

ANÁLISIS DE LAS FUENTES DE INFLUENCIA EN LAS MEDICIONES DE FLUJO LUMINOSO TOTAL

I. Oidor, R. Cardoso, J. G. Suárez
 División de Óptica y Radiometría, Centro Nacional de Metrología.
 Carretera a los Cués km 4.5, El Marqués Qro.
 Tel. (442) 2 11 05 00 Ext. 3316, Fax: (442) 2 11 05 53, email: ioidor@cenam.mx

Resumen. Se presentan las diferentes fuentes de influencia en la medición de flujo luminoso total mediante el uso de esferas de integración. El análisis está basado en el sistema existente del CENAM, en el cual se realizan mediciones principalmente con lámparas incandescentes. La metodología de medición considera las diversas correcciones que deben efectuarse, el análisis de incertidumbre, trazabilidad y recomendaciones generales para la realización de mediciones de alta calidad y confiabilidad. De esta forma, es factible adaptarlo a sistemas semejantes en calibraciones o ensayos para reducir los errores que comúnmente ocurren en este tipo de mediciones, considerando las limitaciones propias y aplicando correctamente esta metodología de medición.

1. INTRODUCCIÓN.

El flujo luminoso total es la energía luminosa proveniente de una fuente, integrada espacialmente y ponderada fotópicamente. Su aplicación se extiende de manera práctica, debido a que con el flujo luminoso total de una lámpara dividido por la cantidad de potencia eléctrica suministrada, se determina la eficiencia luminosa de la fuente (lm/W), esto permite realizar estimaciones de costo-beneficio en el empleo de estos productos. Además es uno de los parámetros a considerar en el diseño de nuevos productos. En el ámbito industrial, la esfera integradora es más utilizada para realizar mediciones de flujo luminoso total que el goniofotómetro, ya que es factible determinar esta magnitud de forma sencilla y confiable a través de mediciones relativas. Debido a su facilidad, el sistema de la esfera constituye en sí un método rápido y con resultados confiables, siempre y cuando se realicen las correcciones derivadas de las fuentes de influencia que están implícitas en la medición.

El método de medición utilizado en CENAM describe una técnica basada en la comparación del flujo luminoso total de una lámpara de referencia con una lámpara de prueba, empleando una esfera de integración luminosa. Esta técnica es susceptible a errores sistemáticos que se pueden cuantificar y corregir en el resultado final. El análisis de las fuentes de influencia permite adaptar estas prácticas en sistemas similares y realizar las correcciones pertinentes, originando mayor

confiabilidad en las mediciones tanto para la calibración de patrones como para el ensayo.

2. MEDICIONES DE FLUJO LUMINOSO

El principio básico de medición en una esfera de integración está basado en la integración espacial del flujo radiante generado dentro de la esfera y que puede ser percibido por un detector fotométrico. Cuando una lámpara se coloca en el centro de la esfera cuya superficie interna posee un recubrimiento con una alta reflectancia ρ , la energía luminosa que la lámpara emite se refleja un gran número de veces en su superficie interna y en consecuencia la iluminancia E_v generada en cualquier punto resulta ser proporcional al flujo luminoso Φ_v emitido por la lámpara [1]:

$$\Phi_v = \frac{4\pi r^2(1-\rho)E_v}{\rho} \quad (1)$$

Esta afirmación no es estrictamente válida cuando la superficie de la esfera no es perfectamente uniforme; sin embargo, debido a las múltiples reflexiones de la luz dentro de la esfera, la distribución de la luz reflejada sí será lo suficientemente uniforme para permitir la suposición asumida en la ecuación (1). Si se aplica esta teoría a las mediciones de flujo luminoso total de una lámpara, entonces se asume que el detector debe recibir solamente la luz reflejada por las paredes de la esfera; y por consecuencia se vuelve necesario bloquear la incidencia directa de la luz hacia el detector mediante una pantalla.

