MEDICIONES EN EL LABORATORIO DE TERMOMETRÍA DE RADIACIÓN PARA LA PARTICIPACIÓN DEL CENAM EN LA COMPARACIÓN CLAVE "K5" DEL COMITÉ CONSULTIVO DE TERMOMETRÍA

Hugo Rodríguez Arteaga
Centro Nacional de Metrología (CENAM), División de Termometría,
km 4,5 Carretera a Los Cués, El Marqués, Querétaro, México,
Teléfono: (442) 211-0500 ext. 3465; Fax: (442) 211-0548
hrodrigu@cenam.mx

Resumen: Se reportan las calibraciones de dos lámparas de filamento de cinta de tungsteno, patrones para la realización de temperaturas de radiancia para calibrar termómetros de radiación. La calibración sirvió para la participación del CENAM en la comparación internacional K5, convocada por el Comité Consultivo de Termometría del BIPM. Se describen el sistema de medición, las preparaciones de las lámparas y una verificación de su reproducibilidad. También se describen las mediciones y las correcciones realizadas y se presentan los resultados obtenidos y reportados a los coordinadores. Finalmente se presentan los "grados de equivalencia" informados de manera preliminar al CENAM por el grupo coordinador de la comparación.

INTRODUCCIÓN

El Comité Consultivo de Termometría del BIPM, durante su 19ª sesión celebrada en septiembre de 1996, decidió convocar a una comparación internacional de realizaciones locales de la Escala Internacional de Temperatura de 1990 (EIT-90) desde el punto de solidificación de la plata hasta 1700 °C, usando lámparas de filamento de cinta de tungsteno de estabilidad elevada, como patrones de transferencia. Ésta fue calificada como una comparación clave y se le asignó el número "K5", la cual tendría el efecto potencial de apoyar a los trabajos de reconocimiento mutuo, invocando una equivalencia entre las realizaciones locales de la EIT-90 en el intervalo de temperaturas contemplado.

En las calibraciones de termómetros de radiación, las lámparas de filamento de cinta han constituido un conjunto de patrones de uso relativamente simple, ya que mediante el ajuste del valor de la corriente que se suministra al filamento, se puede generar una gama amplia de valores de temperaturas de radiancia. Véase la figura 1.

La temperatura que se mide no es la temperatura del filamento, ya que la medición se ve afectada por la emisividad del material con que se le construye y por la transmitancia del bulbo de vidrio que lo envuelve. Por ello, a la temperatura medida se le denomina como "temperatura de radiancia". Su calibración se realiza a la longitud de onda del pirómetro utilizado, que mediante la ley de radiación de Planck, permite asignar el valor de uno de los puntos de definición de la EIT-90 [1] a una temperatura de radiancia del filamento, la cual es producida a un valor específico de corriente.

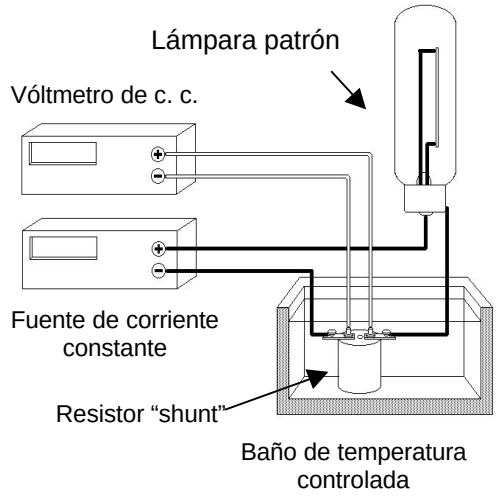

Fig. 1 *Arreglo para producir las temperaturas de radiancia del filamento en una lámpara patrón.*

En el protocolo de la comparación se solicitó reportar los valores medidos de temperatura de radiancia de dos lámparas viajeras, a una longitud de onda de 650 nm, para el conjunto de valores de corriente continua indicados en la tabla 4.

