

Termometría de superficie en la Industria: Un método de calibración

Francisco J. Yebra Ferro, Cristina Torreiro Sebastián, Fernando Troncoso Caamaño,
Natalia Ribao Guzmán, David Fernández Herrero
Laboratorio Oficial de Metrología de Galicia (LOMG)
Av. de Galicia. Parque Tecnológico de Galicia. San Cibrao das Viñas 32901 (Ourense)
(²) (+34 988 368 124) yebra@lomg.net.

- RESUMEN

La medida de temperatura y la calibración de termómetros están profundamente asentadas en la industria y los centros de metrología orientados a ella. Una consecuencia de esto es que ambos procesos se hallan bien definidos y en un nivel de sistematización elevado, aunque no por ello exentos de problemas por solucionar. La calibración en puntos fijos o por comparación se aplica a una gran mayoría de los instrumentos que intervienen en los procesos industriales. La precisión alcanzable por estos métodos está ampliamente estudiada y satisfacen la práctica totalidad de las necesidades industriales. Existen, no obstante, demandas en la industria que no están plenamente satisfechas con los métodos habituales. En este conjunto se encuentra la termometría de superficie (o de material) por contacto con sólidos. Desde la metrología dimensional hasta procesos habituales en industria de automoción o aeronáutica (con frecuencia procesos de pintura y secado) requieren de estas técnicas. Las buenas prácticas en metrología sugieren que la calibración de los instrumentos se realice en condiciones de reproducibilidad, pero lo más parecidas posibles a las condiciones de uso, de este modo, cualquier efecto o comportamiento que pueda mostrar el sistema de medida, se verá reflejado durante su calibración.

Planteamos una técnica para la calibración de sensores de temperatura superficial y un método de validación de la misma. Asimismo se valoran algunas de las componentes de incertidumbre importantes que, con los métodos habituales, resultan menos relevantes. Un aspecto diferenciador de la metodología aquí descrita respecto a la de la referencia [10] estriba en que las medidas (tanto en su uso habitual como en su calibración) se realizan en ausencia de gradientes térmicos, sin flujo de calor por convección. Esto restringe el campo de aplicabilidad del método aunque demuestra su adecuación a determinados casos como los mencionados anteriormente. El rango de aplicación se encuentra entre -50 y 150 °C, aunque podría fácilmente extenderse a un intervalo algo más amplio (-80 a 200 °C).

1. INTRODUCCIÓN

En la industria de la automoción o la aeronáutica, existe la necesidad de medir la temperatura de piezas materiales en diversos procesos, tales como los de pintura o de simulación de irradiación solar. En estos casos, tras un primer proceso de pintura propiamente, las piezas se secan durante un período de tiempo suficiente, según la experiencia en el proceso. En el caso de la industria aeronáutica, encontramos procesos de secado de pintura a temperaturas de 60 u 80 ±10 °C (en recinto), mientras que en automoción implica pre-tratamientos (Fosfatación y Cataforesis) con lavado y secado a T>140°C (con margen amplio de variabilidad) y procesos de secado de materiales para la estanqueidad (antigravilla) con secado más restrictivo, de 14 minutos a 170°C. Posterior a este proceso, tanto la imprimación como la aplicación de las lacas requieren de pasos por horno de secado a 140 °C. En lo

referente a ensayos de simulación solar varían entre -20°C y 120°C . La precisa medida de temperatura en las piezas puede suponer un ahorro importante de tiempo y de energía (y por tanto de coste) para estos procesos. Debe tenerse en cuenta que podemos estar hablando de cabinas de aire de $6\text{m} \times 4\text{m} \times 3\text{m}$ (LxWxH): unos 75 m^3 a mantener en esos valores de temperatura.

Tratamos, en este trabajo, de proporcionar una vía de calibración más acorde con la forma de uso tan particular para la que están diseñados estos instrumentos y comprobar hasta que punto son adecuados otros métodos más habituales para la calibración. Asimismo, podrán identificarse algunas componentes de incertidumbre relevantes. Además de todo esto, hay una gran variedad de diseños de sensores de temperatura superficial, algunos de ellos con carcasa, o con el sensor expuesto al ambiente y diseñado para entrar en contacto directo con la superficie material de la que se desea medir la temperatura, otros, encapsulados en una pastilla de material conductor térmico para su buen contacto. En muchos de ellos existen dificultades logísticas que hacen complicada la calibración en baños de líquido. A saber: la imposibilidad de “mojar” los sensores resistivos, en caso de que estén descubiertos o pueda filtrar líquido la carcasa que los monta.

