

CALIBRACIÓN DE RESPONSABILIDAD ABSOLUTA DE DETECTORES FOTOMÉTRICOS PARA LA REALIZACIÓN DE LA CANDELA

J. C. Molina, J. C. Bermúdez

Centro Nacional de Metrología, km 4,5 Carretera a los Cués, El Marqués, Qro. México.

Resumen: La candela (cd), una de las unidades base del sistema internacional se encuentra materializada en el CENAM a través del patrón nacional de intensidad luminosa *CNM-PNF-4*, el cual esta formado por un conjunto de lámparas patrón y detectores de responsividad fotópica (detectores fotométricos) ambos con trazabilidad al Laboratorio Nacional de Alemania (PTB). Actualmente en el CENAM se está implementando una metodología con la finalidad de obtener la materialización de esta unidad (cd), empleando detectores fotométricos con trazabilidad al patrón nacional de flujo radiante *CNM-PNF-12* (Radiómetro Criogénico). En este trabajo se presentan los sistemas establecidos en CENAM para la calibración de la responsividad absoluta de detectores fotométricos con trazabilidad al radiómetro criogénico así como los resultados de la calibración.

1. INTRODUCCIÓN

La unidad de intensidad luminosa, la candela (cd) una de las siete unidades de base del sistema internacional (SI), se encuentra materializada en el Centro Nacional de Metrología (CENAM) a través del patrón nacional de Intensidad luminosa *CNM-PNF-4*, el cual esta formado por un conjunto de lámparas y detectores con responsividad fotópica (detectores fotométricos) siendo este método, hasta hace algunos años una práctica común, rápida y sencilla empleada por distintos laboratorios nacionales de metrología. La trazabilidad actual de las lámparas y detectores que forman el patrón nacional de intensidad luminosa se encuentra a través del laboratorio nacional de Alemania (PTB).

Actualmente los trabajos de distintos laboratorios nacionales de metrología se encuentran orientados a la materialización y mantenimiento de esta unidad base mediante la calibración de la responsividad absoluta de detectores de responsividad fotópica (detectores fotométricos), los cuales presentan ventajas como; bajo coeficiente de envejecimiento, son robustos lo cual permite una fácil transportación, cuentan con una buena estabilidad en corto tiempo, su alineación es relativamente sencilla en comparación con una lámpara. Está y otras características son las que han motivado la realización y mantenimiento de la unidad (cd) a través de este tipo de detectores.

En este trabajo se presenta la metodología seguida por el laboratorio de Espectrorradiometría de Detectores del CENAM para implementar la calibración de la responsividad absoluta de

detectores fotométricos con trazabilidad al patrón primario de flujo radiante *CNM-PNF-12* (Radiómetro Criogénico) así como los sistemas empleados en las mediciones y los resultados obtenidos.

2. DETECTOR FOTOMÉTRICO

Un detector fotométrico (o fotómetro) es un instrumento que mide magnitudes fotométricas (Iluminancia, Luminancia, Responsividad luminosa), es decir, que mide la luz de tal forma que su responsividad se aproxima lo más posible a la sensación visual reportada por el observador humano estándar expuesto a la misma radiación.

Generalmente un detector fotométrico patrón consta de un fotodiodo de silicio, un filtro $V(\lambda)$, una abertura de precisión y en algunos casos un difusor, figura 1.

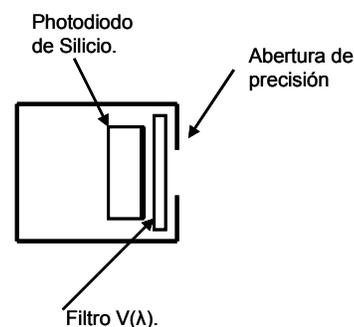


Figura 1: Componentes de un detector fotométrico.

