetros, se puede sumergir en cualquier profundidad, se elige 15 cm.

En la siguiente figura se ha hecho un esquema de un termómetro de indicación analógica cuyo sensor ha sido sumergido a tres diferentes profundidades.

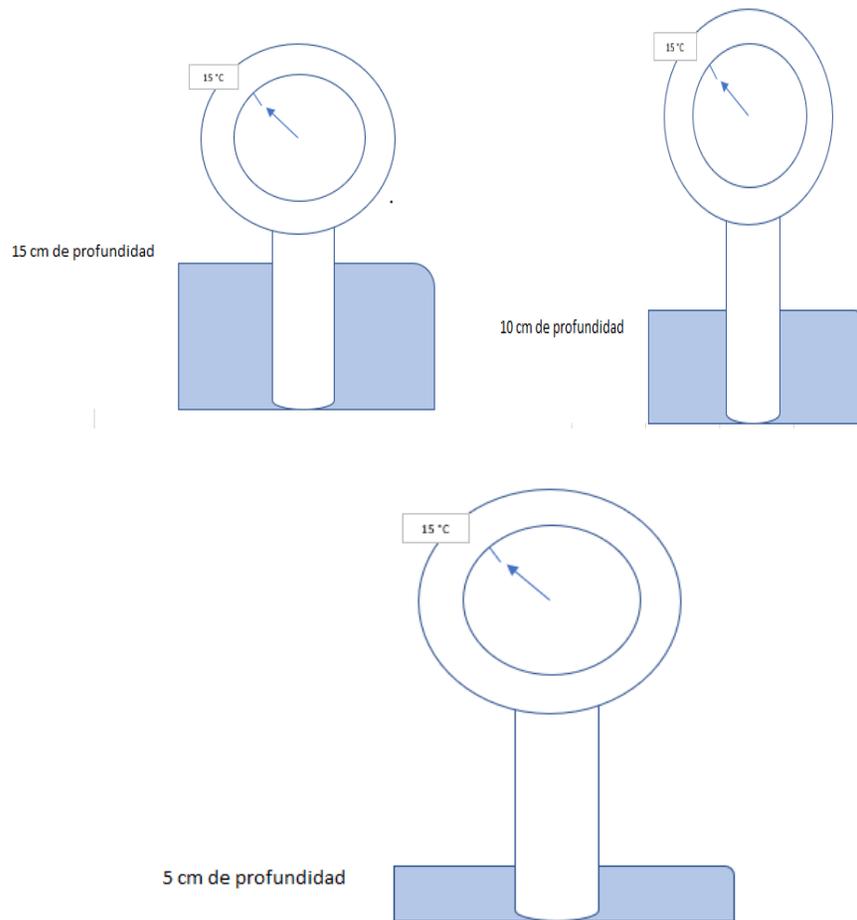


Fig 22: Termómetro sumergido a diferentes profundidades (gráfica de elaboración propia)

Se realiza la calibración en los puntos de medición solicitados para cada termómetro, se setea el baño isotérmico en los puntos requeridos, antes se debe colocar el sensor del termómetro patrón y el termómetro a calibrar en el baño termostático de manera apropiada, y luego se realiza la comparación de las medidas, la toma de datos será en las series indicadas en el procedimiento descrito al comienzo del capítulo, y la toma de datos por cada punto esta detallada en el siguiente capítulo. En la figura 24 se muestra el

esquema de la calibración de un termómetro de indicación analógica en el cual se observa que el instrumento a calibrar y los dos sensores del instrumento patrón se colocan de manera cercana dentro del baño termostático

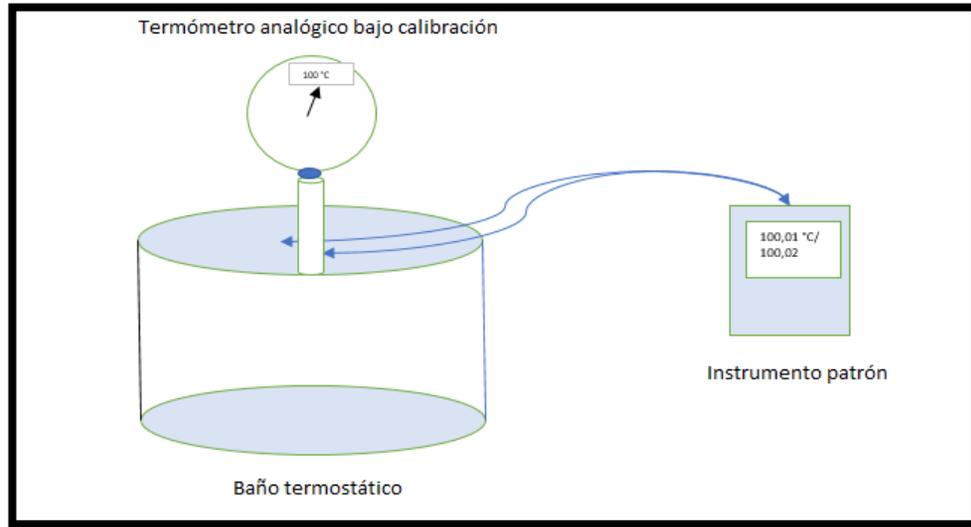


Fig. 23: Comparación de termómetros ( gráfica de elaboración propia)

El termómetro analógico se sumerge 15 centímetros, se coloca a la misma altura la terminación de los dos sensores PT-100, a 15 cm también, según lo indicado en nuestro procedimiento, luego se cambia el seteo por cada punto de medición solicitado para cada instrumento a calibrar.

## CAPÍTULO 4

### RESULTADOS Y DISCUSIONES

A continuación, se colocan los datos observados en los termómetros patrón y los instrumentos a calibrar siguiendo la serie indicada por el procedimiento.

Tabla 10 Indicación de los instrumentos tomados sin corregir

#### Toma de datos del termómetro 1

Puntos de calibración (°C)	Lectura primer patrón (°C)	Lectura del termómetro a calibrar (°C)	Lectura segundo patrón (°C)	Lectura del termómetro a calibrar (°C)	Lectura primer patrón (°C)	Esta suficient e estable y/o uniforme
0	0,00	0	0,01	0	0,00	OK
70	70,00	70	70,02	70	70,01	OK
200	199,99	200	200,00	200	199,98	OK

## Toma de datos del termómetro 2

Puntos de calibración (°C)	Lectura primer patrón (°C)	Lectura del termómetro a calibrar (°C)	Lectura segundo patrón (°C)	Lectura del termómetro a calibrar (°C)	Lectura primer patrón (°C)	Esta suficient e estable y/o uniforme
-20	-20,12	-20	-20,10	-20	-20,11	OK
0	0,01	0	0,02	0	0,00	OK
60	60,01	60	60,02	60	60,01	OK

## Toma de datos del termómetro 3

Puntos de calibración (°C)	Lecturas primer patrón (°C)	Lecturas del termómetro a calibrar (°C)	Lectura segundo patrón (°C)	Lectura primer patrón (°C)	Lecturas primer patrón (°C)	Esta suficient e estable y/o uniforme
10	10,12	10	10,11	10	10,12	OK
80	80,11	80	80,12	80	80,12	OK
160	160,00	160	160,01	160	159,99	OK

Siguiendo lo indicado en el procedimiento se verifica en cada serie que la medición se ha realizado de manera estable y uniforme, la lectura del primer patrón y el segundo son similares, igualmente la primera medición del patrón y la última, de esta manera se evidencia que las mediciones se han realizado de manera estable y uniforme.

#### **4.1 Cálculo del valor verdadero del instrumento de referencia (valor corregido del patrón)**

Los valores encontrados en los patrones deben corregirse basado en sus resultados de calibración para encontrar los valores verdaderos.

Para hallar las correcciones de los patrones usamos el método de interpolación por mínimos cuadrados ya que los valores de calibración no son exactamente los valores que hemos obtenido, para ellos realizamos una aproximación por polinomio de grado 3 al termómetro patrón:

Tabla 11 Datos del certificado de calibración del patrón de referencia primer sensor

Corrección (°C)	Indicación (°C)	Incertidumbre (°C)
0,06	-32,16	0,026
0,021	-0,01	0,026
-0,026	70,03	0,031
-0,022	150,02	0,035
-0,006	199,99	0,039

Tenemos 5 puntos por lo cual siguiente lo indicado en nuestra parte teórica seguimos los pasos para calcular el polinomio de interpolación.

$$A \cdot C = Y$$

Hallamos la matriz de variable dependiente

$\Sigma(y)$	$2,7 \times 10^{-2}$
$\Sigma(y \cdot x)$	-8,25097
$\Sigma(y \cdot x^2)$	$-8,01 \times 10^2$
$\Sigma(y \cdot x^3)$	$-133 \times 10^5$

Hallamos la matriz de variable independiente

5	387,87	68440	$1,1685 \times 10^7$
387,87	68440	$1,1685 \times 10^7$	$2,1313 \times 10^9$
68440	$1,1685 \times 10^7$	$2,1313 \times 10^9$	$3,9756 \times 10^{11}$
$1,1685 \times 10^7$	$2,1313 \times 10^9$	$3,9756 \times 10^{11}$	$7,5500 \times 10^{13}$

Hallamos la matriz inversa de la variable independiente

$5,9913 \times 10^{-1}$	$5,9875 \times 10^{-3}$	$-1,8227 \times 10^{-4}$	$6,9804 \times 10^{-7}$
$5,9875 \times 10^{-3}$	$4,3980 \times 10^{-4}$	$-6,4576 \times 10^{-6}$	$2,0662 \times 10^{-8}$
$-1,8227 \times 10^{-4}$	$-6,4576 \times 10^{-6}$	$1,3840 \times 10^{-7}$	$-5,1829 \times 10^{-10}$

Haciendo la multiplicación hallamos la matriz de coeficientes

$$a_0 = 1,9717 \times 10^{-2}$$

$$a_1 = -1,0495 \times 10^{-3}$$

$$a_2 = 6,5940 \times 10^{-6}$$

$$a_3 = -9,9113 \times 10^{-9}$$

Obtenemos la ecuación de interpolación

$$-9,9113 \times 10^{-9} * x^3 + 6,5940 \times 10^{-6} * x^2 - 1,0495 \times 10^{-3} * x + 1,9717 \times 10^{-2} \quad (39)$$

Realizamos lo mismo para el segundo patrón de referenciar:

Corrección (°C)	Indicación (°C)	Incertidumbre (°C)
0,050	-32,00	0,026
0,021	0,01	0,026
-0,036	70,00	0,031
-0,032	150,00	0,035
-0,006	199,98	0,039

Tenemos 5 puntos por lo cual siguiente lo indicado en nuestra parte teórica seguimos los pasos para calcular el polinomio de interpolación.