El presente trabajo extiende, además de lo expuesto anteriormente, la experiencia llevada a cabo en la referencia [4], ampliando su rango de aplicabilidad y variando el diseño del dispositivo material para mejorar los flujos de calor.

1.1 Fundamento Teórico

En los métodos de calibración de termómetros y sensores termométricos por comparación, el principio básico que sustenta la validez es el llamado principio “cero” de la termodinámica [1], en virtud del cual dos sistemas físicos puestos en “contacto térmico” con un tercero y aislado el conjunto del universo y el uno del otro, puede decirse que se encuentran en equilibrio (térmico) entre sí. Cuando se efectúa una calibración por comparación, se disponen en un mismo medio material el sistema termométrico patrón y el calibrando, aislándolos del resto del universo y aguardando que se alcance un estado de equilibrio en el proceso caracterizado por un comportamiento cíclico (en respuesta del sistema de control del medio) del conjunto a los gradientes térmicos. Tanto si se trata de un baño de líquido, como de sales fundidas o de un bloque sólido (seco), el proceso se basa en asegurar que tanto calibrando como patrón miden la temperatura del mismo sistema (el medio de intercambio o de comparación) dentro de unos valores de uniformidad, estabilidad y magnitudes asociadas al medio de comparación y al modo en que se usa en relación al modo en que se calibró/caracterizó. (fig. 1)

Los sistemas de control del medio de comparación (baño, horno...) permiten mantener estable la temperatura contra los gradientes creados frente al ambiente, donde se establecen una serie de flujos de calor que hacen posible comparar patrón y calibrando. (fig 1)

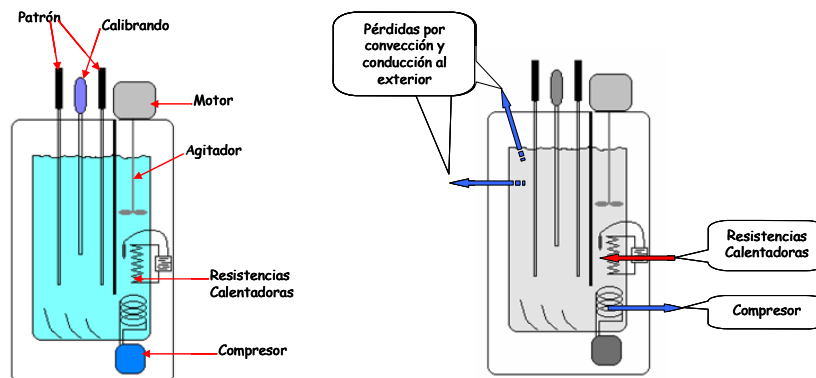


Fig 1: Esquema flujos de calor en una calibración en baño termostático.

La primera observación relevante que se extrae del estudio del proceso de medida arriba mencionado (utilización de estos dispositivos/sensores) es que su funcionamiento se realiza en condiciones de ausencia (o baja influencia) de convección térmica. Esto restringe la aplicabilidad del método para instrumentación empleada en estas condiciones de nula o baja convección.

El proceso empleado para la calibración de los sensores (TLD) en este caso consiste en la medida de la temperatura de un material simultáneamente con dos sensores TRP100 “delgados” (4mm) casi a ras de superficie (1mm aproximadamente), pero embutidos en el material, y por el sensor calibrando, en este caso se han medido cinco TRP100 embutidas en piezas de material buen conductor térmico (Aluminio) con una cara plana para contacto con la superficie del material del que se quiere medir la temperatura. El sistema de control consiste en una cámara climática con rangos de -50 a 150 °C, y de 10 a 98 %hr.

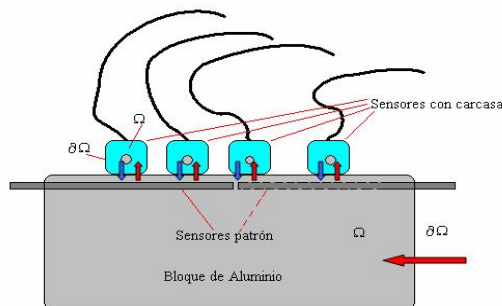


Fig 2: Esquema del sistema de calibración en material.