Al incorporar elementos al interior de la esfera, parte de la energía luminosa emitida por la lámpara será absorbida por estos objetos, en consecuencia la señal del fotodetector se verá reducida; por ello, comúnmente las esferas de integración están equipadas con una lámpara auxiliar que permite realizar mediciones de absorción de luz por los objetos contenidos en la esfera y por las mismas lámparas a medir. Estas consideraciones determinan los elementos necesarios que se deben incluir en el sistema de la esfera de integración. En la figura 1 se muestra el esquema de una esfera de integración típica.

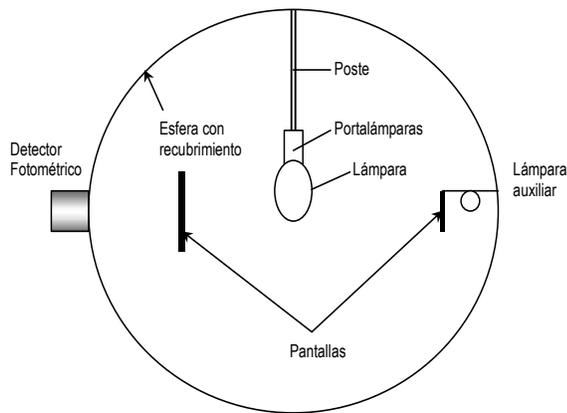


Fig. 1 Esfera de integración luminosa.

El sistema de medición de CENAM está constituido básicamente por dos esferas de integración equipadas con un detector fotométrico, un par de pantallas, una lámpara auxiliar, un portalámparas y las conexiones eléctricas necesarias. Además, para el monitoreo de los parámetros eléctricos con los que se alimenta a la lámpara, se incluye un resistor Shunt y multímetros. Uno de estos también se utiliza para la medición de la fotocorriente generada por el fotodetector. Por otro lado, un conjunto de lámparas incandescentes calibradas constituyen los patrones de referencia.

Como la unidad de flujo luminoso total solamente puede ser transferida mediante lámparas, en la práctica las mediciones de flujo luminoso total hacen uso de la técnica de sustitución, donde a partir de mediciones de fotocorriente y del flujo luminoso Φ_r de una lámpara de referencia, es posible conocer este valor fotométrico Φ_t para una lámpara de prueba mediante:

$$\Phi_t = \left(\frac{I_t}{I_r} \right) \Phi_r \quad (2)$$

donde I_t e I_r representan las fotocorrientes de la lámpara de prueba y de referencia, respectivamente.

Es una práctica común que, para determinar el flujo luminoso total de una lámpara de prueba se utilicen al menos dos lámparas de referencia, éstas se miden al inicio de la ronda de mediciones; después un grupo de lámparas de prueba se mide tres veces. Cada lámpara se alterna en la secuencia de mediciones y al final las mismas lámparas de referencia se vuelven a medir. También se realizan mediciones de la corriente en oscuridad I_o a fin de abstraerla de la señal del detector.

Como las lámparas son operadas a una intensidad de corriente específica, determinada por su temperatura de color, es necesario que el flujo luminoso proveniente de cada fuente se estabilice al momento de la medición.

3. FUENTES DE INFLUENCIA Y TÉCNICAS DE CORRECCIÓN

Los resultados de las mediciones del flujo luminoso obtenidos cuando se utilizan esferas de integración se ven influenciados por los siguientes aspectos:

- Características de las lámparas
- Efectos ocasionados por el mismo sistema de medición
- Desviaciones de señal causados por el suministro eléctrico de la lámpara.

El tratamiento de estos factores se explica más adelante con mayor detalle puesto que éstos constituyen diversas fuentes de influencia en las mediciones. Una vez analizadas las posibles fuentes de influencia, se exponen enseguida las técnicas de corrección aplicadas a las mediciones de flujo luminoso realizadas en CENAM.

3.1. Influencia de las lámparas

Pese a que actualmente existen en el mercado gran variedad de lámparas, en realidad sólo un número limitado de ellas presentan la posibilidad de ser empleadas como patrones de transferencia o de trabajo, debido a que las lámparas deben ser reproducibles y estables por un período de uso prolongado. Por lo tanto, sólo algunos tipos se

encuentran disponibles comercialmente y pueden ser considerados como patrones de flujo luminoso.

