

Medida de Flujo Luminoso en Esfera de Ulbricht. Estudio de Incertidumbres. Intercomparación con Cálculo por Integración.

Ing. Nicolás Rivero, *IIE-FI-UDELAR*
Ing. Andrés Cardozo, *IIE-FI-UDELAR*
Guzmán Pérez, *IIE-FI-UDELAR*
Matías Sellanes, *IIE-FI-UDELAR*

Resumen—El objetivo de este trabajo es obtener un procedimiento de cálculo de incertidumbre para las medidas de flujo luminoso que realiza nuestro laboratorio. Existen múltiples factores que afectan una medida de este tipo, algunos de ellos muy difíciles de modelar, como la característica de reflexividad de la pintura o su degradación con el tiempo y/o el uso, etc. Es fundamental para cualquier laboratorio poder informar sus resultados con las incertidumbres correspondientes, teniendo un procedimiento documentado que siga la normativa técnica vigente como respaldo. Se presentan además, estudios comparativos entre las medidas de flujo realizadas por el método de la Esfera de Ulbricht y las mismas medidas obtenidas mediante Integración de la Matriz de Distribución de Intensidades de la fuente.

Palabras Clave—flujo luminoso, medida, Ulbricht, esfera, matriz de distribución de intensidades luminosas, incertidumbre

I. INTRODUCCIÓN

Como parte del proceso de mejora continua, el Laboratorio de Fotometría del Instituto de Ingeniería Eléctrica, Facultad de Ingeniería, Universidad de la República (de aquí en adelante LabFot-IIE), está embarcado en un proceso de revisión del cálculo de incertidumbres en sus ensayos de flujo luminoso, tema del presente trabajo.

El flujo luminoso de una lámpara o fuente luminosa, es aquella parte del flujo radiante que sensibiliza al ojo humano. Su unidad es el Lumen (lm) y es uno de los parámetros que caracterizan a una fuente luminosa, puesto que cuantifica la cantidad de energía radiante por unidad de tiempo que se convierte en luz visible¹.

La determinación eficiente del flujo luminoso de un cierto manantial es tarea fundamental de cualquier laboratorio de fotometría.

Existen varios métodos de medición de flujo luminoso (ver [2, Cap. 2]), en muchos de ellos el flujo se determina indirectamente a través de una medición de Iluminancia². El método que hace uso de la Esfera Integradora de Ulbricht es uno de ellos (enunciado en 1892 por Sumpner)

¹Es el flujo radiante liberado por la fuente filtrado en longitud de onda por la curva fotópica del ojo humano (ver fig. 2).

²Iluminancia: Flujo luminoso incidente sobre una superficie por unidad de área. Habitualmente se anota E , su unidad es el Lux (lx).



Figura 1: Esfera de Ulbricht del LabFot-IIE.

y es uno de los métodos que actualmente se usa en el LabFot-IIE.

I-A. Esfera de Ulbricht

La Esfera de Ulbricht es una esfera hueca (en el caso del LabFot-IIE de 2 metros de diámetro), cubierta en su interior con una pintura especial, de color blanco, cuya ca-

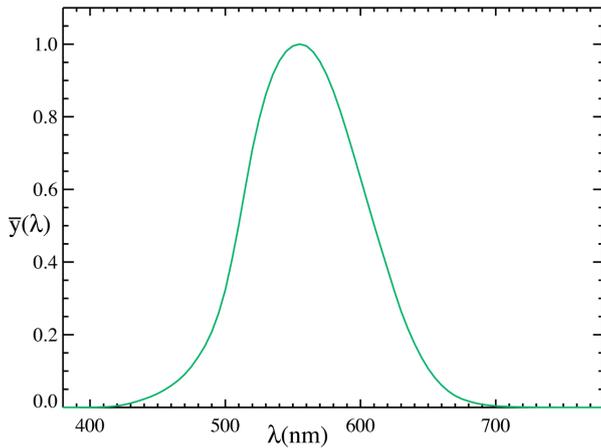


Figura 2: Función de luminosidad fotópica, CIE (1931). Muestra la sensibilidad relativa del ojo a las diferentes longitudes de onda. Fuente: Wikipedia.