## Hallando la matriz de variable dependiente

---

$\Sigma(y)$	$-3 \times 10^{-3}$
$\Sigma(y \cdot x)$	-10
$\Sigma(y \cdot x^2)$	$-1 \times 10^3$
$\Sigma(y \cdot x^3)$	$-2 \times 10^5$

---

## Hallando la matriz variable independiente

---

5	$3,88 \times 10^2$	$6,8418104 \times 10^4$	$1,1683 \times 10^7$
$3,88 \times 10^2$	$6,8418104 \times 10^4$	$1,1683 \times 10^7$	$2,1308 \times 10^9$
$6,8418104 \times 10^4$	$1,1683 \times 10^7$	$2,1308 \times 10^9$	$3,9745 \times 10^{11}$

---

## Hallando la matriz inversa

---

$5,9760 \times 10^{-1}$	$5,9981 \times 10^{-3}$	$-1,8217 \times 10^{-4}$	$6,9743 \times 10^{-7}$
$5,9981 \times 10^{-3}$	$4,4420 \times 10^{-4}$	$-6,5234 \times 10^{-6}$	$2,0883 \times 10^{-8}$
$-1,8217 \times 10^{-4}$	$-6,5234 \times 10^{-6}$	$1,3934 \times 10^{-7}$	$-5,2140 \times 10^{-10}$

---

Haciendo la multiplicación hallamos la matriz de coeficientes

$$a_0 = 1,6645 \times 10^{-2}$$

$$a1 = -9,8370 \times 10^{-4} \times 10^{-4}$$

$$a2 = 3,9751 \times 10^{-6}$$

$$a3 = 2,0097 \times 10^{-9}$$

Obtenemos la ecuación de interpolación

$$2,0097 \times 10^{-9} * x^3 + 3,9751 \times 10^{-6} - 9,8370 \times 10^{-4} * x + 1,6645 \times 10^{-2} \quad (40)$$

En la siguiente tabla volvemos a colocar nuestros datos, pero con las correcciones halladas de los patrones gracias a la interpolación podemos redefinir nuestras tablas, pero con sus valores verdaderos:

Tabla 12 Toma de datos corregidos del termómetro de referencia

Valores medidos para el primer instrumento con los valores verdaderos de los patrones.

Puntos de calibración (°C)	Lectura primer patrón corregida (°C)	Lectura del termómetro a calibrar (°C)	Lectura segundo patrón corregida (°C)	Lectura del termómetro a calibrar (°C)	Lectura primer patrón corregida (°C)
0	0,02	0	0,027	0	0,02
70	69,975	70	69,988	70	69,985
200	199,984	200	199,975	200	199,974

Valores medidos para el segundo instrumento con los valores verdaderos de los

patrones.

Puntos de calibración (°C)	Lectura primer patrón corregida (°C)	Lectura del termómetro a calibrar (°C)	Lectura segundo patrón corregida (°C)	Lectura del termómetro a calibrar (°C)	Lectura primer patrón corregida (°C)
-20	-20,076	-20	-20,062	-20	-20,066
0	0,030	0	0,037	0	0,02
60	59,988	60	59,992	60	59,988

Valores medidos para el tercer instrumento con los valores verdaderos de los patrones.

Puntos de calibración (°C)	Lectura primer patrón corregida (°C)	Lectura del termómetro a calibrar (°C)	Lectura segundo patrón corregida (°C)	Lectura del termómetro a calibrar (°C)	Lectura primer patrón corregida (°C)
10	10,12	10	10,11	10	10,130
80	80,11	80	80,12	80	80,093
160	160	160	160,01	160	159,970

**4.2 Cálculo de las correcciones:**

$$(t_{p1} + t_{p2}) / 2 - t_x = C \quad (41)$$

$t_{p1}$ : Indicación del termómetro patrón corregido 1

$t_{p2}$ : Indicación del termómetro patrón corregido 2

$t_x$ : Indicación del termómetro a calibrar

Tabla 13 Correcciones de los instrumentos bajo calibración

Correcciones en los puntos solicitado del termómetro 1

Puntos de calibración	Corrección
0 °C	0,02 °C
70 °C	-0,02 °C
200 °C	-0,02 °C

Correcciones en los puntos solicitado del termómetro 2

Puntos de calibración	Corrección
-20 °C	-0,07 °C
0 °C	0,03 °C
60 °C	-0,01 °C

## Correcciones en los puntos solicitado del termómetro 3

Puntos de calibración	Corrección
10 °C	0,12 °C
80 °C	0,09 °C
160 °C	-0,02 °C

**4.3 Estimación de la incertidumbre:**

Tabla 14 Estimación de las componentes de incertidumbres del método de calibración empleado

Componentes de incertidumbre del sistema calibración del primer termómetro en el punto 0 °C.

Magnitud $x_i$	Estimación	Incertidumbre típica (°C)	Distribución de probabilidad considerada	
$t_1$	$(T_{p1}+t_{p2})/\sqrt{2}$	0	---	
$t_2$	$t_2$	0	---	
$\partial t_{c1}$	0	$\mu(\partial t_{c1})$	0,02	Normal
$\partial t_{c2}$	0	$\mu(\partial t_{c2})$	0,02	Normal
$\partial t_{d1}$	0	$\mu(\partial t_{d1})$	0,023	Rectangular
$\partial t_{d2}$	0	$\mu(\partial t_{d2})$	0,023	Rectangular
$\partial t_{1,res}$	0	$\mu(\partial t_{1,res})$	0,003	Rectangular
$\partial t_{2,res}$	0	$\mu(\partial t_{2,res})$	0,003	Rectangular
$\partial t_{1,mi}$	0	$\mu(\partial t_{1,mi})$	0	Rectangular

$\partial t_{2,mi}$	0	$\mu(\partial t_{2,mi})$	0	Rectangular
$\partial t_{1,int}$	0	$\mu(\partial t_{1,int})$	0,02	--
$\partial t_{2,int}$	0	$\mu(\partial t_{2,int})$	0,007	--
$\partial t_{est}$	0	$\mu(\partial t_{est})$	0,024	Rectangular
$\partial t_u$	0	$\mu(\partial t_{uni})$	0.007	Rectangular
$t_{ref}$		$u_{tref}$	0,035543	

Componentes de incertidumbre de calibración de la corrección del primer termómetro en 0 °C

Magnitud	Cálculo	Incertidumbre típica	Valor	Distribución de probabilidad
$t_x$	$(t_{x1} + t_{x2})/2$	$u_{tx}$	0	--
$\partial t_{x,res}$	0	$\mu(\partial t_{x,res})$	0,144338	Rectangular
$\partial t_{x,min}$	0	$\mu(\partial t_{x,min})$	0	..
$\partial t_r$	0	$\mu(\partial t_r)$	0,00187	Normal
$\partial t_h$	0	$\mu(\partial t_h)$	0,001442	Normal
$t_{ref}$	$(t_1 + t_2)/2$	$\mu(\partial t_{ref})$	0,035543	Normal
C		U =k $\mu(C)$ (k=2)	0,297336	

Componentes de incertidumbre del sistema calibración del primer termómetro en 70 °C

Magnitud $x_i$	Estimación	Incertidumbre típica (°C)	Valor	Distribución de probabilidad considerada
$t_1$	$(Tp1+tp2)/\sqrt{2}$	0	0	---
$t_2$	$t_2$	0	0	---

$\partial t_{c1}$	0	$\mu(\partial t_{c1})$	0,0195	Normal
$\partial t_{c2}$	0	$\mu(\partial t_{c2})$	0,0210	Normal
$\partial t_{d1}$	0	$\mu(\partial t_{d1})$	0,024	Rectangular
$\partial t_{d2}$	0	$\mu(\partial t_{d2})$	0,023	Rectangular
$\partial t_{1,res}$	0	$\mu(\partial t_{1,res})$	0,003	Rectangular
$\partial t_{2,res}$	0	$\mu(\partial t_{2,res})$	0,003	Rectangular
$\partial t_{1,mi}$	0	$\mu(\partial t_{1,mi})$	-0,001	Rectangular
$\partial t_{2,mi}$	0	$\mu(\partial t_{2,mi})$	-0,001	Rectangular
$\partial t_{1,int}$	0	$\mu(\partial t_{1,int})$	0,02	--
$\partial t_{2,int}$	0	$\mu(\partial t_{2,int})$	0,007	--
$\partial t_{est}$	0	$\mu(\partial t_{est})$	0,014	Rectangular
$\partial t_u$	0	$\mu(\partial t_{uni})$	0,017	Rectangular
$t_{ref}$		$u_{tref}$	0,034837	

Componentes de incertidumbre de calibración de la corrección del primer termómetro en 70 °C.