2.1 Responsividad luminosa de detectores fotométricos

La responsividad luminosa de un detector fotométrico en unidades fotométricas (A/lux) (denominada también sensibilidad fotométrica) se determina a partir de la medición de su responsividad espectral relativa y su responsividad absoluta a una longitud de onda de referencia de 632,8 nm [6]. Ecuación 1.

$$S_{li} \left(\frac{A}{lx} \right) = \frac{A_{df} S_{df}(632,8)}{Km} \cdot \frac{\int_{\lambda} \Phi_e(\lambda) s_n(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda} \Phi_e(\lambda) V(\lambda) d\lambda}, \quad (1)$$

donde:

- S_{li} : Responsividad luminosa (A/lux).
- S_{df}(632,8): Responsividad absoluta del detector fotométrico a 632,8 nm.
- Φ_e(λ): Distribución espectral de la fuente(Iluminante tipo A).
- S_n(λ): Responsividad espectral relativa del detector fotométrico.
- V(λ): Eficiencia espectral luminosa para la visión fotópica [8].
- Km: Eficiencia espectral luminosa máxima (683 lm/W).
- A_{df} : Área del detector fotométrico.

Generalmente la distribución espectral del iluminante tipo A (Φ_e(λ)) y la responsividad espectral relativa del detector fotométrico S_n(λ) se encuentran normalizadas a 555 nm.

3. SISTEMA DE MEDICIÓN DE RESPONSABILIDAD ESPECTRAL

El sistema de medición de responsividad espectral de detectores del CENAM está constituido por un comparador de detectores, una termopila como patrón de responsividad plana y fotodiodos de silicio como patrones de referencia y de trabajo [1].

El comparador de detectores consta de una fuente de luz sintonizable (lámpara incandescente + monocromador doble) y sistemas auxiliares para la formación del haz, para el posicionamiento de los detectores y para la medición de las señales, figura 2.

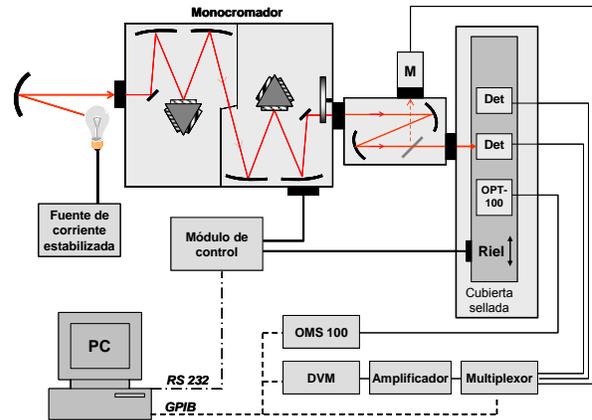


Figura 2: Sistema de medición de responsividad espectral de detectores en CENAM.

El elemento central del comparador de detectores es un monocromador doble aditivo de rejilla en configuración Czerny-Turner, el cual cuenta con tres pares de rejillas de difracción para cubrir un alcance espectral de 200 nm a 2200 nm con alcances intermedios de 200 – 600 / 250 – 1100 / 800 – 2200. Como fuente de luz se utiliza una lámpara incandescente de 450 W.

El sistema de formación del haz consta de un espejo confocal el cual forma una imagen del filamento de la lámpara en la rendija de entrada del monocromador y un sistema de espejos confocales que enfocan el haz de salida del monocromador en el plano del detector seleccionado para la medición.

El sistema de medición de señales mide la fotocorriente de salida de los fotodiodos en el modo de corto circuito, debido a las ventajas que tiene este modo para la radiometría [2], para ello utiliza un amplificador de trans-impedancia Grasby Optronics con ganancia entre 10³ V/A y 10⁶ V/A y un multímetro digital (HP3457A de 7 ½ dígitos). La selección del diodo a medir se realiza mediante un multiplexor automatizado (Agilent 34970 A).

3.1 Método de medición de responsividad espectral

La determinación tanto de la responsividad espectral como de la responsividad absoluta del detector fotométrico (DF) se realizan mediante el método de sustitución [5].

La medición de la responsividad espectral se lleva a cabo mediante la exposición simultánea el detector fotométrico (DF) y el detector patrón (DP) a la misma iluminación homogénea monocromática de

longitud de onda λ para ello se coloca una esfera de integración con dos puertos a la salida del monocromador con la cual se ilumina el área activa de ambos detectores [3], figura 3.