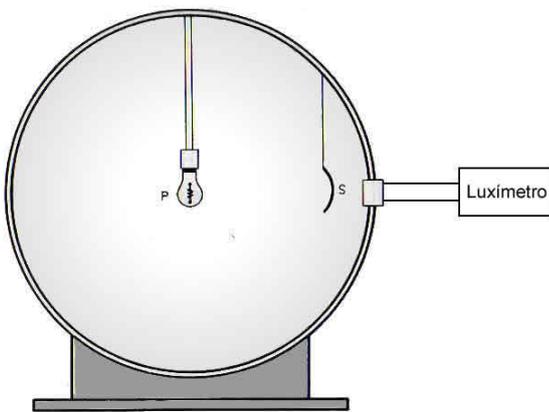
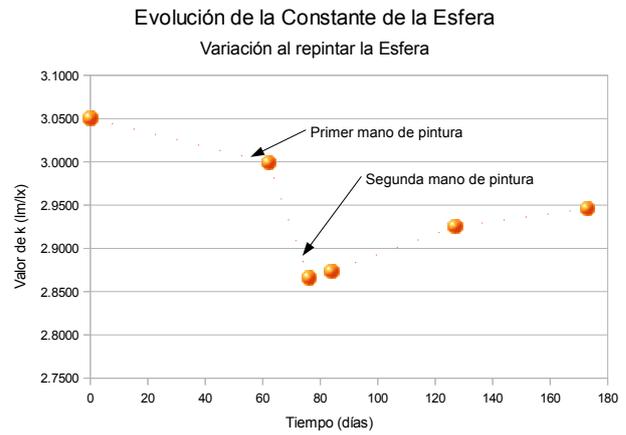


Figura 3: Esquema de la esfera de Ulbricht.

racterística es presentar una reflexividad lo más uniforme posible a las diferentes longitudes de onda percibidas por el ojo humano. En su centro geométrico se sitúa la lámpara cuyo flujo se quiere determinar y sobre la superficie de la esfera se monta el elemento de medición (Luxímetro³), que mide la Iluminancia correspondiente de acuerdo al esquema de la figura 3.

Para que la Esfera se comporte como Esfera Integradora, se coloca una placa (cubierta con la misma pintura de la Esfera), cuyo cometido es evitar que la luz incida directamente sobre el elemento de medición. De esta manera y en forma ideal, se asume que la Esfera Integradora es una superficie Lambertiana, con reflectancia no selectiva. Es decir que para cualquier longitud de onda (del espectro visible) se tiene el mismo índice de reflectancia en todos los puntos de la Esfera. Además, por la geometría de la Esfera y por el hecho de que la luz no incide directamente sobre el punto de medición, no existen puntos privilegiados en su superficie interior. En estas condiciones, y asumiendo la fuente luminosa como puntual frente a la esfera, se

³Un Luxímetro es un instrumento ajustado a la curva de sensibilidad fotópica del ojo humano a las radiaciones monocromáticas (ver fig. 2).



Tiempo (días)	k (lm/lx)	Pintura
0	3.0504	
62	2.9992	
76	2.8660	1er mano
84	2.8737	2da mano
127	2.9251	
173	2.9458	

Figura 4: Evolución de la Constante de la Esfera. Efecto del repintado.

puede probar que el Flujo Luminoso es proporcional a la Intensidad Luminosa (medida en Candelas (*cd*)) [1, Cap. 3]. Luego, aplicando la ley del cuadrado inverso, se llega a que el flujo es proporcional a la Iluminancia según la ecuación 1:

$$\Phi = kE \quad (1)$$

donde k es la llamada *Constante de la Esfera* que, entre otros factores, depende de las dimensiones de la esfera, la composición de la pintura con la cual está pintada, el envejecimiento de la misma y la temperatura. Así pues, determinando de manera adecuada (a los requerimientos del Laboratorio) la Constante k de la Esfera, se puede obtener el valor de flujo luminoso que emite una determinada lámpara bajo ensayo, midiendo la Iluminancia.

No es difícil aceptar el hecho de que la constante de la Esfera, en condiciones adecuadas de Laboratorio, sigue un patrón claro de variación, debido principalmente a la degradación de la pintura y a la contaminación del ambiente (polvo). De hecho, la constante aumenta su valor conforme transcurre el tiempo desde el la última pintura como se puede observar en la figura 4 y en la figura 5, en donde se resume la evolución de k según datos históricos de LabFot-IIIE.

