

## Método para Medir la Desviación de la Linealidad de un Pirómetro Monocromático

Hugo Rodríguez Arteaga, Saúl J. Luyo Alvarado, Edgar Méndez Lango

Centro Nacional de Metrología  
km 4,5 Carretera a Los Cués, 76246, Querétaro, México.  
hrodrigu@cenam.mx

### RESUMEN

Se describe un método para medir la desviación de la linealidad de un pirómetro monocromático, en el alcance de temperatura de 500 °C a 900 °C. El método consiste en la medición directa de la radiancia de una fuente y de su reducción mediante la colocación de un disco óptico (*chopper*) entre la fuente y el pirómetro. Se presentan resultados experimentales, para las dos longitudes de onda de trabajo del pirómetro y se discuten las ventajas y desventajas de esta técnica.

### 1. INTRODUCCIÓN

En el Centro Nacional de Metrología (CENAM) el patrón de termometría de radiación usa un pirómetro tipo LP2, el cual es un instrumento para realizar la Escala Internacional de Temperatura de 1990 para temperaturas mayores que el punto de solidificación de la plata (961,78 °C), por extrapolación a partir de un punto de calibración. En consecuencia, la evaluación de su linealidad es importante para estimar el error y la incertidumbre de medición. La desviación de la linealidad del sistema se puede caracterizar con el método de adición de flujos luminosos.

El sistema de medición está constituido por un detector semiconductor de silicio, un amplificador [1] y medidores de tensión eléctrica.

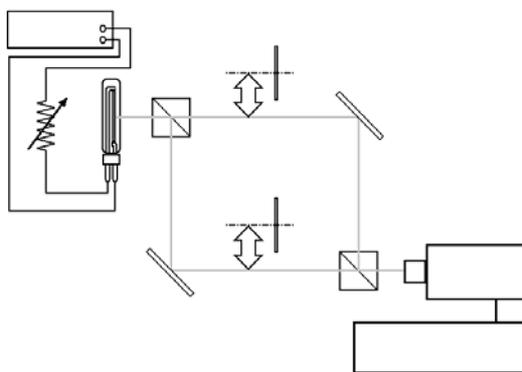


Fig. 1 Método de flujos aditivos para determinar la desviación de la linealidad de un pirómetro.

En la Fig. 1, se presenta un bosquejo del experimento de adición de flujos luminosos. La fuente de poder (1) proporciona corriente continua a

una lámpara de filamento de cinta (2). Un potenciómetro ajusta la corriente a diferentes valores. Un flujo de radiación se dirige al pirómetro (9) a través de dos cubos divisores de haz (3 y 4) y de dos espejos de oro de primera superficie (5 y 6). Dos pantallas opacas (7 y 8) se deslizan para obstruir al flujo, en una u otra trayectoria, o permitir que llegue al pirómetro a través de ambas trayectorias. (10) es un medidor de tensión eléctrica de c. c.

En el pirómetro se produce una señal, que se denominará  $I_A$  cuando se obstruye el flujo de una trayectoria. Análogamente la señal  $I_B$  se produce cuando se obstruye la otra trayectoria. Si ambas trayectorias inciden en el pirómetro se produce una señal que se denominará  $I_{A+B}$ .

La desviación de la linealidad del pirómetro se determina con los valores obtenidos de las señales, mediante la Ec. (1) [1]:

$$NL = \frac{I_{A+B} - (I_A + I_B)}{I_{A+B}} \times 100 \quad (1)$$

Por lo general, la lámpara utilizada en este método, produce radiancias visibles a temperaturas mayores que 800 °C. A temperaturas menores, la emisión de la lámpara en el espectro visible es mucho menor y es reducida aún más por las reflexiones en los cubos divisores, por lo cual es necesario hallar un método para la caracterización de la desviación de la linealidad en intervalos de temperaturas más bajos.

El método que proponemos en este trabajo utiliza un disco cortador (*chopper*) para reducir el flujo radiado y una cavidad radiante como fuente.

Para las mediciones no se requiere que la fuente radiante sea un cuerpo negro. De hecho, la lámpara utilizada en el método de flujos aditivos no lo es. Lo que sí necesario es que la fuente tenga una temperatura estable para que las mediciones que se realizan con y sin el disco, no estén afectadas por un cambio de radiancia en la fuente. La estabilidad del horno utilizado está dentro de  $\pm 0,1$  °C en periodos de 30 min.