Magnitud	Cálculo	Incertidumbre típica (°C)	Valor	Distribución de probabilidad
$t_x$	$(t_{x1} + t_{x2})/2$	$u_{tx}$	0	--
$\partial t_{x,res}$	0	$\mu(\partial t_{x,res})$	0,144338	Rectangular
$\partial t_{x,min}$	0	$\mu(\partial t_{x,min})$	0	..
$\partial t_r$	0	$\mu(\partial t_r)$	0,001870	Normal
$\partial t_h$	0	$\mu(\partial t_h)$	0,005772	Normal
$t_{ref}$	$(t_1 + t_2)/2$	$\mu(\partial t_{ref})$	0,034837	Normal
C		$U = k\mu(C)$ (k=2)	0,297212	

Componentes de incertidumbre del sistema de calibración del primer termómetro 200 °C.

Magnitud $x_i$	Estimación	Incertidumbre típica (°C)	Valor	Distribución de probabilidad considerada
$t_1$	$(T_{p1}+t_{p2})/\sqrt{2}$	0	0	---
$t_2$	$t_2$	0	0	---
$\partial t_{c1}$	0	$\mu(\partial t_{c1})$	0,0195	Normal
$\partial t_{c2}$	0	$\mu(\partial t_{c2})$	0,0195	Normal
$\partial t_{d1}$	0	$\mu(\partial t_{d1})$	0,023	Rectangular
$\partial t_{d2}$	0	$\mu(\partial t_{d2})$	0,023	Rectangular
$\partial t_{1,res}$	0	$\mu(\partial t_{1,res})$	0,003	Rectangular
$\partial t_{2,res}$	0	$\mu(\partial t_{2,res})$	0,003	Rectangular
$\partial t_{1,mi}$	0	$\mu(\partial t_{1,mi})$	-0,002	Rectangular
$\partial t_{2,mi}$	0	$\mu(\partial t_{2,mi})$	-0,002	Rectangular
$\partial t_{1,int}$	0	$\mu(\partial t_{1,int})$	0,02	--
$\partial t_{2,int}$	0	$\mu(\partial t_{2,int})$	0,007	--
$\partial t_{est}$	0	$\mu(\partial t_{est})$	0,02	Rectangular
$\partial t_u$	0	$\mu(\partial t_{uni})$	0,069	Rectangular
$t_{ref}$		$u_{tref}$	0,076588	

Componentes de incertidumbre de calibración de la corrección del primer termómetro 1 en 200 °C

Magnitud	Cálculo	Incertidumbre típica (°C)	Valor	Distribución de probabilidad
$t_x$	$(t_{x1} + t_{x2})/2$	$u_{tx}$	0	--
$\partial t_{x,res}$	0	$\mu(\partial t_{x,res})$	0,1443	Rectangular

$\partial t_{x,min}$	0	$\mu(\partial t_{x,min})$	0	..
$\partial t_r$	0	$\mu(\partial t_r)$	0,0019	Normal
$\partial t_h$	0	$\mu(\partial t_h)$	0,0014	Normal
$t_{ref}$	$(t_1 + t_2)/2$	$\mu(\partial t_{ref})$	0,0766	Normal
C		$U = k\mu(C)$ (k=2)	0,326831	

Componentes de incertidumbre del sistema de calibración del segundo termómetro en - 20 °C.

Magnitud $x_i$	Estimación	Incertidumbre típica (°C)	Valor	Distribución de probabilidad considerada
$t_1$	$(Tp1+tp2)/\sqrt{2}$	0	0	---
$t_2$	$t_2$	0	0	---
$\partial t_{c1}$	0	$\mu(\partial t_{c1})$	0,02	Normal
$\partial t_{c2}$	0	$\mu(\partial t_{c2})$	0,02	Normal
$\partial t_{d1}$	0	$\mu(\partial t_{d1})$	0,023	Rectangular
$\partial t_{d2}$	0	$\mu(\partial t_{d2})$	0,023	Rectangular
$\partial t_{1,res}$	0	$\mu(\partial t_{1,res})$	0,003	Rectangular
$\partial t_{2,res}$	0	$\mu(\partial t_{2,res})$	0,003	Rectangular
$\partial t_{1,mi}$	0	$\mu(\partial t_{1,mi})$	0,001	Rectangular
$\partial t_{2,mi}$	0	$\mu(\partial t_{2,mi})$	0,001	Rectangular
$\partial t_{1,int}$	0	$\mu(\partial t_{1,int})$	0,002	--
$\partial t_{2,int}$	0	$\mu(\partial t_{2,int})$	0,007	--
$\partial t_{est}$	0	$\mu(\partial t_{est})$	0,024	Rectangular
$\partial t_u$	0	$\mu(\partial t_{uni})$	0,098	Rectangular
$t_{ref}$		$u_{tref}$	0,104158	

Componentes de incertidumbre de calibración de la corrección del segundo termómetro en -20 °C

Magnitud	Cálculo	Incertidumbre típica	Valor	Distribución de probabilidad
$t_x$	$(t_{x1} + t_{x2})/2$	$u_{tx}$	0	--
$\partial t_{x,res}$	0	$\mu(\partial t_{x,res})$	0,11547	Rectangular
$\partial t_{x,min}$	0	$\mu(\partial t_{x,min})$	0	..
$\partial t_r$	0	$\mu(\partial t_r)$	0,000999	Normal
$\partial t_h$	0	$\mu(\partial t_h)$	0	Normal
$t_{ref}$	$(t_1 + t_2)/2$	$\mu(\partial t_{ref})$	0,10458	Normal
C		$U = k\mu(C)$ (k=2)	0,311018	

Componentes de incertidumbre del sistema de calibración del segundo termómetro en 0 °C

Magnitud $x_i$	Estimación	Incertidumbre típica (°C)	Valor	Distribución de probabilidad considerada
$t_1$	$(Tp1+tp2)/\sqrt{2}$	0	0	---
$t_2$	$t_2$	0	0	---
$\partial t_{c1}$	0	$\mu(\partial t_{c1})$	0,0195	Normal
$\partial t_{c2}$	0	$\mu(\partial t_{c2})$	0,0210	Normal
$\partial t_{d1}$	0	$\mu(\partial t_{d1})$	0,024	Rectangular
$\partial t_{d2}$	0	$\mu(\partial t_{d2})$	0,023	Rectangular
$\partial t_{1,res}$	0	$\mu(\partial t_{1,res})$	0,003	Rectangular

$\partial t_{2,res}$	0	$\mu(\partial t_{2,res})$	0,003	Rectangular
$\partial t_{1,mi}$	0	$\mu(\partial t_{1,mi})$	0,00	Rectangular
$\partial t_{2,mi}$	0	$\mu(\partial t_{2,mi})$	0,00	Rectangular
$\partial t_{1,int}$	0	$\mu(\partial t_{1,int})$	0,002	--
$\partial t_{2,int}$	0	$\mu(\partial t_{2,int})$	0,007	--
$\partial t_{est}$	0	$\mu(\partial t_{est})$	0,024	Rectangular
$\partial t_u$	0	$\mu(\partial t_{uni})$	0,007	Rectangular
$t_{ref}$		$u_{tref}$	0,036240	

Componentes de incertidumbre de corrección de calibración del segundo termómetro en 0 °C.

Magnitud	Cálculo	Incertidumbre típica	Valor	Distribución de probabilidad
$t_x$	$(t_{x1} + t_{x2})/2$	$u_{tx}$	0	--
$\partial t_{x,res}$	0	$\mu(\partial t_{x,res})$	0,115470	Rectangular
$\partial t_{x,min}$	0	$\mu(\partial t_{x,min})$	0	..
$\partial t_r$	0	$\mu(\partial t_r)$	0,000999	Normal
$\partial t_h$	0	$\mu(\partial t_h)$	0,001442	Normal
$t_{ref}$	$(t_1 + t_2)/2$	$\mu(\partial t_{ref})$	0,036240	Normal
C		$U = k\mu(C)$ (k=2)	0242072	

Componentes de incertidumbre del sistema de calibración del segundo termómetro en 60 °C

Magnitud $x_i$	Estimación	Incertidumbre típica (°C)	Valor	Distribución de probabilidad considerada
$t_1$	$(T_{p1}+t_{p2})/\sqrt{2}$	0	0	---
$t_2$	$t_2$	0	0	---
$\partial t_{c1}$	0	$\mu(\partial t_{c1})$	0,0195	Normal
$\partial t_{c2}$	0	$\mu(\partial t_{c2})$	0,0195	Normal
$\partial t_{d1}$	0	$\mu(\partial t_{d1})$	0,023	Rectangular
$\partial t_{d2}$	0	$\mu(\partial t_{d2})$	0,023	Rectangular
$\partial t_{1,res}$	0	$\mu(\partial t_{1,res})$	0,003	Rectangular
$\partial t_{2,res}$	0	$\mu(\partial t_{2,res})$	0,003	Rectangular
$\partial t_{1,mi}$	0	$\mu(\partial t_{1,mi})$	-0,002	Rectangular
$\partial t_{2,mi}$	0	$\mu(\partial t_{2,mi})$	-0,002	Rectangular
$\partial t_{1,int}$	0	$\mu(\partial t_{1,int})$	0,002	--
$\partial t_{2,int}$	0	$\mu(\partial t_{2,int})$	0,007	--
$\partial t_{est}$	0	$\mu(\partial t_{est})$	0,014	Rectangular
$\partial t_u$	0	$\mu(\partial t_{uni})$	0,017	Rectangular
$t_{ref}$		$u_{tref}$	0,034131	