I-B. Comparación con otros métodos

Comparado con otros métodos, como el de Integración de la Matriz de Distribución de Intensidades, el Método de la Esfera de Ulbricht permite la medición de flujo a un número muy superior de lámparas por unidad de tiempo. Además el procedimiento de ensayo es más simple y el equipamiento necesario también. Como contrapartida, se

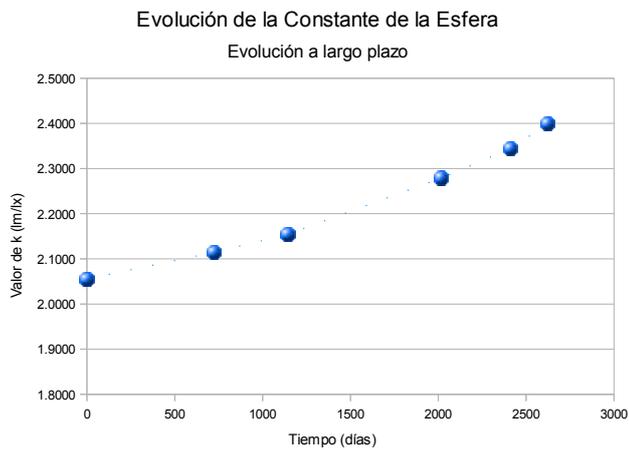


Figura 5: Evolución de la Constante de la Esfera en el largo plazo.

deben mantener lámparas patrones de flujo, realizar determinaciones periódicas de la Constante k (calibraciones) y vigilar su evolución para establecer la periodicidad con que se procede a repintar la Esfera.

II. VERIFICACIÓN CURVA TENSIÓN-FLUJO

Para el cálculo de incertidumbre en las medidas del flujo luminoso, debe establecerse la relación entre el flujo luminoso y la tensión de alimentación de las lámparas. Para el caso de lámparas incandescentes, en [3] se propone una relación entre estas magnitudes (ver ecuación 2), por lo cual se analizará su validez en el LabFot-III.

$$\Phi = \Phi_{nom} \cdot \left[\frac{V}{V_{nom}} \right]^{3,4} \quad (2)$$

A los efectos de verificar la relación entre la tensión y flujo propuesta en [3], utilizada para el cálculo de incertidumbre en la constante k de la esfera, se realizó una serie de ensayos y posterior análisis estadístico de los resultados.

La referida expresión puede reescribirse de la siguiente manera:

$$\log \left[\frac{\Phi}{\Phi_{nom}} \right] = 3,4 * \log \left[\frac{V}{V_{nom}} \right] \quad (3)$$

y haciendo uso de la relación existente entre la iluminancia (E) y el flujo luminoso (Φ) válida en la esfera integradora, resulta que:

$$\log \left[\frac{k * E}{\Phi_{nom}} \right] = 3,4 * \log \left[\frac{V}{V_{nom}} \right] \quad (4)$$

Por tanto según la ecuación 4, la relación propuesta por los autores de [3] entre las variables

$$X = \log \left[\frac{V}{V_{nom}} \right]$$

e

$$Y = \log \left[\frac{k * E}{\Phi_{nom}} \right]$$

resulta ser lineal (recta por el origen con pendiente de valor 3,4). Como resultado de esta observación, se deduce que a los efectos de la verificación estadística de la relación entre las magnitudes X e Y resulta apropiado en principio un análisis de regresión lineal para modelo lineal simple.

II-A. Metodología empleada y resultados

Se ensayaron en la esfera de Ulbricht y en forma independiente, tres lámparas de diferentes potencias nominales. Las características de las lámparas ensayadas se resumen a continuación en el cuadro I:

Denominación	Tensión ⁴ nominal (V)	Potencia nominal (W)	Flujo nominal(lm)
PTB 60-281	109,30	1000	20076
PTB 60-278	109,2	450	8161,5
PTB 60-274	109,0	100	1381,9

Cuadro I: Lámparas utilizadas.

Para cada lámpara el ensayo consistió en variar la tensión de alimentación (tensión de continua) en bornes de la misma, desde el valor nominal hasta 5 voltios por debajo de la tensión nominal, disminuyendo en pasos de aproximadamente 1 voltio. Para cada uno de los valores de tensión se registró la medida de iluminancia (E) correspondiente. Con las parejas de valores (V , E) obtenidos se confeccionó el siguiente cuadro II:

Tensión(V)	E (lx)
109,3	8711,37
108,3	8482,16
107,3	8200,85
106,3	7971,64
105,5	7732,01
109	600,06
108,1	580,16
107	552,97
107	553,91
107	554,32
107,1	564,12
106,1	544,32
105,1	527,96
109,2	3534,29
108,2	3433,23
107,2	3320,71
106,2	3218,60
105,2	3110,25