Para este método se requiere que en el disco el número de ventanas abiertas sea igual al de ventanas cerradas y que sus áreas sean iguales. De esta manera  $I$  es la señal que se produce en el pirómetro cuando la radiancia no es obstruida con el disco.

Si la relación de ventanas abiertas a ventanas cerradas es 1, entonces la señal que llega al pirómetro cuando el disco reduce la radiancia de la fuente, es  $0,5 I$  y el pirómetro entrega una señal de valor  $I_A$

La desviación del valor de la señal  $I_A$  del 50 % de  $I$  permite calcular el valor de la desviación de la linealidad con la Ec. (2):

$$NL = \frac{I - 2 \cdot I_A}{I} \times 100 . \quad (2)$$

## 2. EXPERIMENTAL

La Fig. 2 muestra un esquema del montaje experimental para el método propuesto. En ella, (1) es una cavidad radiante que opera en el intervalo de 400 °C a 1 000 °C, las dimensiones de su cavidad son: 52 mm de diámetro y 460 mm de profundidad. (2) Es un disco comercial de aluminio anodizado con color negro mate de 10,2 cm de diámetro externo con 6 ventanas abiertas de 3,14 cm<sup>2</sup> de área cada una, alternadas con 6 ventanas cerradas de igual tamaño. Los centros de las ventanas se ubican sobre un radio de 4,1 cm del disco. (3) Es el pirómetro bajo estudio, el cual opera con un detector de silicio y filtros para las longitudes de onda de 652 nm y 912 nm. El alcance de medición indicado en sus especificaciones va desde 680 °C, cuando opera a 652 nm y hasta 3525 °C con un filtro de densidad neutra ND2 [3].

Con el pirómetro se midió la radiancia de la fuente a 62 cm de su abertura. El disco se colocó a 50 cm del pirómetro.

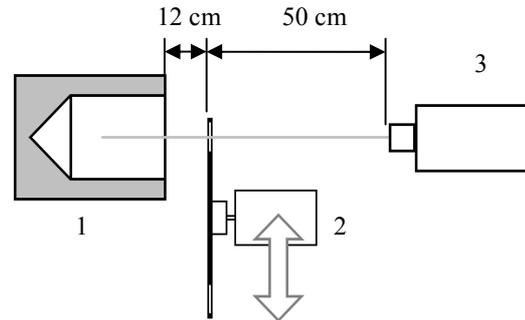


Fig. 2 Método propuesto para determinar la desviación de la linealidad de un pirómetro.

Para medir  $I$ , el disco se quitaba de la trayectoria óptica. Luego se ponía para medir  $I_A$  a través de sus ventanas.

El área de cada una de las ventanas del disco es mucho mayor que el campo visual del sistema óptico del pirómetro, aproximadamente igual a 0,2 mm<sup>2</sup> a 50 cm de distancia. Asimismo, para las temperaturas de radiancia medidas en este estudio, a 652 nm y 912 nm, se puede despreciar la radiancia emitida por el disco a 22 °C, porque es del orden de  $10^{-14}$  veces menor que la emitida por la cavidad radiante a 500 °C.

## 3. RESULTADOS

### 3.1. Desviación de la Linealidad del Pirómetro, Medida con el Método de Flujos Aditivos

Con un arreglo de instrumentos como el que se muestra en la Fig. 1 y a las temperaturas de radiancia del filamento de una lámpara patrón que se indican en la tabla 1, se obtuvieron los resultados que se muestran en esa tabla para la longitud de onda de 652 nm del pirómetro. Se usó un voltmetro de C. C. en el alcance de medición de 3 V con resolución máxima de 100 nV, que despliega lecturas en una pantalla de 6 ½ dígitos

Las fotocorrientes generadas en el detector del pirómetro son amplificadas y convertidas a señales de tensión eléctrica de c. c. en la unidad de lectura del instrumento. En las terminales de salida de esta unidad se conectó un voltmetro de c. c.