Las lámparas fueron prestadas por el National Physical Laboratory (NPL) de Inglaterra, de marca Polaron, tipo 10V "biposte", con números de serie C860 y C864, cuyo diseño se bosqueja en la figura 2.

Como patrón de transferencia, se utilizó el pirómetro IKE modelo LP2, del laboratorio de Termometría de Radiación del CENAM, calibrado contra un cuerpo negro del punto de solidificación de la plata, que forma parte del Patrón Nacional de temperatura en el intervalo superior de la EIT-90 y que es mantenido por ese laboratorio. Ese cuerpo negro fue comparado con otro de construcción similar, propiedad del NPL [2].

En la figura 2, el filamento de la lámpara está visto de lado y por eso se presenta como una línea que representa a su espesor y no a su ancho, (se ve paralelo al soporte de níquel). También, una de las dos terminales queda oculta atrás de la otra.

La temperatura de radiancia del filamento se mide a través de una de las dos ventanas, en una dirección normal al plano de la misma.

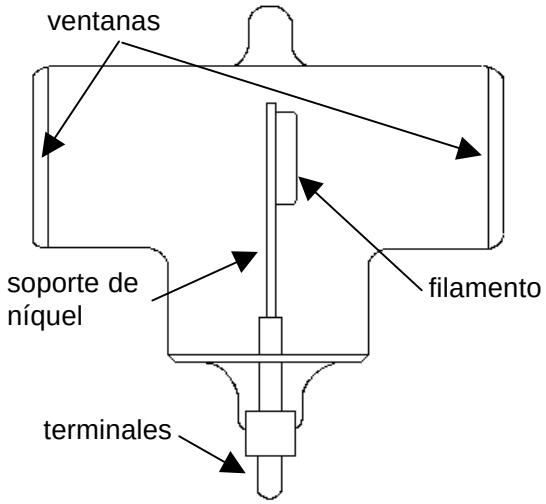

Fig. 2 *Vista lateral de una lámpara tipo "biposte".*

DESARROLLO DE LAS MEDICIONES

Mediciones iniciales

Como prueba inicial, se midió la resistencia eléctrica del filamento en las terminales de la lámpara, a la temperatura del laboratorio. A este parámetro se le designó como R_{AMB} y su valor se determinó utilizando el método de "cuatro puntas", usando cables para conectar las terminales de la lámpara bajo estudio a las terminales de un puente termométrico ASL-F18 donde normalmente se conecta un termómetro de resistencia patrón.

El método de cuatro puntas consiste en conectar un par de cables para suministrar una corriente constante a la resistencia que se mide (de 1 mA en la medición), mientras que otro par mide la caída de tensión en ella, para calcular su valor con la Ley de Ohm. Con este método, el puente mide también el valor de un resistor patrón (R_S), para desplegar el valor del cociente R_{AMB}/R_S. Para la medición se utilizó un resistor de 1 Ω.

La medición de t_{BASE}, la temperatura de la base de la lámpara, se hizo con un sensor miniatura de resistencia de platino, insertado en un orificio de la base que cada una de las lámparas posee para este propósito. Los resultados de las mediciones se reportan en la tabla 1.

Lámpara	R_{AMB}	t_{BASE}
C860	40,049 m Ω	23,32 °C
C864	41,995 m Ω	24,18 °C

Tabla 1. *Valores de R_{AMB} antes de la calibración de las lámparas.*

Orientación inicial de las lámparas para la calibración

Las conexiones eléctricas se realizaron de la manera como se indica en la figura 1, en la cual no se muestra el termómetro miniatura que midió la temperatura de la base durante todo el tiempo que duró la calibración, ni otro termómetro que se insertó en el termopozo del resistor shunt, para medir su temperatura.

Para las mediciones, el pirómetro IKE-LP2 se colocó a 63 cm de la lámpara que se calibraba, distancia medida entre el lente objetivo del pirómetro y la posición estimada del filamento y que definió un área de estudio de unos 1,8 mm^2.