Cuadro II: Resultados del ensayo

A partir de estos datos se encontró la mejor recta de ajuste $Y = a_0 + a_1 \cdot x$ mediante el método de mínimos cuadrados (por más información de dicho método ver [8, Cap. 13]). Los resultados obtenidos fueron los siguientes:

$$\begin{aligned} a_0 &= -0,001984553 \\ a_1 &= 3,432171512 \end{aligned} \quad (5)$$

Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F
Regresión	1	0,005579123	0,005579123	595,515844
Residuos	16	0,000149897	9,36856E-06	4,36423E-14
Total	17	0,00572902		

Cuadro III: Resultados de Anova.

Lámpara 1 y Lámpara 2), que son siempre las mismas y cuyo flujo luminoso en condiciones nominales es conocido. Para ambas se mide la iluminancia E en cierta cantidad de medidas y luego se determina k se acuerdo a la ecuación 6:

$$k = \frac{\langle \frac{\Phi_1}{E_1} \rangle + \langle \frac{\Phi_2}{E_2} \rangle}{2} \quad (6)$$

donde:

Φ_1 = flujo de la lámpara 1 (corregido de su valor nominal según condiciones de ensayo).

Φ_2 = flujo de la lámpara 2 (corregido de su valor nominal según condiciones de ensayo).

$\langle E_1 \rangle$ = iluminancias medidas en ensayo para la lámpara 1.

$\langle E_2 \rangle$ = iluminancias medidas en ensayo para la lámpara 2.

La corrección de flujo respecto a su valor nominal según condiciones de ensayo se hace siguiendo a los establecido en el trabajo [3] según la fórmula 7:

$$\Phi = \Phi_{nom} \cdot \left[\frac{V}{V_{nom}} \right]^{3,4} \quad (7)$$

donde:

V_{nom} = tensión nominal de la lámpara patrón.

V = tensión de ensayo.

Φ_{nom} = flujo luminoso nominal de la lámpara.

Φ = flujo luminoso corregido según condiciones de ensayo de la lámpara patrón.

Es de destacar que se ha verificado en ensayos realizados en LabFot-IIE la validez de la fórmula establecida en [3] (ver II). Es claro que la tensión de ensayo no es la única fuente de variación posible, existen otras: temperatura, envejecimiento de la lámpara, etc. Sin embargo, de los registros históricos del laboratorio y teniendo en cuenta que las lámparas patrones se calibran periódicamente, se pudo observar que las variaciones de flujo debido a envejecimiento y cambios de temperatura en las condiciones en que se realiza el ensayo son despreciables frente a las posibles variaciones debidas a la tensión de alimentación (de acuerdo a la ecuación 7, un 3% de disminución en la tensión representa aproximadamente un 10% de disminución en el flujo luminoso).

III-A2. Fuentes de Incertidumbre del k de la esfera:

Seguendo a [4], se siguió la metodología de agrupar las posibles fuentes de incertidumbre utilizando un diagrama de Ishikawa. A continuación, en la figura 7, se muestran las fuentes de incertidumbre relevadas en los ensayos realizados en al esfera de Ulbricht para determinar k .

III-A2a. *Incertidumbre Tipo A*: La incertidumbre tipo A es aquella que es evaluada mediante análisis estadístico sobre una serie de observaciones. Se realizan $n=5$ ensayos independientes manteniendo las condiciones en las que se realiza el mismo constantes (por lo menos aquellas

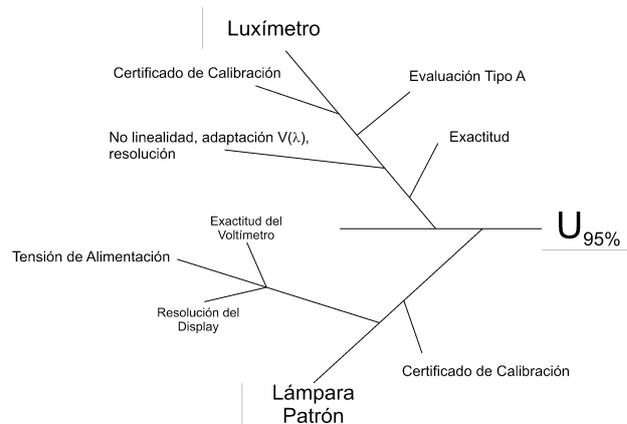


Figura 7: Fuentes de Incertidumbre.

condiciones controlables en el laboratorio como temperatura, humedad, observador, etc.). Además, se realiza este ensayo para dos lámparas patrón distintas, promediando luego los valores medios obtenidos de k para hallar el valor que describe a la esfera.