En la Tabla 1, se muestra la incertidumbre tipo A de la dispersión de las lecturas y el valor correspondiente de esta incertidumbre en unidades de temperatura, ambas a un nivel de  $1\sigma$ . La Tabla 2 muestra resultados correspondientes a la longitud de onda de 912 nm.

### 3.2 Desviación de la Linealidad del Pirómetro, Medida con el Método Propuesto

#### 3.2.1. Efecto de la Frecuencia de los Pulsos de Radiancia Generados por el Disco

La gráfica de la Fig. 3 muestra los valores de los cocientes de las señales generadas en el detector del pirómetro en función de la frecuencia de bloqueo de la radiancia de la fuente radiante, debida a la velocidad de rotación del disco. Cada uno de los valores ahí mostrados se obtuvo al dividir la señal que se produce cuando se coloca el disco entre el pirómetro y la fuente, y la señal que se obtiene sin él, como indica la Ec. (3):

$$Q = \frac{I_{con\ disco}(\lambda, T)}{I_{sin\ disco}(\lambda, T)} \quad (3)$$

Tabla 1. Resultados o obtenidos con el método de flujos aditivos, para  $\lambda = 652$  nm.

$t / ^\circ C$	$I_{A+B} / A$	$NL / \%$	Inc. A / %	$u(t) / ^\circ C$
783,0	6,63E-13	0,013	$\pm 0,057$	$\pm 0,13$
828,1	1,56E-12	-0,002	$\pm 0,028$	$\pm 0,05$
906,1	5,88E-12	0,012	$\pm 0,005$	$< \pm 0,01$
971,9	1,58E-11	-0,005	$\pm 0,003$	$< \pm 0,01$

Tabla 2. Resultados obtenidos con el método de flujos aditivos, para  $\lambda = 912$  nm.

$t / ^\circ C$	$I_{A+B} / A$	$NL / \%$	Inc. A / %	$u(t) / ^\circ C$
558,3	3,18E-12	-0,002	$\pm 0,018$	$\pm 0,07$
687,9	4,11E-11	0,008	$\pm 0,010$	$\pm 0,05$
737,7	9,23E-11	0,010	$\pm 0,004$	$\pm 0,01$
778,5	1,69E-10	0,008	$\pm 0,004$	$\pm 0,01$
850,5	4,42E-10	-0,003	$\pm 0,003$	$< \pm 0,01$

Para los resultados mostrados, la fuente se mantuvo a una temperatura de 650 °C, la cual, sin la reducción por el disco, produjo una señal de tensión que corresponde a  $21,95 \times 10^{-12}$  A, para la longitud de onda de 912 nm.

Para las mediciones, se utilizó la función de tensión en C. C. de un multímetro digital que despliega lecturas en una pantalla de 8 ½ dígitos, en el alcance de 10 V con resolución máxima de 100 nV.

Como se observa en la Fig. 3, a frecuencias menores que 12 Hz, la señal producida por la radiancia reducida, depende de la frecuencia del disco y la dispersión de las lecturas es mayor

mientras menor es la frecuencia. Los guiones que acompañan a los marcadores en la gráfica, indican la incertidumbre debida a la dispersión de las lecturas.

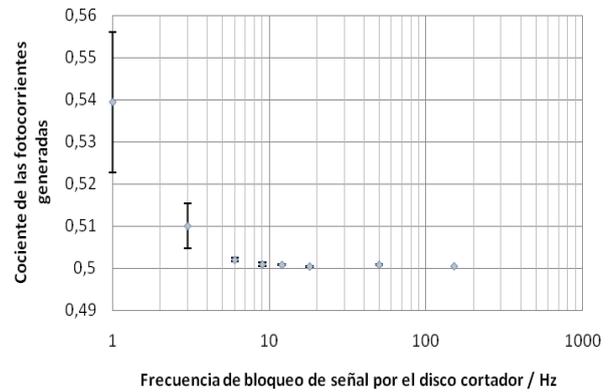


Fig. 3. Cocientes de las amplitudes de las señales producidas por el pirómetro, con disco y sin él, en función de la frecuencia de los pulsos.

A frecuencias mayores que 12 Hz los cocientes de señal tienden a un valor constante y la dispersión de las lecturas se reduce significativamente. Para las mediciones que se reportan en este trabajo, se usó una frecuencia de bloqueo de 100 Hz.