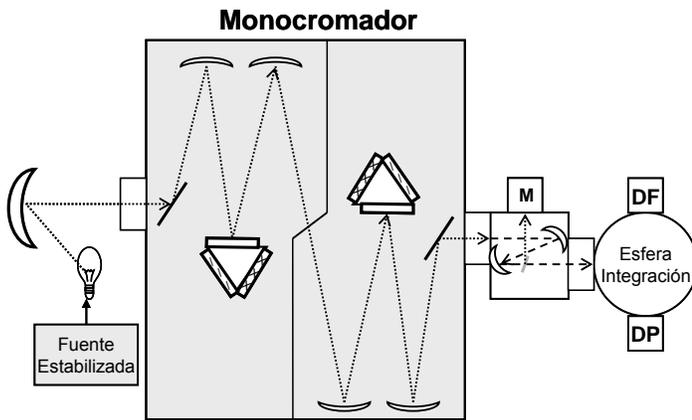


Figura 3: Medición de responsividad espectral del detector fotométrico con iluminación homogénea mediante el empleo de esfera de integración a la salida del monocromador.

Mediante un detector auxiliar y el uso de un divisor de haz se monitorea la potencia óptica del haz durante el proceso de comparación, lo cual permite corregir errores por derivas en la potencia óptica [9].

La responsividad espectral $S_{df}(\lambda)$ del detector fotométrico se obtiene mediante:

$$S_{df}(\lambda) = \frac{I_{df}(\lambda)}{I_{dp}(\lambda)} \cdot \frac{M_{dp}(\lambda)}{M_{df}(\lambda)} \cdot S_{dp}(\lambda), \quad (2)$$

donde $I_{df}(\lambda)$ es la fotocorriente generada por el detector fotométrico, $I_{dp}(\lambda)$ es la fotocorriente del detector patrón, M_{dp} es la señal del detector de monitoreo al momento de medir la señal del patrón, M_{df} es la señal del detector de monitoreo al momento de medir la señal del detector fotométrico y $S_{dp}(\lambda)$ es la responsividad espectral del patrón.

La responsividad espectral relativa del detector fotométrico $S_n(\lambda)$ se define como la responsividad espectral del detector fotométrico $S_{df}(\lambda)$ a una longitud de onda de referencia $\lambda_0 = 555 \text{ nm}$ [5].

$$S_n(\lambda) = \frac{S_{df}(\lambda)}{S(\lambda_0)}. \quad (3)$$

Un parámetro importante en un detector fotométrico es el grado de igualdad entre su responsividad espectral relativa y la función de la eficiencia espectral luminosa para la visión fotópica $V(\lambda)$ [7-8]. Este parámetro (F) se cuantifica mediante:

$$F = \frac{\int \Phi_e(\lambda)V(\lambda)d\lambda}{\int \Phi_e(\lambda)s_n(\lambda)d\lambda}, \quad (4)$$

4. SISTEMA DE MEDICIÓN DE RESPONSVIDAD ABSOLUTA

La figura 4, muestra un esquema del sistema de medición de responsividad absoluta de detectores fotométricos implementado en CENAM. El sistema esta formado básicamente por un riel de 2 m; una esfera de integración de 15 cm de diámetro recubierta en su interior con spectralon con una reflectancia del 99,2 %; una fuente láser de HeNe de 632,8 nm con una potencia aproximada de 15 mW y dos baffles que limitan la luz extraviada, figura 4.

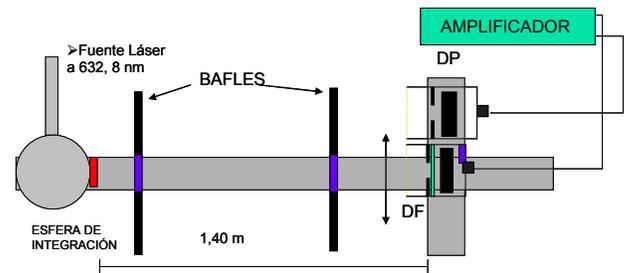


Figura 4. Sistema de medición de responsividad absoluta de detectores. La distancia máxima alcanzada entre el puerto de salida de la esfera de integración y el área de los detectores es de 1,40 m. La esfera produce una iluminación uniforme sobre el área de los detectores.