La calibración se asegura localizando una región marcada en el filamento, donde siempre se mide su temperatura de radiancia. La marca consiste en un corte a manera de media luna, hecha por el fabricante de la lámpara en uno de los bordes del filamento, a la mitad de su longitud.

Suministro de corriente al filamento

Se utilizó una fuente controlada HP 6674A, operando en el modo de "corriente constante", para suministrar corriente continua a las lámparas.

Entre la lámpara y la fuente se conectó en serie un resistor shunt de 0,01 Ω, marca YEW modelo 2792, para medir con un multímetro digital HP-3458A la tensión que caía en sus terminales y de ese valor calcular el valor de la corriente en el filamento, usando la ley de Ohm.

Ajuste fino de la posición de cada lámpara

La alineación vertical de cada lámpara se hizo proyectando con una lente sobre una pantalla, una imagen amplificada de su filamento y ajustándola contra la dirección del cordel de una plomada. Luego se hicieron giros de la base de la lámpara que se calibraba, para localizar una región donde la radiancia se mostraba más o menos constante, que indicó que se estaba trabajando en una dirección donde los reflejos internos tienen efectos menores en la temperatura de radiancia que se mide.

Enfoque fotoeléctrico

Con una corriente en el filamento para una temperatura de radiancia de 1100°C, se hizo un enfoque visual de manera preliminar, para luego hacer un barrido horizontal a lo ancho del filamento y determinar una zona donde la radiancia tuvo un máximo. Así se localizaron dos posiciones laterales que produjeron el 5% del valor de radiancia máxima. Esto se repitió para diferentes posiciones de la perilla de enfoque del pirómetro, que se midieron como un ángulo con respecto a la posición del enfoque visual. Luego, ajustando un polinomio de segundo grado a las diferencias de las dos posiciones medidas, en función del ángulo de la perilla de enfoque, se determinó el valor del ángulo donde la diferencia de las dos posiciones laterales fue mínima que se consideró como el enfoque fotoeléctrico buscado para la calibración de cada una de las lámparas.

Reproducibilidad de la temperatura de radiancia de 1100 °C

Para confirmar la estabilidad de las lámparas, el protocolo solicitó verificar la reproducibilidad de la temperatura de radiancia de 1100 °C a la longitud de onda del pirómetro utilizado, antes y después de llevar al filamento a una temperatura de radiancia de 1700 °C y mantenerla así durante una hora. Para ello, a las lámparas se suministraron valores de corriente tan cercanos como fueron posibles a los indicados en la tabla 2. Los valores de temperatura de radiancia obtenidos a los valores de corriente disponibles de la fuente se corrigieron al valor de solicitado en el protocolo, de acuerdo a la ecuación siguiente:

$$t(I_{protocolo}) = t_{medida} + (I_{protocolo} - I_{lámpara})(d\,t/d\,I) \qquad (1)$$

Temperatura de radiancia aproximada	Lámpara	
	C860	C864
1100 °C	6,284 A	6,120 A
1700 °C	13,446 A	13,074 A
$d\,t/d\,I$	103,86 °C/A	106,43 °C/A

Tabla 2. *Valores de corriente para verificar la reproducibilidad de las temperaturas de radiancia a 1100 °C*

El coeficiente de sensibilidad $d\,t/d\,I$ se obtuvo derivando un polinomio que se ajustó a la función que relaciona la temperatura de radiancia medida con la corriente suministrada al filamento.

La reproducibilidad obtenida en ambas lámparas se muestra en la tabla 3. El protocolo solicitó reportar cambios mayores a 0,25 °C, que no sucedieron.