El análisis de los órdenes de magnitud que intervienen en el equilibrio térmico de los sistemas justifica la posibilidad de comparación de ambos casos.

Las relaciones que expresan la física del problema en ambos casos son:

$$\rho \cdot c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) \quad \Rightarrow \quad \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{\rho \cdot c_p} \nabla^2 T \quad \text{en } \Omega$$

$$\text{Con condiciones de frontera:} \quad -\lambda \cdot \nabla T = h \cdot (T - T_\infty) \cdot \bar{n} \quad \text{en } \partial\Omega \quad \text{Donde:}$$

ρ = Densidad del material (Aluminio ~ 2700 kg·m⁻³)

c_p = Capacidad calorífica del material (Aluminio ~ 900 J·kg⁻¹·K⁻¹)

T = Campo de temperaturas en el medio, como función de la posición y del tiempo.

t = variable tiempo

λ = Conductividad térmica del material (Aluminio ~ 209 W·m⁻¹·K⁻¹)

Ω = Dominio (espacial) que ocupa el sistema material cuyo campo de T está bajo estudio.

$\partial\Omega$ = Frontera, superficie, contorno del sistema material contenido en Ω .

En el estado estacionario ideal, se anulan los términos de ambas ecuaciones, pero ante pequeñas perturbaciones de la temperatura del fluido térmico, el material responde según sus características de conductividad, capacidad calorífica y densidad, y la transferencia de la energía al interior se produce según el coeficiente de convección, cuyo valor depende del fluido y del régimen de flujo. Para líquidos supera los 1000 W/m²·K y para gases varía entre 1 y 200 W/m²·K según sea convección natural o forzada.

En el caso de calibraciones por comparación en baños de líquido al referirnos a Ω , hablamos de las sondas de los termómetros (con los diámetros de vainas habituales, entre 3 y 10 mm) de acero inoxidable habitualmente, o piezas de metal con termopar, embutido o expuesto, si hablamos de ambientes industriales más agresivos. Su frontera $\partial\Omega$, es su superficie en contacto con el fluido térmico (alcoholes, agua, aceites...). En el caso estudiado en este trabajo, Ω está representado por la pieza material diseñada al efecto, y su frontera,

corresponde a la superficie, teniendo en cuenta que el material debe ser un excelente conductor térmico (metal, desde luego) que disipe los gradientes e inestabilidades de manera rápida y eficaz. Podemos decir que se sustituye el fluido térmico por un sólido ecualizador del campo de temperaturas. No obstante, el aire sigue funcionando como fluido térmico externo pero su transferencia de calor se encuentra ralentizada y amortiguada por el material sólido.

Como se ve, la clave para conseguir un medio homogéneo y estable de comparación radica en los valores de los parámetros h , λ , ρ y c_p del problema. Una variable del flujo y tres del material. Los tres últimos se extraen de la literatura [2,5] y el valor del coeficiente de transferencia (h), se calcula a partir de la relación de Pohlhausen [2,5] $h \cdot L / \lambda = Nu = 0,664 \cdot Re^{1/2} \cdot Pr^{1/3}$ para regímenes de flujo con $Re < 2 \cdot 10^5$ y $0,6 < Pr < 1,0$. Que es el caso que nos ocupa, al ser la velocidad de flujo de la cámara entre 4 y 7 m/s, con efectos de turbulencia de alrededor del 20% en direcciones transversales y longitudinal.

En la frontera del sólido con el aire, cualquier perturbación introducida a través de la frontera causada por diferencias de temperatura en el aire se transmite al interior de la siguiente manera:

$$-\lambda \nabla T = h \cdot (\delta T) \cdot \vec{n} \quad \Rightarrow \quad |\delta T|_{mat} = \frac{h}{\lambda} \cdot |\delta T|_{aire} \cdot \Delta L_{mat} \quad \text{Con:}$$

δT_{mat} = Perturbación inducida en el campo de temperatura del material (Variable a calcular)

δT_{aire} = Perturbación en la temperatura del aire alrededor del material (0,3°C inestabilidad ó 3°C en inhomogeneidad) (Ver tabla 1)

h = Coeficiente de transferencia de calor por convección (~30W/m²·K)

λ = Conductividad térmica del material (Aluminio ~210 W/m·K)

ΔL_{mat} = Dimensión característica del material (aproximadamente 10 cm en la dirección de flujo y en su perpendicular)

Las perturbaciones en temperatura introducidas por inestabilidades o inhomogeneidades se calculan a partir de los datos de caracterización del recinto isoterma, cumpliendo los requisitos de la referencia [3].