#### 3.2.2. Desviación de la Linealidad del Pirómetro, Medida con Disco

Con el arreglo de instrumentos que se muestra en la Fig. 2, se obtuvieron los resultados que se presentan en la Tabla 3, para la longitud de onda de 652 nm del pirómetro y las incertidumbres de la dispersión de las lecturas. La Tabla 4 muestra los resultados obtenidos para la longitud de onda de 912 nm.

Para estas mediciones, se utilizó la función de tensión en C. C. de un multímetro digital que despliega lecturas en una pantalla de 8 ½ dígitos, calibrado, en el alcance de 10 V, con resolución máxima de 100 nV.

Tabla 3. Resultados obtenidos con el método propuesto, para  $\lambda = 652$  nm.

$t / ^\circ C$	$I_{A+B} / A$	$NL / \%$	Inc. A / %	$u(t) / ^\circ C$
752,0	3,52E-13	-0,147	$\pm 0,090$	$\pm 0,23$
802,6	9,70E-13	0,001	$\pm 0,068$	$\pm 0,14$
853,0	2,43E-12	0,005	$\pm 0,021$	$\pm 0,18$
903,4	5,63E-12	-0,018	$\pm 0,018$	$\pm 0,03$

Tabla 4. Resultados obtenidos con el método propuesto, para  $\lambda = 912$  nm.

$t / ^\circ\text{C}$	$I_{A+B} / A$	$NL / \%$	Inc. A / %	$u(t) / ^\circ\text{C}$
500,5	7,71E-13	-0,059	$\pm 0,067$	$\pm 0,28$
550,7	2,67E-12	-0,134	$\pm 0,036$	$\pm 0,14$
601,5	8,12E-12	-0,021	$\pm 0,018$	$\pm 0,07$
651,9	2,17E-11	-0,064	$\pm 0,025$	$\pm 0,08$
702,2	5,23E-11	-0,088	$\pm 0,031$	$\pm 0,09$
752,2	1,15E-10	-0,055	$\pm 0,016$	$\pm 0,04$
802,1	2,35E-10	-0,061	$\pm 0,030$	$\pm 0,06$
852,5	4,53E-10	-0,029	$\pm 0,013$	$\pm 0,02$
903,2	8,29E-10	-0,044	$\pm 0,010$	$\pm 0,01$

**4. DISCUSIÓN**

La Fig. 4 muestra los valores presentados en las Tablas 1 y 3, para la longitud de onda de 652 nm, donde los resultados obtenidos en el CENAM con flujos aditivos y con disco son coincidentes. Ahí también se muestran los reportados por el fabricante en el manual de operación del pirómetro [3]. Las bandas de incertidumbre de los resultados del CENAM corresponden únicamente a la de la dispersión de las lecturas (tipo A). El fabricante no proporciona información de la incertidumbre de sus mediciones.

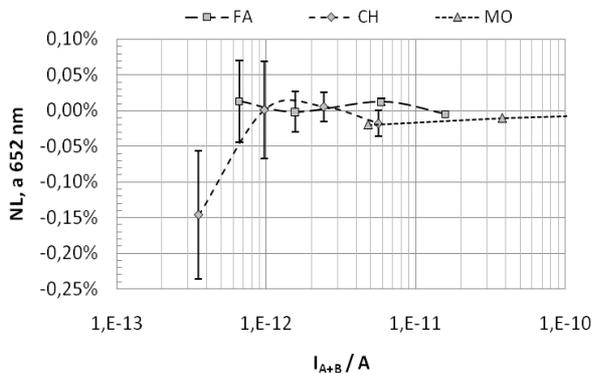


Fig. 4. Desviación de la linealidad de la señal del pirómetro LP2, obtenida a 652 nm. "FA" indica los resultados del método de flujos aditivos, "CH" los resultados del método con disco y "MO" los reportados en el manual de operación.

La Fig. 5 muestra los valores presentados en las Tablas 2 y 4, correspondientes a la longitud de onda de 912 nm. En estos se observan discrepancias entre los resultados obtenidos con uno y otro método, cuya causa aún no se tiene identificada.

También se muestran los valores reportados por el fabricante.