En cada ensayo, la media se halla según la ecuación 8:

$$\langle k \rangle = \sum_{i=1}^n \frac{k_i}{n} \quad (8)$$

donde

$$k_i = \frac{\Phi_{nom}}{E} \left(\frac{V_i}{V_{nom}} \right)^{3,4} \quad (9)$$

La desviación estándar experimental se calcula a partir de la ecuación 10:

$$\sigma_k = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (k_i - \langle k \rangle)^2} \quad (10)$$

Finalmente, la incertidumbre tipo A del valor promedio de k se calcula a partir del estimador de la varianza del fenómeno y el número de ensayos realizados según la ecuación 11:

$$\mu_A = \frac{\sigma_k}{\sqrt{n}} \quad (11)$$

III-A2b. *Incertidumbre Tipo B*: La incertidumbre tipo B es aquella que se evalúa a partir de otros métodos no estadísticos. Para el caso de determinación del k de la esfera, las fuentes de incertidumbre tipo B son las siguientes:

1. Exactitud del Voltímetro

2. Resolución del Voltímetro
3. Variabilidad de las medidas del Luxímetro declarada por el fabricante
4. Estabilidad del Luxímetro
5. Incertidumbre del Flujo nominal de la lámpara patrón

La incertidumbre tipo B μ_B se calcula según la ecuación 12:

$$\mu_B = \sqrt{\sum_{j=1}^m C_j^2 \mu_j} \quad (12)$$

donde

m = cantidad de fuentes de incertidumbre tipo B

μ_j = incertidumbre estándar de cada fuente tipo B

C_j = contribución de cada fuente a la incertidumbre, calculadas como:

$$C_1 = C_2 = C_V = (3,4) \frac{\Phi_{nom}}{E} \left(\frac{V}{V_{nom}} \right)^{2,4} \frac{1}{V_{nom}} \Big|_{\langle E \rangle \langle V \rangle}$$

$$C_3 = C_4 = C_E = - \frac{\Phi_{nom}}{E^2} \left(\frac{V}{V_{nom}} \right)^{3,4} \Big|_{\langle E \rangle \langle V \rangle}$$

$$C_5 = C_\Phi = \frac{1}{E} \left(\frac{V}{V_{nom}} \right)^{3,4} \Big|_{\langle E \rangle \langle V \rangle}$$

III-A3. Incertidumbre Combinada: La incertidumbre combinada es la incertidumbre estándar del resultado de la medición, obtenido a partir de otras cantidades, y se calcula como a raíz cuadrada de términos positivos, que son las varianzas o covarianzas de dichas cantidades. Se ponderan de acuerdo a cómo varía el resultado de la medición según estas cantidades.

Se calcula según la ecuación 13:

$$\mu_C = \sqrt{\mu_A + \mu_B} \quad (13)$$

Factor de cobertura: es el factor κ mediante el cual se expande la incertidumbre estándar para obtener un nivel de confianza de un 95 %.

$$U_k = \kappa \cdot \mu_C \quad (14)$$

IV. EVALUACIÓN DE INCERTIDUMBRES EN LOS ENSAYOS DE LA ESFERA

IV-A. Incertidumbre Tipo A

Una vez calculada la incertidumbre del k , se pasa al cálculo de incertidumbre objeto de este estudio. Se realizan $n = 5$ ensayos independientes manteniendo las condiciones

en las que se realiza el mismo constantes (por lo menos aquellas condiciones controlables en el laboratorio como temperatura, humedad, observador, etc.). El flujo de la lámpara a ensayar se determina mediante la ecuación 15:

$$\langle \Phi \rangle = k \cdot \langle E \rangle \quad (15)$$

donde k es el de la esfera y $\langle E \rangle$ la iluminancia promedio en el ensayo.