Componentes de incertidumbre de corrección de calibración del segundo termómetro en 60 °C

Magnitud	Cálculo	Incertidumbre típica (°C)	Valor	Distribución de probabilidad
$t_x$	$(t_{x1} + t_{x2})/2$	$u_{tx}$	0	--
$\partial t_{x,res}$	0	$\mu(\partial t_{x,res})$	0,11547	Rectangular

$\partial t_{x,min}$	0	$\mu(\partial t_{x,min})$	0	..
$\partial t_r$	0	$\mu(\partial t_r)$	0,000999	Normal
$\partial t_h$	0	$\mu(\partial t_h)$	0	Normal
$t_{ref}$	$(t_1 + t_2)/2$	$\mu(\partial t_{ref})$	0,034131	Normal
C		$U = k\mu(C)$ (k=2)	0,240826	

Componentes de incertidumbre de corrección de calibración del tercer termómetro en 10 °C

Magnitud $x_i$	Estimación	Incertidumbre típica (°C)	Valor	Distribución de probabilidad considerada
$t_1$	$(T_{p1}+t_{p2})/\sqrt{2}$	0	0	---
$t_2$	$t_2$	0	0	---
$\partial t_{c1}$	0	$\mu(\partial t_{c1})$	0,02	Normal
$\partial t_{c2}$	0	$\mu(\partial t_{c2})$	0,02	Normal
$\partial t_{d1}$	0	$\mu(\partial t_{d1})$	0,023	Rectangular
$\partial t_{d2}$	0	$\mu(\partial t_{d2})$	0,023	Rectangular
$\partial t_{1,res}$	0	$\mu(\partial t_{1,res})$	0,003	Rectangular
$\partial t_{2,res}$	0	$\mu(\partial t_{2,res})$	0,003	Rectangular
$\partial t_{1,mi}$	0	$\mu(\partial t_{1,mi})$	0	Rectangular
$\partial t_{2,mi}$	0	$\mu(\partial t_{2,mi})$	0	Rectangular
$\partial t_{1,int}$	0	$\mu(\partial t_{1,int})$	0,02	--
$\partial t_{2,int}$	0	$\mu(\partial t_{2,int})$	0,007	--
$\partial t_{est}$	0	$\mu(\partial t_{est})$	0,017	Rectangular
$\partial t_u$	0	$\mu(\partial t_{uni})$	0,029	Rectangular
$t_{ref}$		$u_{tref}$	0,042289	

Componentes de incertidumbre de corrección de calibración del tercer termómetro en 10 °C

Magnitud	Cálculo	Incertidumbre típica	Distribución de probabilidad	
$t_x$	$(t_{x1} + t_{x2})/2$	$u_{tx}$	0	--
$\partial t_{x,res}$	0	$\mu(\partial t_{x,res})$	0,1443	Rectangular
$\partial t_{x,min}$	0	$\mu(\partial t_{x,min})$	0	..
$\partial t_r$	0	$\mu(\partial t_r)$	0,002449	Normal
$\partial t_h$	0	$\mu(\partial t_h)$	0	Normal
$t_{ref}$	$(t_1 + t_2)/2$	$\mu(\partial t_{ref})$	0,042289	Normal
C		$U = k\mu(C)$ (k=2)	0,300850	

Componentes de incertidumbre del sistema de calibración del tercer termómetro en 80 °C

Magnitud $x_i$	Estimación	Incertidumbre típica (°C)	Valor	Distribución de probabilidad considerada
$t_1$	$(Tp1+tp2)/\sqrt{2}$	0	0	---
$t_2$	$t_2$	0	0	---
$\partial t_{c1}$	0	$\mu(\partial t_{c1})$	0,0195	Normal
$\partial t_{c2}$	0	$\mu(\partial t_{c2})$	0,0210	Normal
$\partial t_{d1}$	0	$\mu(\partial t_{d1})$	0,024	Rectangular
$\partial t_{d2}$	0	$\mu(\partial t_{d2})$	0,023	Rectangular
$\partial t_{1,res}$	0	$\mu(\partial t_{1,res})$	0,003	Rectangular

$\partial t_{2,res}$	0	$\mu(\partial t_{2,res})$	0,003	Rectangular
$\partial t_{1,mi}$	0	$\mu(\partial t_{1,mi})$	-0,003	Rectangular
$\partial t_{2,mi}$	0	$\mu(\partial t_{2,mi})$	-0,003	Rectangular
$\partial t_{1,int}$	0	$\mu(\partial t_{1,int})$	0,002	--
$\partial t_{2,int}$	0	$\mu(\partial t_{2,int})$	0,007	--
$\partial t_{est}$	0	$\mu(\partial t_{est})$	0,014	Rectangular
$\partial t_u$	0	$\mu(\partial t_{uni})$	0,04	Rectangular
$t_{ref}$		$u_{tref}$	0,050499	

Componentes de incertidumbre de la corrección de calibración del tercer termómetro en 80 °C

Magnitud	Cálculo	Incertidumbre típica (°C)	Valor	Distribución de probabilidad
$t_x$	$(t_{x1} + t_{x2})/2$	$u_{tx}$	0	--
$\partial t_{x,res}$	0	$\mu(\partial t_{x,res})$	0,1443	Rectangular
$\partial t_{x,min}$	0	$\mu(\partial t_{x,min})$	0	..
$\partial t_r$	0	$\mu(\partial t_r)$	0,0024	Normal
$\partial t_h$	0	$\mu(\partial t_h)$	0	Normal
$t_{ref}$	$(t_1 + t_2)/2$	$\mu(\partial t_{ref})$	0,0505	Normal
C		$U = k\mu(C)$ (k=2)	0,305872	

Componentes de incertidumbre del sistema de calibración del tercer termómetro en 160 °C

Magnitud $x_i$	Estimación	Incertidumbre típica (°C)	Valor	Distribución de probabilidad considerada
$t_1$	$(T_{p1}+t_{p2})/\sqrt{2}$	0	0	---
$t_2$	$t_2$	0	0	---
$\partial t_{c1}$	0	$\mu(\partial t_{c1})$	0,0195	Normal
$\partial t_{c2}$	0	$\mu(\partial t_{c2})$	0,0195	Normal
$\partial t_{d1}$	0	$\mu(\partial t_{d1})$	0,023	Rectangular
$\partial t_{d2}$	0	$\mu(\partial t_{d2})$	0,023	Rectangular
$\partial t_{1,res}$	0	$\mu(\partial t_{1,res})$	0,003	Rectangular
$\partial t_{2,res}$	0	$\mu(\partial t_{2,res})$	0,003	Rectangular
$\partial t_{1,mi}$	0	$\mu(\partial t_{1,mi})$	-0,005	Rectangular
$\partial t_{2,mi}$	0	$\mu(\partial t_{2,mi})$	-0,005	Rectangular
$\partial t_{1,int}$	0	$\mu(\partial t_{1,int})$	0,02	--
$\partial t_{2,int}$	0	$\mu(\partial t_{2,int})$	0,007	--
$\partial t_{est}$	0	$\mu(\partial t_{est})$	0,02	Rectangular
$\partial t_u$	0	$\mu(\partial t_{uni})$	0,069	Rectangular
$t_{ref}$		$u_{tref}$	0,076662	

Componentes de incertidumbre de las correcciones de calibración del tercer termómetro en 160 °C

Magnitud	Cálculo	Incertidumbre típica ( °C)	Valor	Distribución de probabilidad
$t_x$	$(t_{x1} + t_{x2})/2$	$u_{tx}$	0	--
$\partial t_{x,res}$	0	$\mu(\partial t_{x,res})$	0,1443	Rectangular

$\partial t_{x,min}$	0	$\mu(\partial t_{x,min})$	0	..
$\partial t_r$	0	$\mu(\partial t_r)$	0,0024	Normal
$\partial t_h$	0	$\mu(\partial t_h)$	0,0043	Normal
$t_{ref}$	$(t_1 + t_2)/2$	$\mu(\partial t_{ref})$	0,0767	Normal
C		$U = k\mu(C)$ (k=2)	0,327018	

Emitimos los resultados de la calibración de los tres instrumentos en forma de tabla.

Tabla 15 Resultado final del termómetro 1

Indicación del termómetro	Temperatura			Incertidumbre
	Convencionalmente Verdadera	Corrección		
°C	°C	°C	°C	°C
0,0	0,02	0,02	0,30	0,30
70,0	69,98	-0,02	0,30	0,30
200,0	199,98	-0,02	0,33	0,33

Tabla 16 Resultado final del termómetro 2

Indicación del termómetro	Temperatura		
	Convencionalmente Verdadera	Corrección	Incertidumbre
°C	°C	°C	°C
-20,0	-20,07	-0,07	0,32
0,0	0,03	0,03	0,25
60,0	59,99	-0,01	0,25

Tabla 17 Resultados del termómetro 3

Indicación del termómetro	Temperatura		
	Convencionalmente Verdadera	Corrección	Incertidumbre
°C	°C	°C	°C
10,0	10,12	0,12	0,31
80,0	80,09	0,09	0,31
160,0	159,98	-0,02	0,33

#### **4.4 Discusiones del resultado**

Teniendo el procedimiento desarrollado debemos que demostrar que lo propuesto es válido con respecto a requisitos previos.