La distancia entre el puerto de salida de la esfera de integración y el plano de los detectores es de 1,40 m. A esta distancia la esfera produce una iluminación uniforme sobre el área de los detectores [4].

La determinación de la responsividad absoluta del detector fotométrico se basa en el método de sustitución [5], midiendo alternadamente la irradiancia de la esfera de integración sobre el detector patrón (el cual es trazable al radiómetro criogénico mediante la calibración previa realizada contra el detector de trampa "A", Certificado CNM-CPI-520-001/2002) y sobre el detector fotométrico.

La responsividad absoluta del detector fotométrico se determina para una longitud de onda λ de 632,8 nm mediante la ecuación (6).

$$S_{df} = \frac{I_{df} \cdot A_{dp} \cdot S_{dp}}{A_{df} \cdot I_{df}} \quad (5)$$

donde

- S_{df} : Responsividad absoluta del detector fotométrico a 632,8 nm.
- I_{df} : Fotocorriente del detector fotométrico.
- A_{dp} : Área del detector patrón.
- S_{dp} : Responsividad absoluta del detector patrón.
- A_{df} : Área del detector fotométrico.
- I_{dp} : Fotocorriente del patrón.

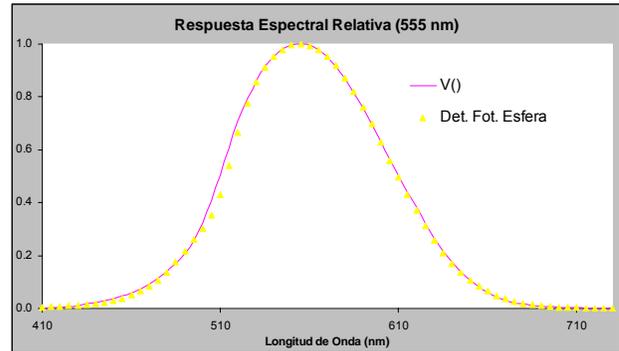
Una vez determinadas la responsividad espectral relativa y la responsividad absoluta del detector fotométrico se obtiene su responsividad luminosa. Sustituyendo la ecuación (5) en (1) tenemos que la responsividad luminosa del detector (A/lux) es:

$$S_{li} \left(\frac{A}{lx} \right) = \frac{I_{df} \cdot A_{dp} \cdot S_{dp}}{Km \cdot I_{df}} \cdot \frac{\int_{\lambda} \Phi_e(\lambda) s_n(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda} \Phi_e(\lambda) V(\lambda) d\lambda} \quad (6)$$

5. RESULTADOS

Para la realización de la candela en el laboratorio de fotometría del CENAM se emplea un detector fotométrico de la marca LMT estabilizado térmicamente a 35 °C. La medición obtenida de la responsividad espectral relativa de dicho detector, empleando el sistema de medición reportado en este artículo, se muestra en la grafica 1.

En esta gráfica se puede observar una desviación de la responsividad espectral relativa medida del detector LMT contra la responsividad espectral teórica $V(\lambda)$ esperada. Esta desviación es mayor en el intervalo de 500 nm a 525 nm. El valor de F, el cual indica el grado de igualdad entre las curvas, determinado para este detector es de 1,011.



Grafica 1. En la grafica se observa una desigualdad entre las curvas de la responsividad espectral relativa del detector fotométrico y la función $V(\lambda)$.

Esta desigualdad es común encontrarla en los detectores fotométricos y es debida principalmente a la calidad propia del detector fotométrico.

Sin embargo, existen otros factores que influyen en esta desviación que provienen del sistema de medición, principalmente del sistema de iluminación, como son la homogeneidad de la iluminación sobre los detectores, la potencia de la señal óptica y ancho de banda.