Tª Nominal (°C)	Inestabilidad Máxima (°C)	Inhomogeneidad Máxima(°C)
-50	0,10	0,84
1	0,03	0,52
20	0,06	0,26
70	0,10	1,0
100	0,10	1,9
150	0,26	3,0

Tabla 1: Resultados de la caracterización de la cámara climática en su volumen completo.

Las perturbaciones tabuladas en la tabla anterior para el aire se traducen a energía atenuándose por la relación h/λ (~0,15 °C/m) en la frontera del material, y estas a su vez se propagan a través del material (Al) en todas direcciones, disipándose a elevada velocidad marcada por la conductividad térmica (λ). De este modo, puede considerarse que el “fluido térmico”, en el caso de medida superficial está representado por el propio sólido, que iguala las temperaturas. Para esto, es importante que tenga una cantidad de masa considerablemente superior a la de los sensores (592g del material frente a 18g de los sensores en nuestro caso), así como, sobre todo, una conductividad térmica elevada, con cualidades para absorber las inestabilidades inducidas desde el fluido térmico (aire) y para disipar los gradientes del mismo modo inducidos. Con esos datos (Tabla 1), el resultado para la perturbación introducida por inestabilidades es del orden de 0,045°C/m, y para la magnitud de las inhomogeneidades, de 0,45°C/m. Esto, para un material de dimensiones lineales alrededor de 10cm, nos proporciona

unas perturbaciones despreciables (~5mK) por inestabilidad del aire, y algo superiores (~50mK) por las faltas de uniformidad (3°C en el peor de los casos). Estos cálculos se llevan a cabo con los datos de la caracterización completa de la cámara, aplicada al pequeño volumen que ocupa el material.

2. DESARROLLO/DESCRIPCIÓN

Hemos efectuado las medidas para sensores de PRT100 con vainas de 3 (2 unidades) y 4 (3 unidades) mm de diámetro externo y 30 mm de longitud, embutidas en prismas de Aluminio de 10x10x50 mm³ con caras planas longitudinales para contacto. Sensores con “transferencia térmica ideal” (conductividad muy elevada y cara de contacto plana y pulida, sin defectos) que, a priori, no deberían presentar deficiencias en el contacto.

Para la calibración en condiciones similares a las de uso, se dispone de un bloque material atemperado, cuya temperatura se mide en huecos practicados próximos a la superficie expuesta y paralelos a la misma. Los sensores, envainados en termopozos de 3 mm de diámetro, se encuentran a menos de 1 mm de profundidad, según el esquema de la figura 2.

El útil de comparación se dispone en la cámara de manera que el flujo lo atempera a medida que todo el aire ambiente de la misma (unos 300L) se aclimata a las condiciones solicitadas. En este sentido, el funcionamiento es similar al de un baño de líquido de comparación, patrón y calibrando miden la temperatura de un fluido térmico en dos puntos diferentes del espacio, cuya comparabilidad se acota mediante la caracterización del recinto.

Se realiza la calibración por inmersión, midiendo en los valores de 0, -50, -20, 20, 50, 100, 150 y 0 °C, y en material, en 20, -50, -20, 0, 50, 100, 150 y 20 °C. Los puntos finales se emplean para evaluar la reproducibilidad del sensor y el método. La medida de cada punto duró aproximadamente 6 horas entre estabilización del recinto y del material.