La desviación estándar experimental se calcula a partir de la ecuación 16:

$$\sigma_\Phi = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\Phi_i - \langle \Phi \rangle)^2} \quad (16)$$

Finalmente, la incertidumbre tipo A del valor promedio de Φ se calcula a partir del estimador de la varianza del fenómeno y el número de ensayos realizados según la ecuación 17:

$$\mu_A = \frac{\sigma_\Phi}{\sqrt{n}} \quad (17)$$

IV-B. Incertidumbre Tipo B

Al medir el flujo luminoso, se encuentran las siguientes fuentes de incertidumbre:

1. Exactitud del Luxímetro
2. Resolución del Luxímetro
3. Incertidumbre del k de la Esfera

La incertidumbre tipo B μ_B se calcula según la ecuación 18:

$$\mu_B = \sqrt{\sum_{j=1}^m C_j^2 \mu_j} \quad (18)$$

donde

m = cantidad de fuentes de incertidumbre tipo B

μ_j = incertidumbre estándar de cada fuente tipo B

C_j = contribución de cada fuente a la incertidumbre, calculadas como:

$$C_1 = C_2 = C_E = k|_{\langle k \rangle}$$

$$C_3 = C_k = E|_{\langle E \rangle}$$

IV-C. Incertidumbre Combinada

Análogamente al caso del cálculo de la incertidumbre combinada para el k de la esfera, la incertidumbre combinada para el flujo luminoso se calcula según la ecuación 19:

$$\mu_C = \sqrt{\mu_A + \mu_B} \quad (19)$$

Factor de cobertura: es el factor κ mediante el cual se expande la incertidumbre estándar para obtener un nivel de confianza de un 95 %.

$$U_k = \kappa \cdot \mu_C \quad (20)$$

V. MEDIDA DEL FLUJO DE UNA LÁMPARA Y CÁLCULO DE LA INCERTIDUMBRE CORRESPONDIENTE

En el cuadro IV se presentan los resultados de los ensayos realizados en la última determinación de la constante k y se presenta un ejemplo numérico del cálculo de incertidumbre asociado a la medición, previamente descrito.

Medida	Tensión (V)	E(lx)	Flujo corregido (lm)	k
Lámpara 1 - # 1	109.30	8,742.63	20,076.0	2.296
Lámpara 1 - # 2	109.30	8,721.79	20,076.0	2.302
Lámpara 1 - # 3	109.30	8,711.37	20,076.0	2.305
Lámpara 1 - # 4	109.30	8,711.37	20,076.0	2.305
Lámpara 1 - # 5	109.30	8,711.37	20,076.0	2.305
Lámpara 2 - # 1	109.00	599.33	1381.9	2.306
Lámpara 2 - # 2	109.00	600.37	1381.9	2.302
Lámpara 2 - # 3	109.10	600.37	1381.9	2.302
Lámpara 2 - # 4	109.00	600.37	1381.9	2.302
Lámpara 2 - # 5	109.00	600.37	1381.9	2.302

Cuadro IV: Resultados de los ensayos de una lámpara incandescente.

Las tensiones de ensayo utilizadas para lámpara 1 y lámpara 2 (109,30V y 109,0V respectivamente), fueron las indicadas en los certificados de calibración correspondientes y son valores utilizados históricamente en LabFot-III a los efectos de verificación y calibración de las mismas.

Cabe destacar que los valores correspondientes a la columna rotulada como *Flujo corregido* corresponden a los valores de flujo nominal de la lámpara corregidos según el valor de tensión de alimentación. Se puede ver fácilmente que dicha corrección no influye prácticamente en los valores numéricos, debido a la regulación de la tensión continua de alimentación utilizada. Sin embargo, pese a ello, como ya se dijo la fórmula de la corrección es de utilidad, pues permite vincular mediante una expresión matemática la magnitud de entrada tensión con el mesurando (k).

De la tabla IV y utilizando las fórmulas presentadas en la sección III-A puede verificarse que:

$$\langle k \rangle = \sum_{i=1}^n k_i = 2,30$$

de donde se infiere que

$$u_A = 0,027$$

Por otro lado para la evaluación de la incertidumbre tipo B, y siguiendo lo ya presentado en el diagrama de Ishikawa (figura 7), se utilizó el cuadro V.

Los valores de coeficiente de sensibilidad y las contribuciones se calcularon a partir de las ecuaciones 18.

La fuente denominada como *Luxímetro-f(t)* corresponde a la contribución de la componente asociada a la calibración del luxímetro, mientras que bajo el rótulo *Luxímetro* se presenta la contribución combinada de las demás fuentes indicadas en el diagrama de Ishikawa para el luxímetro.

De la columna de contribuciones del cuadro V se deduce que: $u_B = 0,10$, por tanto la incertidumbre combinada



Figura 8: Lámpara de Mercurio Alta Presión 125 W.

resulta ser $u_C = 0,10$ y finalmente la incertidumbre expandida es $U = 0,20$ para $k = 2$, $gl = \infty$.