En la calibración de las lámparas es deseable que los patrones de referencia y de prueba presenten características similares, primordialmente en cuanto a la distribución espectral y espacial de la luz emitida, así como en su tamaño y geometría. Además, debe asegurarse la trazabilidad de las mediciones.

En cuanto a las lámparas de prueba, éstas deben quemarse alrededor del 5% de su vida promedio a una intensidad de corriente similar a la de su uso posterior para evaluar su estabilidad y evitar cambios bruscos durante su empleo como patrones de trabajo. Ya que la intensidad luminosa de una lámpara nueva decrece alrededor del 10% o más durante las primeras horas de uso. Con el desgaste inicial de cada lámpara se obtiene información de la deriva de las fuentes y es posible seleccionar los mejores ejemplares para utilizarse como patrones de referencia. La figura 2 muestra una gráfica típica del envejecimiento de una lámpara; en este caso, la lámpara utilizada fue una Polaron LF60.

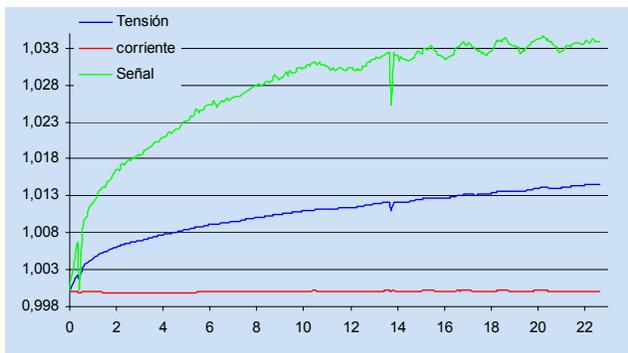


Fig. 2 Características de envejecimiento de una lámpara

Cada lámpara debe calibrarse en temperatura de color a fin de determinar sus parámetros eléctricos de operación, además es conveniente obtener su distribución espectral, especialmente cuando las diferencias son significativas entre las lámparas a medir y los patrones. Esto se verá con más detalle en la siguiente sección.

3.2 Influencia del sistema de medición

Por sus características, el sistema de medición es susceptible a inducir fuentes de error; entre las cuales se encuentran la autoabsorción, las diferencias espectrales, la no uniformidad espacial,

el efecto de la temperatura en el fotodetector y la absorción del campo cercano.

La autoabsorción se refiere a la parte de luz reflejada que absorbe la propia lámpara y los elementos contenidos en la esfera, reduciendo la respuesta del detector fotométrico. En mediciones de alta exactitud, la autoabsorción de cada lámpara debe medirse sin importar que sean del mismo tipo. Las mediciones de autoabsorción se realizan con la lámpara auxiliar encendida, se toma la señal del fotodetector y_{01} en condición nula, donde la lámpara y el portalámparas, cuando es posible, se retiran del sistema; después se incorporan estos elementos en la esfera y se realiza otra medición y_i . Este proceso se realiza para cada lámpara, sin encenderla, y al final se vuelve a tomar la señal para la condición nula y_{02} [2]. El factor de autoabsorción α_i se obtiene mediante:

$$\alpha_i = \frac{y_i}{\left[\frac{(y_{01} + y_{02})}{2} \right]} \quad (3)$$

Las diferencias espectrales se presentan cuando la respuesta espectral del conjunto detector-esfera no iguala perfectamente a la curva de la función $V(\lambda)$ y se incrementan cuando la distribución espectral de potencia óptica tanto de las lámparas patrón como de las de prueba difieren considerablemente. Para poder determinar un factor de corrección es necesario conocer la respuesta espectral del detector $s(\lambda)$ y el espectro de cada lámpara $S_i(\lambda)$. Entonces es importante realizar la corrección por medio de la siguiente relación:

$$ccf^*(S_i) = \frac{\int_{\lambda} S_A(\lambda)s(\lambda)d\lambda \int_{\lambda} S_i(\lambda)V(\lambda)d\lambda}{\int_{\lambda} S_A(\lambda)V(\lambda)d\lambda \int_{\lambda} S_i(\lambda)s(\lambda)d\lambda} \quad (4)$$

donde $ccf^*(S_i)$ es el factor de corrección para cada lámpara, $V(\lambda)$ la respuesta espectral fotópica y $S_A(\lambda)$ es la distribución espectral del iluminante A [3]. Si las lámparas a medir difieren considerablemente en cuanto a su temperatura de color, esta corrección será de mayor utilidad en la determinación del flujo luminoso.