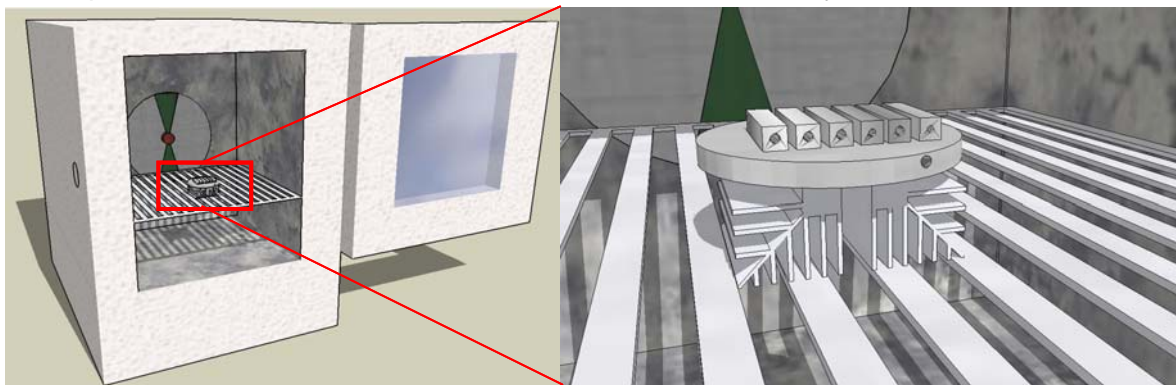


Fig 3: Esquema y detalle de la posición del útil material en la cámara

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El análisis de los resultados de la calibración con el método propuesto se basa en la comparación contra un método tradicional por comparación. Esto se establece como una comparación entre ambos procesos, tomando como referencia los resultados de la calibración de los sensores por inmersión, dado el alto nivel de estandarización del método y lo extendido que está. De esta manera, el parámetro que determine el grado de validez de los resultados será el Error Normalizado, como variable aleatoria distribuida, a priori, conforme a una Normal de media 0 y desviación típica 1. Los resultados de la calibración de referencia se muestran en la tabla 2:

Sensor T Nominal (°C)	Ch1		Ch2		Ch3		Ch4		Ch5	
	Corrección (°C)	U (95,45%) (°C)	Corrección (°C)	U (95,45%) (°C)	Corrección (°C)	U (95,45%) (°C)	Corrección (°C)	U (95,45%) (°C)	Corrección (°C)	U (95,45%) (°C)
-50	0,002	0,069	-0,071	0,068	-0,038	0,067	0,241	0,069	0,010	0,068
-20	0,014	0,058	-0,083	0,057	0,042	0,057	0,089	0,058	-0,036	0,057
0	-0,043	0,055	-0,131	0,054	-0,003	0,053	-0,019	0,055	-0,087	0,054
20	-0,038	0,058	-0,144	0,057	0,013	0,057	-0,068	0,058	-0,135	0,057
50	-0,088	0,081	-0,214	0,080	-0,035	0,080	-0,150	0,081	-0,210	0,081
100	-0,029	0,064	-0,055	0,063	0,152	0,063	-0,154	0,064	-0,215	0,063
150	0,000	0,071	-0,029	0,070	0,236	0,070	-0,150	0,071	-0,203	0,070
0	-0,054	0,055	-0,126	0,054	0,000	0,053	-0,007	0,055	-0,080	0,054

Tabla 2: Resultados de la calibración por inmersión en baños de líquido.

Para estos resultados, la incertidumbre obtenida cuenta con las siguientes componentes:

Componente (x_i)	$u(x_i)$	Distribución	ν_i
Incertidumbre de Calibración Patrón (°C)	0,025	Normal	∞
Deriva del Patrón a largo plazo (°C)	0,012	Uniforme	
Resolución del Patrón (°C)	0,0003	Uniforme	
Uniformidad del Baño (°C)	0,009	Uniforme	
Estabilidad del Baño (°C)	0,029	Uniforme	
División de Escala (°C)	0,0003	Uniforme	tipo B
Magnitud Influencia (Inmersión) (°C)	0,017	Uniforme	
Reproducibilidad en 0°C (°C)	0,007	Uniforme	
mm. ii. (Unión Referencia Termopar) (°C)	0,000	Uniforme	
Desviación típica (10 Lecturas)	0,002	Normal	9 tipo A
			$u_c = 0,040$ °C
			$\nu_{\text{eff}} > 10^4$
			$k(95\%) < 2,05$
			$U_c = 0,080$ °C

Tabla 3: Componentes de Incertidumbre para la calibración por inmersión. Análisis para uno de los puntos medidos.

Tras esta calibración "de referencia", se procedió a efectuar las medidas en superficie de material, de la manera redactada en el apartado 2.