En la norma 17025 se indica que el laboratorio debe validar los métodos no normalizados, los métodos desarrollados por el laboratorio y los métodos normalizados fuera de su alcance previsto o modificados de otra forma. La validación debe ser tan amplia como sea necesaria para satisfacer las necesidades de la aplicación o del campo de aplicación dados. [14]

Los requisitos especificados son encontrar las correcciones de los instrumentos termómetros de indicación analógica y las incertidumbres asociadas a dichas correcciones en el alcance requerido, para cumplir con estos requisitos, estos deberían asegurar como mínimo dos características: Las mediciones deben ser veraces, precisos y robustos.

##### 4.4.1 Veracidad:

Grado de concordancia entre la media de un número de infinito de valores medidos repetidos y un valor de referencia.

- Herramienta estadística: t student de una muestra
- Prerrequisito: El conjunto de datos presenta normalidad
- Hipótesis nula: Los resultados de las repeticiones son veraces.
- Nivel de confianza: 95 %
- Criterio de aceptación:  $p_{\text{valor}} \geq 0,05$

Tabla 18 Resultados del método estandarizado vs Resultados de valores experimentales

Método de referencia (°C)	Valores experimentales (°C)
-0,04	-0,031500422
	-0,041487265
	-0,041493123
	-0,0364997
	-0,041493123

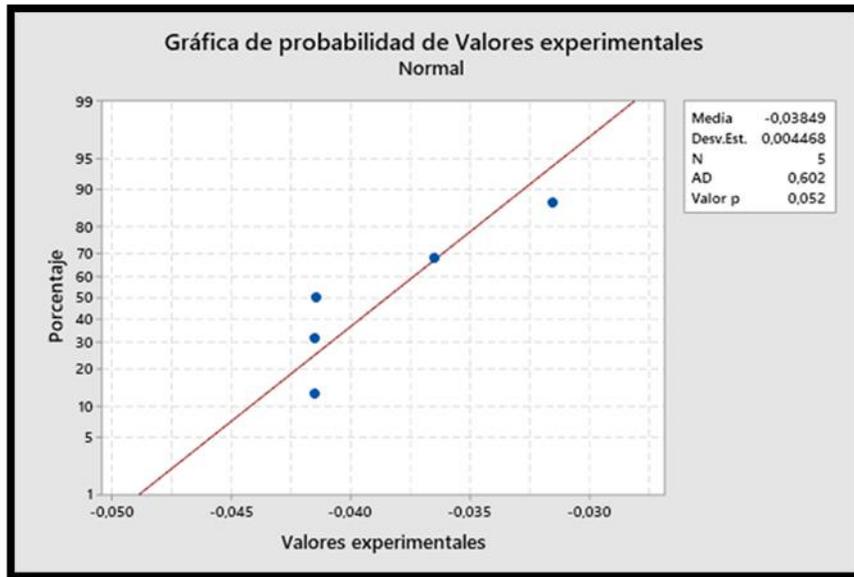


Fig 24 Prueba de normalidad de los datos experimentales

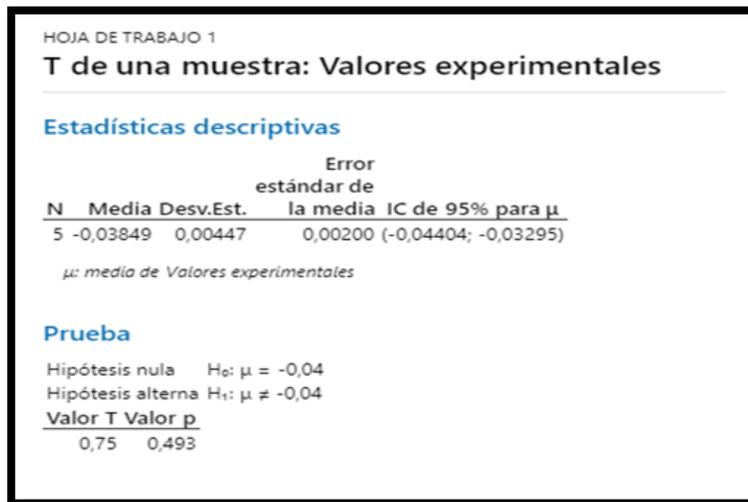


Fig 25 Prueba de t-student de una muestra

pvalor mayor a 0,05 , se acepta la hipótesis nula , la media de las mediciones es igual a la referencia , el método es veraz al 95%.

## 4.4.2 Evaluación de precisión y robustez

- Herramienta estadística: Prueba Barlett
- Prerrequisito: Que los datos presenten normalidad
- Hipótesis nula: Los resultados de las repeticiones tienen variaciones similares
- Nivel de confianza: 95 %
- Criterio de aceptación:  $p\text{valor} \geq 0,05$

Tabla 19 Diseño factorial de variación de condiciones

Factor	Descripción	Condiciones iniciales	Condiciones bajo evaluación
A	Temperatura ambiental	no mayor a $\pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$	$\pm 2,5 \text{ }^\circ\text{C}$
B	Tiempo de lectura	10 min	5 min
C	Punto de control del medio (estabilidad del medio)	$0 \text{ }^\circ\text{C}$	$50 \text{ }^\circ\text{C}$
D	Profundidad de inmersión	8 cm	11 cm

Tabla 20 Condiciones para cada prueba

Factor	Descripción	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3	Prueba 4
A	Temperatura ambiental		X		
B	Tiempo de lectura			X	
C	Punto de control del medio (estabilidad del medio)				X
D	Profundidad de inmersión				X

Tabla 21 Prueba 1

Correcciones (°C)
-0,031500422
-0,041487265
-0,041493123
-0,0364997
-0,041493123

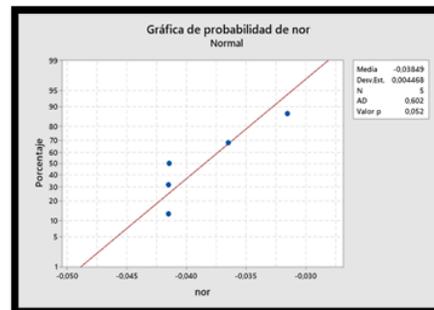


Fig 26 Prueba de normalidad prueba 1

pvalor mayor a 0,05 , se acepta la hipótesis nula , presenta normalidad

Tabla 22 Prueba 2

Correcciones (°C)
-0,041493123
-0,046486543
-0,041493123
-0,031500422
-0,041493123

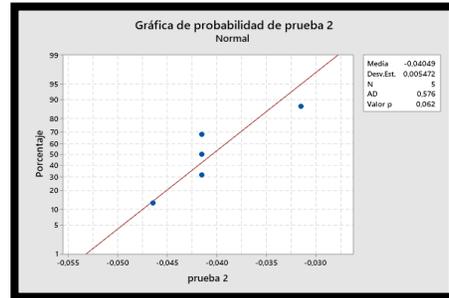


Fig 27 Prueba de normalidad prueba 2

pvalor mayor a 0,05 , se acepta la hipótesis nula , presenta normalidad

Tabla 23 Prueba 3

Correcciones (°C)
-0,046486543
-0,041487265
-0,031500422
-0,031500422
-0,041493123

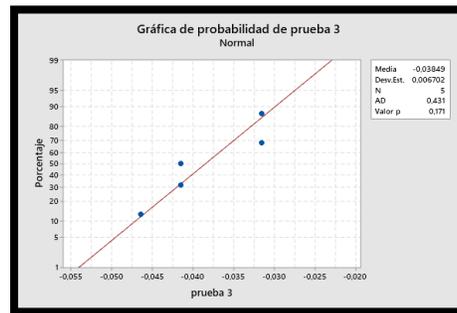


Fig 28 Prueba de normalidad prueba 3

pvalor mayor a 0,05 , se acepta la hipótesis nula , presenta normalidad

Tabla 24 Prueba 4

Correcciones (°C)
-0,095825897
-0,10081975
-0,110822746
-0,110818924
-0,10081975

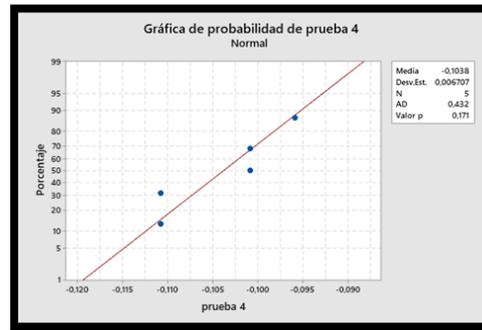


Fig 29 Prueba de normalidad prueba 4

pvalor mayor a 0,05 , se acepta la hipótesis nula , presenta normalidad.