Tales discrepancias, expresadas en unidades de temperatura están dentro de 0,05 °C y 0,01 °C, las cuales, si se usan como correcciones, contribuyen con una incertidumbre de  $\pm 0,023$  °C a los resultados obtenidos con el método propuesto.

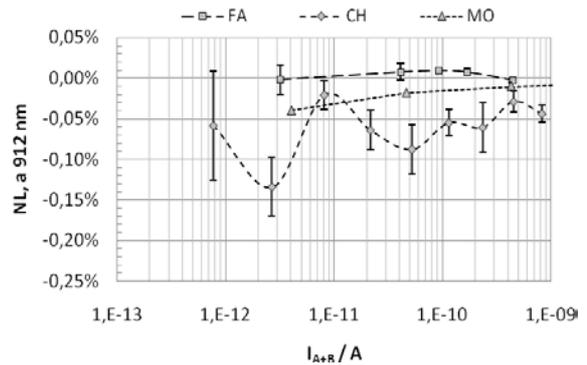


Fig. 5. Desviación de la linealidad de la señal del pirómetro LP2 obtenida a 912 nm. "FA", "CH" y "MO" tienen el mismo significado que en la Fig. 4.

Los resultados en las Tablas del 1 al 4 muestran que la incertidumbre es menor en el método de flujos aditivos que en el método del disco.

La Fig. 6 muestra los valores de la incertidumbre de la desviación de la linealidad con los correspondientes en unidades de temperatura, calculados para una incertidumbre  $u(NL) = 0,001$  %.

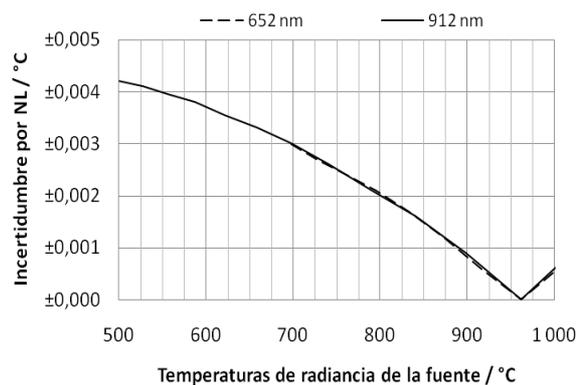


Fig. 6 Incertidumbre debida a la desviación de la linealidad para  $u(NL) = \pm 0,001$  %.

Los valores de  $u(NL)$  son directamente proporcionales a la incertidumbre  $u(t)$  que les

corresponde. Así, para conocer la incertidumbre para  $u(NL) = \pm 0,01 \%$ , basta multiplicar por 10 el valor de  $u(t)$  del eje de ordenadas.

## 5. CONCLUSIONES

El método del disco puede ser útil para caracterizar la desviación de la linealidad de un pirómetro en el intervalo de 500 °C y a 900 °C para mediciones a 912 nm, con incertidumbres tipo A de  $\pm 0,28$  °C a  $\pm 0,01$  °C y de 750 °C a 900 °C con incertidumbres tipo A de  $\pm 0,23$  °C a  $\pm 0,02$  °C para mediciones a 652 nm.

El método propuesto puede ser una alternativa viable si se dispone de una fuente radiante estable. El montaje es más sencillo que el requerido para el método de flujos aditivos y se puede usar en un programa de aseguramiento de mediciones en verificaciones intermedias.

## REFERENCIAS

- [1] B. Woerner, *A photoelectric direct current spectral pyrometer with linear characteristic, Temperature, its measurement and control in Science and Industry*, vol. 5, Part 1, (American Institute of Physics, N. Y. 1982), pp. 429-432.
- [2] A. Haapalinna y T. Weckström, *A small device for measuring the linearity of an optical pyrometer, The 7<sup>th</sup> International Symposium on Temperature and Thermal Measurements, Tempmeko 99*, editado por Jaco F. Dubbeldam y Martin J. de Groot, Vol 2, NMI Van Swinden Laboratorium, Delft Holanda, 1999, pp. 573-575.
- [3] *Forschungsinstitute für Kerntechnik und Energie-wandlung KE E. V.*, KE-Linearpyrometer LP2, Operating Instructions, Calibrating and Test Report, No. IKE 5TN-927-88, Nov. 1995.