Lámpara	C860	C864
Antes	1099,67 °C	1099,74 °C
Después	1099,60 °C	1099,66 °C
Diferencia	-0,07 °C	-0,08 °C

Tabla 3*. Resultados de la reproducibilidad en las lámparas*

Mediciones

Se calcularon temperaturas de radiancia para valores de corriente tan cercanos como fue posible, a los valores dados en el protocolo e indicados en la tabla 4. La temperatura de radiancia se calcula a partir de un cociente de fotocorrientes del pirómetro, de acuerdo con la ecuación que se da a continuación, obtenida de la ley de radiación de Planck:

$$\frac{I(T_{med})}{I(T_{ref})} = \frac{\exp\left[c_2/(l_{ef}T_{ref})\right]-1}{\exp\left[c_2/(l_{ef}T_{med})\right]-1} \qquad (2)$$

Donde:

c_2 es la segunda constante de radiación, cuyo valor ha sido asignado en el texto de la EIT-90 igual a 1,4388 x 10^{-2} m·K;

l_{ef} la longitud de onda efectiva del pirómetro utilizado, igual a 6,5182 x 10^{-7} m;

T_{REF} la temperatura del punto de solidificación de la plata del cuerpo negro, igual a 1234,93 K, en la calibración del pirómetro;

T_{MED} la temperatura que se mide, de acuerdo con la EIT-90, en kelvin;

$I(T_{REF})$ la fotocorriente obtenida con el pirómetro durante su calibración a la temperatura de referencia del punto de la plata (1234,93 K) y a la longitud de onda del pirómetro (6,5182 x 10^{-7} m);

$I(T_{MED})$ la fotocorriente obtenida con el pirómetro durante la medición de la temperatura que se desea determinar.

Se hicieron mediciones en dos series para cada lámpara, ambas en un sentido creciente de la corriente, dando periodos de estabilización de 20 a 30 minutos para las temperaturas comprendidas en el intervalo de 900 °C a 1100 °C y de 15 a 20 minutos para las temperaturas mayores a 1100 °C.

Temperatura de radiancia aproximada a 650 nm / °C	Lámpara	
	C860 / A	C864 / A
962	5,072	4,933
1000	5,380	5,236
1064	5,944	5,788
1085	6,141	5,980
1100	6,284	6,120
1200	7,298	7,107
1300	8,398	8,177
1400	9,570	9,314
1500	10,805	10,513
1600	12,099	11,767
1700	13,446	13,074

Tabla 4. *Valores de corriente a ser suministrados a las lámparas para su calibración.*

Correcciones a las temperaturas medidas

Los valores de temperatura de radiancia obtenidos con cada lámpara, se corrigieron para las condiciones de referencia de una temperatura de 20 °C en la base y una longitud de onda de 650 nm, ambos indicados en el protocolo.

La corrección de la temperatura medida t_{medida} al valor de referencia de la temperatura de la base, se hizo con la ecuación siguiente:

$$t_{20\,°C} = t_{medida} + (20\,°C - t_{base})(d\,t/d\,t_{base}) \qquad (3)$$

A su vez, la temperatura corregida $t_{20\,°C}$ se corrigió al valor de referencia de longitud de onda, utilizando la ecuación siguiente:

$$t_{650\,nm} = t_{20\,°C} + (650\,nm - l_{LP2})(d\,t/d\,t_l) \qquad (4)$$

Los coeficientes de sensibilidad $d\,t/d\,t_{base}$ y $d\,t/d\,t_l$ se calcularon con polinomios dados en el protocolo. El último basado en un trabajo de Latyev *et al* [3].

RESULTADOS

De las dos series de mediciones en cada lámpara, se calculó el valor promedio de las temperaturas de radiancia obtenidas. A estos resultados se ajustaron sendos polinomios para interpolar los valores de las temperaturas de radiancia a los valores de la corriente suministrada al filamento y así calcular las temperaturas de radiancia a los valores de corriente indicados en la tabla 4.

La tabla 5 muestra los resultados de la interpolación, reportados al grupo coordinador de la comparación, para ambas lámparas. También se muestran los resultados preliminares reportados por ese grupo, calculando un valor de factor de equivalencia "*QDE*" por sus siglas en inglés, calculados de la manera propuesta por Wood *et al* [4].