Sensor T Nominal (°C)	Ch1		Ch2		Ch3		Ch4		Ch5	
	Corrección (°C)	U (95,45%) (°C)	Corrección (°C)	U (95,45%) (°C)	Corrección (°C)	U (95,45%) (°C)	Corrección (°C)	U (95,45%) (°C)	Corrección (°C)	U (95,45%) (°C)
-50	0,12	0,18	0,09	0,17	0,17	0,17	0,17	0,20	0,11	0,20
-20	0,04	0,18	-0,03	0,18	0,09	0,17	0,06	0,20	0,01	0,20
0	-0,16	0,19	-0,25	0,19	-0,12	0,18	-0,16	0,21	-0,21	0,21
20	-0,04	0,17	-0,15	0,17	0,02	0,16	-0,06	0,19	-0,11	0,19
50	-0,12	0,17	-0,25	0,17	-0,07	0,16	-0,15	0,19	-0,21	0,19
100	-0,02	0,20	-0,22	0,20	0,04	0,19	-0,07	0,22	-0,13	0,22
150	-0,04	0,24	-0,30	0,24	0,04	0,23	-0,12	0,26	-0,20	0,25
150	-0,04	0,24	-0,31	0,24	0,02	0,23	-0,12	0,25	-0,19	0,25
20	0,07	0,20	-0,04	0,20	0,12	0,19	0,08	0,22	0,02	0,22

Tabla 4: Resultados de la calibración por el método propuesto: Medida en material o en superficie.

La incertidumbre obtenida para las medidas efectuadas con el método de superficie se evalúa recopilando las siguientes contribuciones:

Temperatura Nominal	-50°C	20°C	100°C	150°C		
Componente (x_i)	$u(x_i)$	$u(x_i)$	$u(x_i)$	$u(x_i)$	Distribución	ν_i
Incertidumbre de Calibración Patrón (°C)	0,040	0,040	0,040	0,040	Normal	∞
Deriva del Patrón a largo plazo (°C)	0,029	0,029	0,029	0,029	Uniforme	
mm.ii. Patrón (Autocalentamiento) (°C)	0,035	0,035	0,035	0,035	Uniforme	
Resolución del Patrón (°C)	0,0003	0,0003	0,0003	0,0003	Uniforme	
Uniformidad del Material (°C)	0,009	0,002	0,020	-0,002	Uniforme	
Estabilidad del Material (°C)	0,003	0,004	0,003	0,004	Uniforme	
División de Escala (°C)	0,0003	0,0003	0,0003	0,0003	Uniforme	
Reproducibilidad en 20°C (°C)	-0,067	-0,067	-0,067	-0,067	Uniforme	
Magnitud Influencia (Gradiente) (°C)	0,022	0,010	0,050	0,090	Uniforme	
Desviación típica (10 Lecturas)	0,002	0,001	0,002	0,003	Normal	
ν_{eff}	6900	6203	2738	2634	t-Student	$k(95\%) < 2,05$
U_c (°C)	0,18	0,17	0,20	0,24	~ Normal	$k \approx 2$

Tabla 5: Componentes de Incertidumbre para la calibración en superficie. Análisis para un sensor en varios nominales..

Como se aprecia, la incertidumbre de medida es considerablemente superior a la obtenida mediante la calibración en baño de líquido, aproximadamente entre 3 y 4 veces, aunque es

notablemente inferior a la que se obtendría calibrando en aire, sobre todo en los valores extremos de temperatura nominal. De aquí se extrae que el método propuesto se posiciona entre ambas técnicas en lo que a calidad de la medida se refiere. La compatibilidad queda demostrada según el estudio de los Errores Normalizados (o índices de compatibilidad) para cada sensor, en cada nominal de temperatura:

Tª (°C) / Sensor	Ch1	Ch2	Ch3	Ch4	Ch5	Media
-50	-0,60	-0,87	-1,12	0,35	-0,47	0,011
-20	-0,13	-0,28	-0,25	0,15	-0,20	
0	0,60	0,62	0,61	0,64	0,58	
20	0,02	0,03	-0,01	-0,06	-0,11	
50	0,16	0,19	0,17	0,01	-0,02	
100	-0,03	0,78	0,55	-0,37	-0,37	Desviación
150	0,17	1,08	0,84	-0,10	-0,02	Típica
20	-0,54	-0,51	-0,54	-0,66	-0,69	0,494

Tabla 6: Relación de Errores normalizados de la comparación entre ambos tipos de medida.