**Método**

Hipótesis nula      Todas las varianzas son iguales  
 Hipótesis alterna      Por lo menos una varianza es diferente  
 Nivel de significancia  $\alpha = 0,05$

*Se utiliza el método de Bartlett. Este método es exacto sólo para datos normales.*

Fig 30 Prueba de Bartlett para comparar las varianzas de las pruebas



Pruebas		
Estadística		
Método de prueba	Valor	p
Bartlett	0,77	0,857

Fig 31 Resultado de la prueba

pvalor mayor a 0,05 se acepta la hipótesis nula, es decir todas las varianzas son iguales

Con estos resultados donde se determina que se está demostrando que el procedimiento es veraz, preciso y además robusto al 95 % de nivel de confianza.

#### 4.4.3 Determinación de la mejor incertidumbre del sistema de medición.

Con los resultados de incertidumbre encontrados, demostramos evidencia de conformidad en todo el alcance, con ello podemos demostrar cumplimiento desde el valor mínimo medido al máximo medido, pero es necesario reportar las incertidumbres alcanzadas para evidenciar las mejores capacidades del laboratorio y que serán enviadas para que INACAL oficialice el alcance acreditado en la declaración de la CMC.

Tabla 25 Condensado de los valores de incertidumbre en todo el alcance de medición

Puntos de calibración	Temperatura convencional	Incertidumbre	Certificado	Resolución
°C	°C Verdadera	°C		°C
-20	-20,07	0,32	TB19-0050	1
0	0,02	0,3	TB19-0049	1
10	10,12	0,31	TB19-0051	1
70	69,98	0,3	TB19-0049	1
80	80,09	0,31	TB19-0051	1
160	160,01	0,33	TB19-0051	1
200	199,98	0,33	TB19-0049	1

Usamos el método de determinar un valor único, el cual será válido para todo el rango de medición. Se elige un valor único debido a que la diferencia entre los diferentes valores de incertidumbre es relativamente pequeña, para este caso se declara el mayor de todos.

Tabla 26 Incertidumbre representativa

Mínima	
Rango de medición	incertidumbre
-20 °C a 200 °C	0,33 °C

La CMC se declara en el siguiente formulario y se presenta a la dirección de acreditación de INACAL

6	Temperatura	Termómetros de indicación analógica	Comparación directa	P-CAL-15 "Procedimiento para la calibración de termómetros de indicación analógica" Ver01	-20	200	°C	Temperatura ambiente / Humedad relativa	20 °C a 26 °C / 40 %hr a 75 %hr	0,33 °C	°C
---	-------------	-------------------------------------	---------------------	---	-----	-----	----	---	---------------------------------	---------	----

Fig 32 Declaración alcance acreditado registrado en DM INACAL (página web del INACAL) [20]

Las evaluaciones realizadas se realizaron en el alcance presentado con éxito, lo cual no excluye que con un alcance de equipos de referencia patrón mayor a los presentados en este prueba experimental pueda aumentarse el alcance del procedimiento descrito y sería necesario validar nuevamente en el alcance ampliado , usando los mismo parámetros estadísticos descritos.

Los parámetros de estadísticos de validación presentados en este documento pueden ser validos para otros procedimientos de calibración diseñados por laboratorios o personas propias.

## ***CAPÍTULO 5***

### **CONCLUSIONES**

- Se determinó un procedimiento propio de calibración de termómetros de indicación analógica el cual puede usarse por los laboratorios de calibración nacional lo cual aumenta la oferta para los clientes.
- Se determinó las correcciones y una tabla de presupuesto de incertidumbre de la calibración de termómetros analógicos considerando todas las posibles fuentes de error, cuantificándola para emitir los resultados.
- Se establecieron los pasos y consideraciones para realizar las medidas y estas fueron validadas de manera satisfactoria.
- Se logró la acreditación del INACAL (Instituto nacional de calidad) para este procedimiento y así se confirmó su confiabilidad y aprobación para el cual nos entregaron un oficio (Anexo 3)

## *CAPÍTULO 6.*

### **REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- [1] E. Guillen, Calibración de termómetros de líquido en vidrio, Lima: INDECOPI , 2001.
- [2] Y. Cengel y M. Boles, Termodinámica, Nevada EEUU: Mc Graw Hill, 2012.
- [3] INACAL (Instituto Nacional de Calidad), «La escala internacional de temperatura de 1990,» 03 Abril 2021. [En línea]. Available: [https://www.inacal.gob.pe/repositorioaps/data/1/1/5/jer/boletinmetrologia/files/ITS\\_1990\\_2015\\_INACAL.pdf](https://www.inacal.gob.pe/repositorioaps/data/1/1/5/jer/boletinmetrologia/files/ITS_1990_2015_INACAL.pdf).
- [4] G. G. d. I. Cruz, «Desarrollo de un procedimiento de calibración para termómetros digitales,» Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, 2014.
- [5] WIKA, «Instrumentos mecánicos de medida de temperatura,» Abril 2011. [En línea]. Available: [https://www.wika.fi/upload/DS\\_IN0007\\_es\\_es\\_37261.pdf](https://www.wika.fi/upload/DS_IN0007_es_es_37261.pdf).

- [6] INDECOPI, Servicio nacional de metrología, «PC-017 Procedimiento de calibración de termómetros digitales,» INDECOPI, Lima, 2012.
- [7] D. Southworth, «Calibración de temperatura desde la industria al ITS-90,» 2004. [En línea]. Available: [http://www.isotechna.com/v/vspfiles/pdf\\_articles/Fundamentos-ISOTECH.pdf](http://www.isotechna.com/v/vspfiles/pdf_articles/Fundamentos-ISOTECH.pdf).
- [8] WIKA, «Límites de uso y exactitudes de termorresistencias de,» Noviembre 2020. [En línea]. Available: [https://www.wikapolska.pl/upload/DS\\_IN0017\\_es\\_es\\_24302.pdf](https://www.wikapolska.pl/upload/DS_IN0017_es_es_24302.pdf).
- [9] S. M. Guerrero, «Termómetro de resistencia de platino,» Noviembre 2002. [En línea]. Available: <http://www.metas.com.mx/guiametas/La-Guia-MetAs-02-11-RTD.pdf>.
- [10] CENAM Centro Nacional de Metrología, «El tratado de la convención del metro y del sistema internacional de unidades,» 2012. [En línea]. Available: <http://www.fujisansurvey.com/wp-content/uploads/2012/04/Sistema1.pdf>.
- [11] (CENAM), Centro Nacional de Metrología, «El sistema internacional de unidades (SI),» Mayo 2001. [En línea]. Available: [http://profesores.dcb.unam.mx/users/juancv/materiales\\_archivos/Unidades-CENAM.pdf](http://profesores.dcb.unam.mx/users/juancv/materiales_archivos/Unidades-CENAM.pdf).
- [12] JCGM, Vocabulario Internacional de Metrología, Español: CEM Centro

Español de Metrología, 2012.

- [13] INSTITUTO NACIONAL DE CALIDAD, Criterios para la trazabilidad de las mediciones, Lima: INACAL, 2018.
- [14] (ISO), Organización Internacional de Normalización, 17025 Requisitos generales para la competencia de laboratorios de ensayo y calibración, Lima: ISO/IEC, 2017.
- [15] M. Pérez, «Estimación de incertidumbres- Guía GUM,» *Revista española de metrología*, 2012.
- [16] (JCGM), Comité Conjunto para las Guías en Metrología, Evaluación de datos de medición - Guía para la expresión de la incertidumbre de medida, CEM Centro Español de Metrología, 2008.
- [17] INACAL Comite Técnico, «Directriz para la evaluación de la incertidumbre de la medición en laboratorios de ensayo y calibración,» INACAL, Lima, 2018.
- [18] M. & M. Asociados, «Criterios básicos para la selección de sensores de temperatura,» Julio 2006. [En línea]. Available:  
<http://www.metas.com.mx/guiametas/La-Guia-MetAs-06-07-seleccion-termometros.pdf>.
- [19] EURACHEM, «The Fitness for Purpose of Analytical Methods,» 2014. [En línea]. Available:

[https://www.eurachem.org/images/stories/Guides/pdf/MV\\_guide\\_2nd\\_ed\\_EN.pdf](https://www.eurachem.org/images/stories/Guides/pdf/MV_guide_2nd_ed_EN.pdf).

[Último acceso: 2022].

[ D. INACAL, «Laboratorios de acreditación acreditados,» 2022. [En línea].

20] Available:

<https://www.inacal.gob.pe/repositorioaps/data/1/1/4/jer/acreditados/files/LC-ALCANCES%20FALCANCES-%20Detallados%20%20LC-Rev%20305-2022-06-14.pdf>.

# ANEXOS

## Anexo 1

### Formato de calibración de termómetros analógicos

**-CAL-TIA-01**  
**REGISTRO DE CALIBRACIÓN DE TERMÓMETROS DE INDICACIÓN ANALÓGICA**

**RUSOUMI**  
LABORATORIO DE CALIBRACIÓN

JEFE: \_\_\_\_\_ A1 CERTIF.: \_\_\_\_\_  
 RECEPCIÓN: \_\_\_\_\_ RF-DIT: \_\_\_\_\_  
 FECHA DE CALIBRACIÓN: \_\_\_\_\_ FECHA CAL.: \_\_\_\_\_  
 FECHA DE EMB.: \_\_\_\_\_

**INFORMACIÓN DEL INSTRUMENTO:**  
 MARCA: \_\_\_\_\_ RESOLUCIÓN: \_\_\_\_\_ °C  
 MODELO: \_\_\_\_\_ PARTES EN QUE SE PUEDE SUBDIVIDIR LA ESCALA: \_\_\_\_\_  
 NÚMERO DE SERIE: \_\_\_\_\_ EXACTITUD: \_\_\_\_\_ °C  
 CÓDIGO: \_\_\_\_\_ TIPO DE TERMÓMETRO: \_\_\_\_\_  
 INTERVALO DE INDICACIÓN: \_\_\_\_\_ CLASE: \_\_\_\_\_ UNIDADES: \_\_\_\_\_ °C

**PROCEDIMIENTO DE CALIBRACIÓN:** P-CAL-05 "PROCEDIMIENTO PARA LA CALIBRACIÓN DE TERMÓMETROS DE INDICACIÓN ANALÓGICA" de KOSIOMET S.A.C.