El valor del parámetro f_1' (que califica la calidad del detector) estimado es de $f_1' = 2,6 \%$ esto lo clasifica como un detector de alta calidad [3].

Para reducir el valor de F y aproximar las curvas, es necesario mejorar la homogeneidad del haz de salida del monocromador e incrementar su potencia.

La responsividad absoluta obtenida para el detector fotométrico es de 22,9 nA/lux con una incertidumbre de 0,9% con $k=2$. En la tabla 1 se presenta el presupuesto de incertidumbres en la calibración de detectores fotométricos.

Tabla 1. Presupuesto de incertidumbre en la calibración de detectores fotométricos.

| Fuente de incertidumbre | Incertidumbre tipo A % | Incertidumbre tipo B % |
|--|------------------------|------------------------|
| Patrón de responsividad absoluta (632,8 nm). | | 0,1 |
| Área del Patrón. | | ,07 |
| Repetibilidad de la medición. | 0,12 | |
| Responsividad Espectral Relativa (555 nm). | 0,4 | |
| Resolución del instrumento de medición. | | 0,0007 |
| Incertidumbre combinada k=1. | 0,45 | |
| Incertidumbre expandida k=2. | 0,90 | |

La responsividad espectral relativa a 555 nm incluye la contribución de las siguientes fuentes: repetibilidad, ancho de banda, error en longitud de onda (nm) entre otras.

6. CONCLUSIONES

En el laboratorio de espectrorradiometría de detectores del CENAM se está implementando una metodología para la calibración de la responsividad absoluta de detectores fotométricos para el establecimiento de la candela con trazabilidad al patrón primario de flujo radiante (Radiómetro Criogénico). Actualmente se han implementado ya los sistemas de medición de responsividad espectral relativa y responsividad absoluta con trazabilidad al radiómetro criogénico y se han obtenido los primeros resultados de la calibración de detectores fotométricos empleados de la realización de la candela.

Estos resultados preliminares son bastante aceptables, sin embargo es necesario mejorar el sistema de iluminación para reducir el valor de F.

Los trabajos a futuro para el laboratorio de Espectro Radiometría de Detectores se enfocan básicamente en mejorar la técnica de medición utilizada en la determinación de la responsividad absoluta de detectores fotométricos, en obtener una mayor homogeneidad y potencia del haz de salida del monocromador y una reducción del ancho de banda espectral, con lo cual se espera disminuir la

diferencia entre la curva medida y la $V(\lambda)$ y alcanzar una incertidumbre de medición $\leq 0,6\%$ $k=2$.

REFERENCIAS

- [1] W. A. Schmid, J.C. Molina Vázquez "La escala de la responsividad espectral de detectores ópticos realizada en el CENAM", SOMI XVII, Congreso de Instrum, Ing. Óptica (2003).
- [2] G. Eppedauer, *Optical radiation measurement with selected detectors and matched electronic circuits between 200 nm and 20 μ m*, NIST Technical Note 1438, 1-9, (2001)
- [3] J. C. Molina, J. C. Bermúdez, J. E. HernándezLópez. Relative Spectral Responsivity Determination Of Photometric Detectors. Fifth Symposium Optics in Industry, Proceedings of SPIE Vol. 6046, (2006).
- [4] J. Campos, A. Corróns, A. Pons and P. Corredera. Realization of the candela from a partial filtering $V(\lambda)$ detector traceable to a cryogenic radiometer, *Metrología*, 1995/96, 32. 675-679.
- [5] CIE 1984 CIE Publication No.64.
- [6] The NIST Detector-Based Luminous Intensity Scale, C.L Cromer, G.Eppeldauer, J.E. Hardis, T.C. Larson, Y. Ohno, and A. C. Parr, *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology*, Volume 101, Number 2, March-April 1996.
- [7] CIE 1987 CIE Publication No.69
- [8] CIE 1990 CIE Publication 86
- [9] Thomas C. Larason, Sally S. Bruce, and Albert C. Parr, "Spectroradiometric Detector Measurements", NIST Special Publication 250-41, February 1998.