La distribución corresponde de manera aproximada a una normal, dentro de la baja significación estadística de las 40 medidas planteadas (sumando todos los sensores).

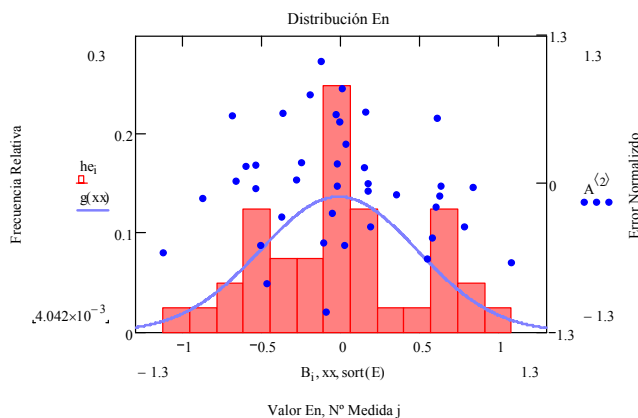


Fig 4 : Distribución de los errores normalizados.

3.1 Componentes de Incertidumbre “ad hoc”

En el método desarrollado, pueden apreciarse dos componentes de incertidumbre “especiales” que no tienen cabida en el método de inmersión en líquido. Una de ellas se refiere al efecto de autocalentamiento de los patrones (un efecto menor) que en los sensores utilizados se distribuye uniformemente en un intervalo de unos 60mK según se estudió en baño de hielo fundente. La curva estudiada de autocalentamiento en 7s de lectura para las sondas sumergidas en baño de hielo corresponde a:

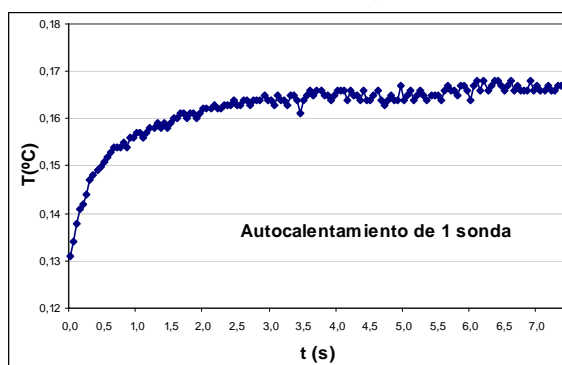


Fig 5: Curva de Autocalentamiento medida en hielo fundente

El otro efecto tiene que ver con el gradiente térmico observado en la zona de medida y que da cuenta de la lenta curva de aproximación hacia la estabilidad, principalmente en temperaturas extremas. A lo largo de la calibración se midieron los siguientes gradientes térmicos entre las sondas de referencia embutidas en el material y dos sensores sumergidos en el aire a 50 mm por encima de los sensores calibrando:

Tª nominal(°C)	-50	-20	0	20	50	100	150
ΔT (°C)	-0,13	-0,07	0,06	-0,06	0,03	0,31	0,74

Tabla 7: Gradientes térmicos registrados durante el proceso.

Las componentes de incertidumbre de uniformidad y estabilidad del material (no son características de esta técnica) se extraen de las medidas, valorando las máximas diferencias en los casos más desfavorables, entre las sondas de referencia. Entre ambas (corregidas) para la uniformidad y cada una consigo misma para la estabilidad. En estos valores se aprecia una gran estabilidad y uniformidad alcanzadas con el bloque térmico, que prueban las disquisiciones teóricas del apdo. 2.

4. CONCLUSIONES

Tras el estudio realizado y a la vista de los resultados obtenidos, se pueden obtener varias conclusiones sobre el sistema de calibración propuesto:

1.- El método es válido para los modelos de sensores evaluados en el estudio, dada la distribución de errores normalizados obtenida. Si bien los sensores empleados no eran de elevada calidad técnica (PRT100 clase B, sin atmósfera inerte) para representar mejor el caso industrial.

2.- Los valores extremos de temperatura (-50 y 150 °C) son los que encierran una mayor complicación (algo que se podía sospechar a priori) y que son los casos en los que se deberá poner especial atención en posteriores desarrollos o estudios.