Los grados de libertad efectivos fueron obtenidos a partir de la fórmula aproximada de Welch-Satterthwaite (ver [5]):

$$v_{eff} = \frac{u_c^4(k)}{\sum_{i=1}^n \frac{u_i^4}{v_i}} \quad (21)$$

Por lo tanto resulta el valor de la constante k de la esfera resulta ser:

$$k = 2,30 \pm 0,20 \text{ lm/lx} \quad (22)$$

Donde la incertidumbre expandida de la medición declarada es el resultado de multiplicar la incertidumbre estándar combinada de la medición multiplicada por el factor de cobertura k , con grados de libertad (v_{eff}) correspondientes a un nivel de confianza de aproximadamente 95.45 %.

VI. VERIFICACIÓN PARA LÁMPARAS DE DESCARGA

A modo de verificación de la validez de la utilización de la constante⁷ k para determinación del flujo luminoso de fuentes con patrones espectrales diferentes, se realizaron medidas de flujo de lámparas de descarga con flujo conocido⁸.

VI-A. Lámpara de Alta Presión de Mercurio

Se utilizó una lámpara de Mercurio de Alta Presión de 125 W (ver fig. 8). Se ensayó en el Goniómetro del Laboratorio determinando la Matriz de Distribución de Intensidades de la lámpara para medio casquete esférico. El cálculo de integración se realizó utilizando interpolación cuadrática, y para la determinación del flujo luminoso de la lámpara por este método se asumió simetría de emisión⁹ respecto al plano correspondiente a los dos meridianos límites del mencionado casquete.

En la figura 9 se verifica que tan buena es la simetría para el casquete relevado. La curva roja es el promedio de las intensidades de los gajos del medio casquete. El ángulo $\gamma = 180^\circ$ corresponde a la dirección del casquillo de la lámpara, mientras que $\gamma = 0^\circ$ corresponde a la dirección opuesta. Las barras son las desviaciones estándar de cada meridiano.

⁷Calculada a partir de un patrón de flujo incandescente.

⁸El flujo fue determinado por integración directa de la Matriz de Distribución de Intensidades de las lámparas, la cual fue determinada en ensayo en Goniómetro.

⁹El Goniómetro utilizado no está diseñado para medir flujo de lámparas, por lo cual no es posible relevar con él la todas las direcciones.

Fuente	Distribución	Inc. Estándar	Coef. Sensibilidad	g.l	Contribución
Voltímetro-Resolución	Rectangular	2.89E-03	0.071734486	infinito	0.000207080
Voltímetro-Exactitud	Rectangular	0.050396905	0.071734486	infinito	0.003615196
Luxímetro	Normal	139.7980628	-0.000494234	infinito ⁶	-0.069092969
Luxímetro - f(t)	Normal	69.89903141	-0.000494234	infinito	-0.034546484
Lámpara-Flujo nominal	Normal	275.4750627	0.000214662	infinito	0.059134056

Cuadro V: Contribuciones a la Incertidumbre tipo B.

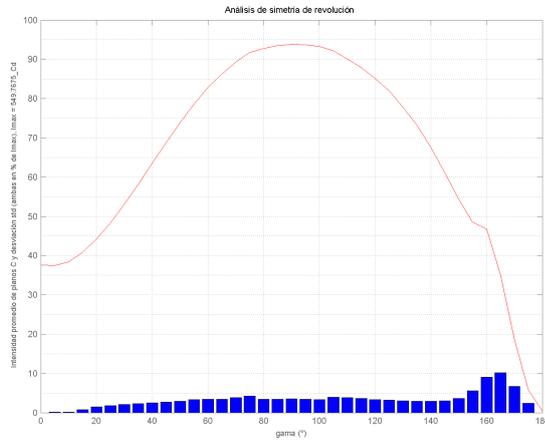


Figura 9: Lámpara de Mercurio Alta Presión 125 W. Análisis de simetría de revolución en el patrón de emisión.

Lámpara de Mercurio Alta Presión 125 W	
Flujo calculado por Integración (lm)	5282
Flujo medido en Esfera (lm)	5243
Diferencia (%)	-0.73

Cuadro VI: Lámpara de Mercurio Alta Presión 125 W. Intercomparación de valores de flujo calculados por el método de Integración de Matriz de Distribución de Intensidades y por el método de la Esfera de Ulbricht.