Estimación de incertidumbres

En la estimación de las incertidumbres reportadas en la tabla 5, los componentes de mayor contribución fueron:

Tipo "A": de las lecturas de fotocorriente obtenidas con el pirómetro; de la fotocorriente de desplazamiento del pirómetro; de la tensión en el resistor shunt y de la temperatura de la base de las lámparas.

Tipo "B": de la temperatura de referencia; de la determinación de la longitud de onda efectiva del pirómetro; del efecto del tamaño de la fuente; de la linealidad del pirómetro; de la deriva de la fotocorriente de referencia; de la posición de la lámpara; de la calibración del resistor shunt; de la resolución de los instrumentos utilizados y del ajuste del polinomio de interpolación.

Temperatura de radiancia aproximada a 650 nm	Temperatura de radiancia obtenida con los valores de corriente de la tabla 4, en °C		Incertidumbre (k=2)	Desviación contra la referencia	Factor de equivalencia
°C	C860	C864	° C	°C	°C
962	962,26	962,30	± 0,42	+ 0,12	0,54
1000	1000,29	1000,28	± 0,44	+ 0,07	0,51
1064	1064,44	1064,35	± 0,49	+ 0,10	0,58
1085	1085,52	1085,40	± 0,51	+ 0,12	0,61
1100	1100,50	1100,44	± 0,52	+ 0,09	0,61
1200	1200,56	1200,49	± 0,62	+ 0,10	0,72
1300	1300,67	1300,59	± 0,74	+ 0,04	0,85
1400	1400,72	1400,62	± 0,87	+ 0,14	0,99
1500	1500,87	1500,71	± 1,0	+ 0,14	1,14
1600	1600,88	1600,72	± 1,2	+ 0,15	1,36
1700	1700,73	1700,65	± 1,3	+ 0,11	1,49

Tabla 5. *Temperaturas de radiancia reportadas para las lámparas*
.

CONCLUSIONES

Se han descrito las mediciones realizadas en el CENAM para la calibración de dos lámparas viajeras de filamento de cinta, que le permitieron participar en la comparación clave K5 del CCT. Se presentan los valores de los resultados que se reportaron a los coordinadores de la comparación.

Los resultados preliminares sitúan a las mediciones del CENAM dentro de la banda más angosta (± 0,2 °C) de desviación con respecto a la referencia, junto con los resultados de otros cinco laboratorios.

Sin embargo, el nivel de las incertidumbres reportadas llevó al factor de equivalencia a valores muy altos. Esto pone de manifiesto la necesidad de mejorar la exactitud de las mediciones del Laboratorio de Termometría de Radiación del CENAM.

Los resultados preliminares presentados en este documento se conservaban así al momento de terminar la redacción de este documento. Los resultados finales serán publicados por el CCT del BIPM.

RECONOCIMIENTOS

El autor desea reconocer el trabajo del Ing. Pablo Vera Alfaro que, con dedicación y elevada responsabilidad, realizó gran parte de las mediciones y cálculos aquí reportados.

REFERENCIAS

[1] Preston-Thomas, H.; The International Temperature Scale of 1990 (ITS-90); Metrologia 27, 3-10, 1990.

[2] Machin, G., Rodriguez, H., Valencia, J.; The Comparison of the Primary Standard Silver Point Blackbody Cavities of NPL and CENAM; Memorias del 7º Simposio Internacional sobre Temperatura y Mediciones Térmicas, Tempmeko 99, Editores De Groot, Dubbeldam; Nmi-VSL.

[3] Latyev, L. N.; Chekovski, V. Ya.; Shestakov, E. N.; Tungsten as a Standard Material for Monochromatic Emissivity; High Temp – High Pressures 14, 679-686; 1982.

[4] Wood, B. M., Douglas, R. J.; Confidence-interval interpretation of a measurement pair for quantifying a comparison; Metrologia 35, 187-11196, 1998.