**ESTRUMENTOS UTILIZADOS:**  
 Primer patrón 1a: PT-T09-09 (C) Segundo patrón 1a: PT-T09-09 (D) Transmisibilidad: TE-333-B-2020 LO JUSTO S.A.C.  
 Segundo Patrón 1a: TE-333-B-2020 LO JUSTO S.A.C.

**INSPECCIÓN VISUAL:**  
 - solo del exterior: \_\_\_\_\_  
 - solo del interior: \_\_\_\_\_  
 - solo de la profundidad de la escala: \_\_\_\_\_  
 - solo de la escala del dial: \_\_\_\_\_  
 - solo de la escala de la calibración: \_\_\_\_\_  
 - solo de la escala: \_\_\_\_\_

**CONDICIONES AMBIENTALES:** Termómetro de código: Tm-1000-02 Inicial: Temp. Ambiente: \_\_\_\_\_ °C Hum. Relativa: \_\_\_\_\_ %  
 Final: Temp. Ambiente: \_\_\_\_\_ °C Hum. Relativa: \_\_\_\_\_ %

**JUSTE DEL INSTRUMENTO:** \_\_\_\_\_ Si es el completar el cuadro siguiente.

se realizó el ajuste si el termómetro lo permite y se acuerda con el cliente. **LECTURAS ANTES DEL AJUSTE**  
 Termómetro Patrón Utilizado(1) PT-T09-04 (A) Termómetro Patrón Utilizado(2) PT-T09-04 (B)

Punto de calibración	Lectura primer patrón	Lectura del termómetro a calibrar	Lectura segundo patrón	Lectura del termómetro a calibrar	Lectura primer patrón

Página 1

**RUEDA DE PROFUNDIDAD DE INMERSIÓN:** Temperaturas cercas al mínimo o máximo del rango de calibración: \_\_\_\_\_

Tiene corrosión excesiva? \_\_\_\_

Profundidad Total	cm	mm	°C
Profundidad 1	cm	mm	°C
Profundidad 2	cm	mm	°C
Profundidad 3	cm	mm	°C
Profundidad 4	cm	mm	°C
Profundidad 5	cm	mm	°C

Profundidad de inmersión del sensor del termómetro a calibrar: \_\_\_\_\_ cm.



## Anexo 2

### Certificados de calibración de instrumentos de referencia (patrones de trabajo)

Termómetro patrón PT-TDIG-09 (C y D) Certificado: TE-333-B-2020

**LOJUSTO** LABORATORIO DE CALIBRACION ACREDITADO POR EL ORGANISMO PERUANO DE ACREDITACION INACAL-DA CON REGISTRO N° LC - 002

**LABORATORIO DE CALIBRACION LOJUSTO S.A.C.**  
SERVICIOS DE CALIBRACION

**CERTIFICADO DE CALIBRACION**  
LT-333-B-2020

**Laboratorio de Temperatura** Código del certificado: **TE-333-B-2020**

Fecha de calibración: 2020-05-20

Instrumento de medida: Termómetro de indicación digital

Marca del Indicador: Delta Chen

Modelo del Indicador: HD02T-2

Serial del Indicador: 15001009

Identificación: PT-TDIG-09

Intervalo de indicación: -200 °C a 400 °C \*

Resolución: 0,01 °C / 0,1 °C

Tipo de sensor: RTD

Solicitante: KIMBOGA METROLOGIA S.A.C.  
KIMBOGA S.A.C.  
D. Choc. No. 1741 Cercado de Lima, Lima

Discreción validada: 7 ppq.

Equipos: GAR-01A-2020

Lugar de calibración: Laboratorio de Temperatura LOJUSTO S.A.C.

Procedimiento utilizado: T1001 Procedimiento para la calibración de termómetros digitales, Edición Digital y "CEM Español" - (Método de comparación en medio termométrico de temperatura controlada).

NOTA: Este proceso garantiza la trazabilidad de los resultados de calibración con el patrón de referencia de temperatura controlada y con el patrón de referencia de temperatura controlada de la BIPM. Los resultados de calibración son válidos para el uso de los instrumentos de medida de temperatura controlada por un período de validez de 12 meses. Los resultados de calibración se expresan en unidades de temperatura controlada y en unidades de temperatura controlada. Los resultados de calibración se expresan en unidades de temperatura controlada y en unidades de temperatura controlada. Los resultados de calibración se expresan en unidades de temperatura controlada y en unidades de temperatura controlada.

**LOJUSTO** LABORATORIO DE CALIBRACION ACREDITADO POR EL ORGANISMO PERUANO DE ACREDITACION INACAL-DA CON REGISTRO N° LC - 002

**Laboratorio de Temperatura** Código del certificado: **TE-333-B-2020**

Declaración de patrones:

Trazabilidad	Patrón utilizado	Certificado de Calibración
Patrones de referencia INACAL	Termómetro de indicación digital	LT-233-2019

Instrumentos Auxiliares:

- Baño de líquido de temperatura controlada código LT-1-067, LT-1-068, LT-1-066.
- Regulador de condiciones ambientales código LT-1-100.

**RESULTADOS DE LA CALIBRACION**

Temperatura Conv. Verdadera °C	Indicación del Termómetro °C	Corrección °C	Incertidumbre expandida °C	Nota
-30,008	-30,09	0,052	0,039	Nota: 1001523
0,000	0,01	0,010	0,009	Longitud: 152,2 mm
89,996	70,02	-0,024	0,040	Diámetro: 2,7 mm
140,080	140,09	-0,010	0,056	Caliente seco
200,080	200,1	-0,020	0,081	Caliente A

Temperatura Conv. Verdadera °C	Indicación del Termómetro °C	Corrección °C	Incertidumbre expandida °C	Nota
30,008	30,06	0,052	0,039	Nota: 1001518
0,000	0,00	0,000	0,039	Longitud: 152,2 mm
89,996	70,04	-0,044	0,060	Diámetro: 2,7 mm
140,080	140,11	-0,030	0,056	Caliente seco
200,080	200,1	-0,020	0,081	Caliente B

La incertidumbre expandida (k=2) incluye la incertidumbre de los patrones y del método de calibración. La incertidumbre indicada no incluye una estimación de variaciones a largo plazo.

Las condiciones ambientales durante la calibración fueron: Temperatura: 23,4°C y Humedad Relativa: 70%.

TCV = Indicación del termómetro + corrección

**Notas y aclaraciones:**

- La incertidumbre expandida de la medición se ha obtenido multiplicando la incertidumbre estándar de la medición por el factor de cobertura  $k=2$  que, para una distribución normal, corresponde a una probabilidad de cobertura de aproximadamente el 95%. La incertidumbre estándar de medida se ha determinado según la "Guía para la expresión de la incertidumbre en la medición", tras haberlo traducido por el Centro Español de Metrología, e incluye la incertidumbre de los patrones y del método de calibración. La incertidumbre indicada no incluye una estimación de variaciones a largo plazo.
- Las condiciones ambientales durante la calibración fueron: Temperatura: 23,4°C y Humedad Relativa: 70%.

Baño de alcohol EQ-BTER-01

Certificado de calibración: LT-0680-

2020

**SAT** Sociedad de Asesoramiento Técnico S.A.C. **INACAL**  
LABORATORIO DE CALIBRACIÓN ACREDITADO POR EL ORGANISMO PERUANO DE ACREDITACIÓN INACAL - DA CON REGISTRO N° LC-014

**CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN N° LT-0680-2020**

SERV-004-2020  
Pag. 1 de 1

**1. Cliente** : KOSBODO METROLOGIA S.A.C. - KOSBOMET S.A.C.  
**Dirección** : J. Chota Nro. 1161 Cercado de Lima - Lima - Lima

**2. Equipo calibrado** : BAÑO TERMOSTÁTICO  
**Marca** : Jumbo  
**Modelo** : P740  
**Número de serie** : 15107736  
**Procedencia** : Alemania  
**Identificación** : EQ-BTER-01  
**Ubicación** : Laboratorio de Temperatura, Humedad y Fisión Química

**Instrumento de medición del equipo**

Medida	Esca	Intervalo de medición	Resolución
Temperatura de medición	Digital	No aplica	0.01 °C
Desviación de control	Digital	40.00 °C a 200.00 °C / 1	0.01 °C

**3. Fecha y lugar de Calibración**  
**Fecha de calibración** : 2020-09-15 al 2020-09-16  
**Lugar de calibración** : Instalaciones de KOSBODO METROLOGIA S.A.C. - KOSBOMET S.A.C.

**4. Método de Calibración**  
La calibración se efectuó por comparación directa según el procedimiento PC-019 Vers. 06 - "Procedimiento para la Calibración de Baños Termostáticos" del INACAL/DIA.