3.- El sistema de validación (por comparación con una calibración en líquido) es adecuado siempre y cuando los efectos propios del contacto o de la transmisión asimétrica de calor no aparezcan de forma dominante.

4.- Con este sistema, se reducen las incertidumbres respecto a la calibración en aire. Esto es importante en sensores que no se deban mojar y no se puedan proteger con vainas o termopozos de diámetro reducido.

En la siguiente tabla se pueden ver valores “habituales” de laboratorios acreditados para calibración por comparación en baños de líquido y para calibración en aire.

Temperatura (°C)	U Líquido (°C)	U Material (°C)	U Aire (°C)
-50	0,050	0,18	0,70
-20	0,030	0,17	0,40
0	0,010	0,17	0,30
20	0,030	0,11	0,15
50	0,030	0,17	0,40
100	0,030	0,20	0,70
150	0,050	0,24	1,30

Tabla 8: Valores habituales de incertidumbre (expandida) para calibraciones en Aire, Líquido y en “Material”

Puede decirse que el método aplicado se adecua correctamente a la calibración de sensores que funcionan en ausencia de gradientes térmicos o con gradientes minimizados, los métodos de determinación del campo de temperaturas a través del campo de gradientes desarrollados en la literatura [6, 7, 8, 10] no son los más adecuados puesto que en estos casos no existe una dirección de gradiente privilegiada y por tanto no se puede extrapolar la medida

de diferencias térmicas al valor de la superficie. En todo caso, pasa a formar parte de la incertidumbre estimada del modo explicado o de alguna otra manera.

Quedan por desarrollar mediciones similares para otros tipos de sensores con formas geométricas variadas, y evaluar también su comparabilidad con los resultados por inmersión.

5. REFERENCIAS

- [1] C. J. Adkins, "Termodinámica del Equilibrio" Ed. Reverté S.A. pg 17.
- [2] A. J. Chapman, "Transmisión del calor" Ed. MBH.
- [3] ENAC, "NT-04: Caracterización de Recintos Isotermos" rev.2 Junio 2004.
- [4] F. Yebra y otros: "Procedure for the calibration of surface temperature sensors used in dimensional metrology" Metrología 44 (2007. 217-221)
- [5] Kreith & Bohm: "Principios de Transferencia de Calor". Ed. Thomson. pg 262
- [6] R. Morice, E. Devin: "La mesure par contact des températures de surface : étalonnage des capteurs de surface et traçabilité des mesures". Congrès Français de Thermique. SFT 2000.
- [7] L.N.E. "Guide d'étalonnage des capteurs de température surface en vue d'améliorer l'exactitude des mesures"
- [8] Tibor, K. "Qualification of temperature field by temperature gradient", VDI Berichte. Pg 275
- [9] CENAM, EMA "Guía Técnica sobre trazabilidad e incertidumbre en la medición de temperatura en sólidos en laboratorios de ensayo". 2004
- [10] EUROMET PROJECT 65 "Comparison of the reference surface temperature apparatus at NMIs by comparison of transfer surface temperature standards" OMH, Final Report 2003.
- [11] JCGM 200:2008 "International vocabulary of metrology- Basic and general terms (VIM)"

6. AGRADECIMIENTOS

6. Quisiéramos agradecer la colaboración prestada en el presente trabajo a Julio A. Cabanelas, por su aportación e inestimable perspectiva en la logística, y a Javier Rodríguez, por sus profundas aportaciones en las disquisiciones teóricas y de planteamiento práctico. También agradecer la valiosa información proporcionada por Ángel Durán y sus compañeros responsables del proceso de pintura de PSA-Citroën (Vigo).

7. MATERIAL Y TRAZABILIDAD

Todas las medidas de temperatura realizadas son trazables a la escala EIT-90 a través de laboratorios nacionales de países firmantes del acuerdo de reconocimiento mutuo (MRA). Los términos metrológicos empleados en este texto están extraídos de [11].

Para las medidas de temperatura de los sensores de referencia se ha empleado un puente de medida de resistencia en corriente alterna (ASL F250) y para la medida de los sensores calibrando, un multímetro (Agilent 34970A) de 6 ½ dígitos. La cámara climática empleada en la calibración en superficie, es de marca ARALAB EDTU50 y la calibración por inmersión se realizó contra RTP100 con puente de medida de resistencia (ASL F250) en baños de marca ASL/HETO y JULABO.