La respuesta del fotodetector tiende a cambiar si existe un cambio de temperatura en el sistema, el cual puede ser ocasionado por la radiación de la lámpara dentro de la esfera. En el caso de no contar con un control de temperatura ambiental y por lo

tanto no disponer de una compensación, la señal del fotodetector se verá afectada; a menos que la temperatura del laboratorio esté lo suficientemente controlada, (por ejemplo con variaciones menores a $\pm 1^\circ\text{C}$) es necesario realizar una corrección. Para ello se debe conocer el coeficiente de temperatura del fotodetector c_p y aplicar la siguiente relación [2]:

$$k(T_p) = 1 - (T_p - T_0) \cdot c_p \quad (5)$$

donde $k(T_p)$ es el factor de corrección por temperatura, T_p es la temperatura a la cual se utiliza el fotodetector y T_0 es la temperatura a la que éste se calibró. La corrección no es necesaria si las mediciones se realizan durante un período corto durante el cual la temperatura ambiente se mantenga dentro de $\pm 1^\circ\text{C}$.

La no uniformidad espacial en la respuesta de la esfera scf^* , se ocasiona por los objetos que existen en su interior, así como por el polvo acumulado en sus paredes internas. Mientras que la absorción del campo cercano se refiere a la absorción directa de la luz por objetos muy cercanos a la fuente de radiación y que no es posible corregir con las mediciones de autoabsorción. Este efecto se presenta principalmente con lámparas de tubo cuyo portalámparas se extiende a lo largo de la propia lámpara.

Para estas dos últimas fuentes de influencia existen técnicas de corrección semejantes a las ya mencionadas; sin embargo, aún no han sido aplicados en CENAM debido a la dificultad para establecerlos; no obstante, se puede consultar la referencia [2] para obtener una explicación más amplia.

Es recomendable realizar las correcciones aquí presentadas, si no en su totalidad, al menos en la medida que las diferencias discutidas se vayan incrementando. No obstante, si la reflectancia de la esfera es alta (95%-98%), la respuesta de la esfera será más sensible a los efectos de autoabsorción y diferencias espectrales, pero se reducen los efectos de no uniformidad espacial. Si estas correcciones no se aplican, entonces será más ventajoso emplear esferas con reflectancia más baja (80%-90%). En cualquier caso es recomendable aplicar la corrección por autoabsorción en cada medición. Al corregir estas fuentes de influencia es evidente que el modelo matemático de la ecuación (2), para la determinación del flujo luminoso, se modifica quedando de la siguiente forma:

$$\Phi_t = \frac{(I_t - I_o) \cdot \alpha_r \cdot ccf^*(S_t) \cdot scf_t^*}{(I_r - I_o) \cdot \alpha_t \cdot ccf^*(S_r) \cdot scf_r^*} \cdot \Phi_r \quad (6)$$

3.3. Dependencia de las condiciones de operación y medición

Como en la mayoría de las mediciones fotométricas, el ajuste incorrecto de los parámetros eléctricos en la operación de las lámparas puede ocasionar desviaciones considerables en la señal del fotodetector, ya que un cambio pequeño en los parámetros eléctricos produce también un cambio proporcional en la magnitud fotométrica [4]. Entonces es necesario realizar pruebas de estabilidad de la fuente de corriente antes de efectuar las mediciones fotométricas, ya que como se ve en la figura 2, la señal del fotodetector está influenciada por los cambios en las condiciones eléctricas de operación.