**5. Trazabilidad**  
Los resultados de la calibración tienen trazabilidad a los patrones nacionales del INACAL/DIA, en concordancia con el Sistema Internacional de Unidades de Medidas (SI) y el sistema legal de Unidades de Medidas del Perú (SULM).  
El certificado de calibración en la firma y sello del responsable de SAT, con el sello de la acreditación INACAL/DIA.

Temperatura de calibración	Resolución	Certificación de calibración N°
De 40 a 200 °C con 11 homogeneización de punto (PT11-02 a PT11-06, PT11-08 a PT11-11, PT11-13 y PT11-14) con incertidumbre del orden de 0.03 °C		LT-0680-2020 de INACAL/DIA

**6. Condiciones ambientales**

Temperatura ambiente	Mínima: 20.1 °C	Máxima: 22.1 °C
Humedad relativa	Mínima: 52 %v	Máxima: 60 %v

**7. Condiciones de Calibración**  
La calibración se realizó bajo condiciones nominales de uso del equipo.

Este certificado de calibración únicamente es válido si el cliente garantiza la correcta utilización del equipo de acuerdo con el Sistema Internacional de Unidades (SI).  
Este certificado de calibración, no aplica, en caso de haber sido utilizado para fines diferentes a los que fueron autorizados por el fabricante del equipo.  
Con el fin de asegurar la calidad de sus mediciones se recomienda al cliente mantener sus instrumentos y equipos en condiciones apropiadas de acuerdo a sus condiciones y mantenimiento.  
Este certificado de calibración sólo puede ser usado para fines relacionados a un procedimiento de control de calidad en la fabricación (plano y proceso) de SAT.  
SAT S.A.C. no se responsabiliza de los resultados de mediciones de los equipos de medición que no fueron autorizados por el fabricante del equipo.  
El certificado de calibración en la firma y sello del responsable de SAT, con el sello de la acreditación INACAL/DIA.

Baño de aceite: EQ-BTER-02

Certificado de calibración: LT-0882-2020

**SAT** Sociedad de Asesoramiento Técnico S.A.C. **INACAL**  
LABORATORIO DE CALIBRACIÓN ACREDITADO POR EL ORGANISMO PERUANO DE ACREDITACIÓN INACAL - DA CON REGISTRO N° LC-014

**CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN N° LT-0882-2020**

SERV-004-2020  
Pag. 1 de 1

**1. Cliente** : KOSBODO METROLOGIA S.A.C. - KOSBOMET S.A.C.  
**Dirección** : J. Chota Nro. 1161 Cercado de Lima - Lima - Lima

**2. Equipo calibrado** : BAÑO TERMOSTÁTICO  
**Marca** : Jumbo  
**Modelo** : P740-01  
**Número de serie** : 15108825  
**Procedencia** : Alemania  
**Identificación** : EQ-BTER-02  
**Ubicación** : Laboratorio de Temperatura, Humedad y Fisión Química

**Instrumento de medición del equipo**

Medida	Esca	Intervalo de medición	Resolución
Temperatura de medición	Digital	No aplica	0.01 °C
Desviación de control	Digital	40.00 °C a 200.00 °C / 1	0.01 °C

**3. Fecha y lugar de Calibración**  
**Fecha de calibración** : 2020-10-28 al 2020-10-29  
**Lugar de calibración** : Instalaciones de KOSBODO METROLOGIA S.A.C. - KOSBOMET S.A.C.

**4. Método de Calibración**  
La calibración se efectuó por comparación directa según el procedimiento PC-019 Vers. 06 - "Procedimiento para la Calibración de Baños Termostáticos" del INACAL/DIA.

**5. Trazabilidad**  
Los resultados de la calibración tienen trazabilidad a los patrones nacionales del INACAL/DIA, en concordancia con el Sistema Internacional de Unidades de Medidas (SI) y el sistema legal de Unidades de Medidas del Perú (SULM).  
El certificado de calibración en la firma y sello del responsable de SAT, con el sello de la acreditación INACAL/DIA.

Temperatura de calibración	Resolución	Certificación de calibración N°
De 40 a 200 °C con 11 homogeneización de punto (PT11-02 a PT11-06, PT11-08 a PT11-11, PT11-13 y PT11-14) con incertidumbre del orden de 0.03 °C		LT-0882-2020 de INACAL/DIA

**6. Condiciones ambientales**

Temperatura ambiente	Mínima: 20.0 °C	Máxima: 22.0 °C
Humedad relativa	Mínima: 50 %v	Máxima: 61 %v

**7. Condiciones de Calibración**  
La calibración se realizó bajo condiciones nominales de uso del equipo.

Este certificado de calibración únicamente es válido si el cliente garantiza la correcta utilización del equipo de acuerdo con el Sistema Internacional de Unidades (SI).  
Este certificado de calibración, no aplica, en caso de haber sido utilizado para fines diferentes a los que fueron autorizados por el fabricante del equipo.  
Con el fin de asegurar la calidad de sus mediciones se recomienda al cliente mantener sus instrumentos y equipos en condiciones apropiadas de acuerdo a sus condiciones y mantenimiento.  
Este certificado de calibración sólo puede ser usado para fines relacionados a un procedimiento de control de calidad en la fabricación (plano y proceso) de SAT.  
SAT S.A.C. no se responsabiliza de los resultados de mediciones de los equipos de medición que no fueron autorizados por el fabricante del equipo.  
El certificado de calibración en la firma y sello del responsable de SAT, con el sello de la acreditación INACAL/DIA.



Medidor de condiciones ambientales: IM-THBD-03      Certificado de  
 calibración:      LH-093-2020

INACAL Instituto Nacional de Calidad Metrología Laboratorio de Higrometría		<b>Certificado de Calibración</b>  <b>LH - 093 - 2020</b>
		Página 1 de 4
Expediente	1039623	Este certificado de calibración documenta la trazabilidad a los patrones nacionales, que realizan las unidades de medida de acuerdo con el Sistema Internacional de Unidades (SI).  La Dirección de Metrología custodia, conserva y mantiene los patrones nacionales de las unidades de medida, calibra patrones secundarios, realiza mediciones y certificaciones metrologías a solicitud de los interesados, promueve el desarrollo de la metrología en el país y contribuye a la difusión del Sistema Legal de Unidades de Medida del Perú (SLUMP).  La Dirección de Metrología es miembro del Sistema Interamericano de Metrología (SIM) y participa activamente en las intercomparaciones que éste realiza en la región.  Con el fin de asegurar la calidad de sus mediciones el usuario está obligado a recalibrar sus instrumentos a intervalos apropiados.
Solicitante	KOSSODO METROLOGIA S.A.	
Dirección	Jr. Chota N° 1161 - Cercado De Lima	
Instrumento de Medición	TERMOHIGROMETRO	
Indicación	DIGITAL	
Intervalo de Indicación	-20 °C a 80 °C ; 0 %hr a 100 %hr (%)	
Resolución	0,1 °C ; 0,1 %hr	
Marca	DELTA OHM	
Modelo	HD2001	
Procedencia	ITALIA	
Número de Serie	11007683	
Fecha de Calibración	2020-10-12 al 2020-10-16	
Este certificado de calibración sólo puede ser difundido completamente y sin modificaciones. Los extractos o modificaciones requieren la autorización de la Dirección de Metrología del INACAL. Certificados sin firma digital y sello carecen de validez.		
Responsable del área		Responsable del laboratorio
		
		Firmado digitalmente por CALZADO CASTRINO Juan Manuel CAU 20000101015 PPS Fecha: 2020.10.19 11:26:19

### Anexo 3:

## Oficio de INACAL otorgando la acreditación al procedimiento de calibración

	<b>PERÚ</b>	Ministerio de la Producción	Instituto Nacional de Calidad INACAL	Dirección de Acreditación
---	-------------	-----------------------------	--------------------------------------	---------------------------

"Decenio de la Igualdad de Oportunidades para mujeres y hombres"  
"Año del Bicentenario del Perú: 200 años de Independencia"

San Isidro, 06 de mayo de 2021

**CÉDULA DE NOTIFICACIÓN N°215-2021-INACAL/DA**

Señora  
**Anna Sagi Benedek**  
Representante Legal  
KOSSODO METROLOGIA S.A.C.  
Jr. Chota N° 1161, Cercado de Lima  
Lima. –

Asunto : Otorgamiento de la Ampliación de la acreditación

Referencia : Expediente N° 0490-2019-DA

Cumplo con notificar lo siguiente: **VISTO** los resultados del:

- Laboratorio de calibración: KOSSODO METROLOGIA S.A.C
- Ubicado en : Jr. Chota N° 1161, Cercado de Lima
- En su proceso de : Ampliación

Y **CONSIDERANDO** que cumple con los criterios de acreditación de la NTP-ISO/IEC 17025:2017 y los documentos normativos de la Dirección de Acreditación del Instituto Nacional de Calidad'; por tanto de conformidad con la aprobación del Comité Permanente de Acreditación que consta en el acta de fecha 30 de abril de 2021 se resuelve; **OTORGUESE** a **KOSSODO METROLOGIA S.A.C.**, la ampliación solicitada, según lo dispuesto en el numeral 5.15 del Procedimiento General de Acreditación.

La vigencia de la ampliación de la acreditación surte efecto desde el **07 de mayo de 2021**

Lo que notifico a usted conforme a Ley.

Atentamente.

 Firmado digitalmente por RODRIGUEZ ALEGRIA  
Alejandra FAU 20600283015 soft  
Fecha: 2021-05-06 14:24:46  
Motivo: Soy el Autor del Documento