Asimismo, es indispensable establecer un método de corrección de valores por ligeros cambios en los parámetros eléctricos durante la operación de la lámpara. Esto se puede realizar al medir los cambios de señal ante variaciones pequeñas y controladas de las condiciones eléctricas de operación de la lámpara. Una vez que se establece su interacción, se puede encontrar una aproximación polinomial para asociar cualquier cambio en el valor del parámetro eléctrico con su correspondiente variabilidad en señal.

No obstante la mejor aproximación se obtiene relacionando el logaritmo de estas mediciones con una función polinomial de logaritmos $F(x)$, donde x es la variación del parámetro eléctrico en cuestión, expresado en forma relativa con respecto al valor de referencia. Si el logaritmo de las mediciones muestra un comportamiento lineal con pendiente m , entonces se utiliza la forma más práctica para relacionar estas diferencias de la siguiente manera [5]:

$$\Phi' = \Phi \cdot \left(\frac{J'}{J} \right)^m \quad (7)$$

donde J representa la tensión o la intensidad de corriente a considerar. El flujo luminoso Φ' es el que se obtiene debido al cambio relativo que presenta el valor de referencia J al pasar al valor J' . Por lo tanto, el exponente m representa entonces el factor de

corrección que debe aplicarse para corregir el flujo luminoso Φ determinado en la medición.

En cuanto a los instrumentos de medición, éstos deben estar calibrados para determinar si existen errores en las lecturas que reporta el instrumento, y en su caso corregir los valores obtenidos mediante un factor de calibración. Asimismo, es recomendable hacer un estudio de la deriva que sufren los equipos y considerar este efecto como una contribución a la incertidumbre de la medición.

Es conveniente indicar que si las correcciones descritas en esta sección son aplicadas, entonces el modelo matemático del mensurando se modifica al incluir éstas como factores; asimismo, su contribución debe ser considerada en la estimación de la incertidumbre de la medición. En [6] se puede encontrar un ejemplo práctico de las recomendaciones que aquí se tratan incluyendo su balance de incertidumbre.

En general, los factores de corrección presentados en este trabajo contribuyen a la incertidumbre de la medición en una mínima parte, pues ésta se encuentra dominada por la incertidumbre de calibración de los patrones, pese a lo cual es importante cuantificar su aportación para lograr una caracterización adecuada del sistema.

4. CONCLUSIONES

Se han presentado las correcciones más comunes en la medición de flujo luminoso total. Además se ha presentado la técnica de corrección adoptada para cada caso. Aunque no todas las correcciones mencionadas se aplican actualmente en CENAM, se han abordado aquéllas cuyos errores suelen ser más recurrentes. De cualquier forma, algunas correcciones se pueden omitir si se mantiene un control riguroso de la causa que lo origina.

No obstante, se ha visto que entre las fuentes de error más críticas se encuentran las relacionadas con las fluctuaciones de la intensidad de corriente de alimentación de las lámparas, ocurridas en el instante de la medición; y por ello se recomienda observar mayor cuidado. Estos errores no son los más evidentes y su ajuste requiere de un estudio adicional. Como parte de la caracterización de un sistema de esfera de integración, es favorable realizar este estudio y poder detectar en su momento inestabilidades en el sistema de medición.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Dr. Eric Rosas por la revisión de este documento.

REFERENCIAS

- [1] A. C. Parr, The Candela and Photometric and Radiometric Measurements, Journal of Research of the National Institutes of Standards and Technology, Vol. 106, 2001, 151-186.
- [2] C. De Cusatis, Handbook of Applied Photometry, Ed. AIP, New York, 1997.
- [3] Y. Ohno, Luminous Flux Measurements, 2002 NIST Photometry Short Course, 2002.
- [4] G. Sauter, D. Lindner, M. Lindemann, CCPR Key Comparisons K3a of Luminous Intensity and K4 of Luminous Flux with Lamps as Transfer Standards, PTB Bericht Opt-62, 1999.
- [5] W. Erb, G. Sauter, PTB network for realization and maintenance of the candela, Metrologia, Vol 34, 1997, 115-124.
- [6] I. Oidor, R. Cardoso, J. G. Suárez, Implementación y caracterización del sistema de medición de flujo luminoso total del CENAM, SOMI XVIII Congreso de instrumentación, 2003.