En el cuadro VI se muestran los resultados obtenidos para la lámpara de Mercurio.

VI-B. Lámpara de Alta Presión de Sodio

Se utilizó una lámpara de Sodio de Alta Presión de 70 W. Se ensayó en el Goniofotómetro del Laboratorio determinando la Matriz de Distribución de Intensidades de la lámpara para medio casquete esférico en iguales condiciones que la lámpara de Mercurio. Para todos los cálculos se utilizaron los procedimientos iguales a lo descritos para el caso de la lámpara de Mercurio.

En la figura 11 se muestra que tan buena es la simetría para el casquete relevado en este caso. El hecho de que la lámpara es de bulbo claro (ver fig. 10), hace que la hipótesis de simetría asumida introduzca mayor error que en el caso de la lámpara de Mercurio, debido a que



Figura 10: Lámpara de Sodio Alta Presión 70 W.

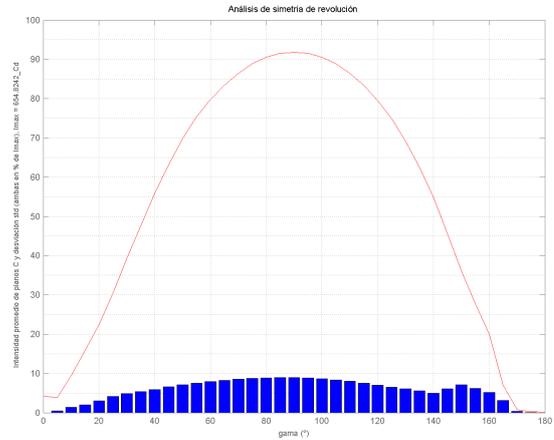


Figura 11: Lámpara de Sodio Alta Presión 70 W. Análisis de simetría de revolución en el patrón de emisión.

Lámpara de Sodio Alta Presión 70 W	
Flujo calculado por Integración (lm)	5680
Flujo medido en Esfera (lm)	5834
Diferencia (%)	2.71

Cuadro VII: Lámpara de Mercurio Sodio Presión 70 W. Intercomparación de valores de flujo calculados por el método de Integración de Matriz de Distribución de Intensidades y por el método de la Esfera de Ulbricht.

quedan expuestas las asimetrías constructivas inherentes a la lámpara (soporte del tubo de descarga, etc.).

En el cuadro VII se muestran los resultados obtenidos para la lámpara de Sodio.

VI-C. Comentarios sobre los resultados

En ambas verificaciones se obtuvo una diferencia menor a 3%.

El hecho de que el flujo medido en la esfera haya sido menor que el valor Integrado (considerado como referencia) para el caso de la lámpara de Mercurio, y haya sucedido lo opuesto para la lámpara de Sodio, sugiere que la pintura no es completamente uniforme en su coeficiente de reflexividad. La lámpara de Sodio tiene un patrón de emisión muy concentrado en la zona de los amarillos. Se puede concluir que la pintura favorece levemente estas longitudes de onda y penaliza la emisión hacia los azules.

De todas formas, y considerando que no se puede disponer de patrones de flujo de lámparas de descarga¹⁰, las diferencias verificadas confirman la corrección de los procedimientos y cálculos realizados.

¹⁰No existen debido a la inestabilidad inherente a este tipo de lámparas.

VII. CONCLUSIONES

Se ha presentado un método para el cálculo de incertidumbre en la medida del flujo luminoso a partir de experimentos realizados con lámparas incandescentes de referencia de flujo. Dada la imposibilidad de cuantificar el impacto de la degradación de la pintura, deberá calcularse periódicamente el valor de k para evaluar la incertidumbre asociada a esta constante.

REFERENCIAS

- [1] De Araújo Moreira, Vinicius. *Iluminação & Fotometria, Teoria e aplicação*, São Paulo, Edgard Blücher, 3ra edición, 1987.
- [2] Illuminating Engineering Society of North America, *Lighting Handbook, Reference & Application*, New York, 8va edición.
- [3] Olivera, José y Lucato, Alfredo y Souza, Ricardo, *Calculo da incerteza de medição na calibração de luxímetros*, Congreso de Metrología 2003, septiembre 01-05,2003, Recife, Pernambuco-Brasil
- [4] Olivera, José y Lucato, Alfredo y Pinto, Rinaldo y Marcelo de Oliveira, Jesus, *Cálculo da Incerteza de Medição na Calibração de Lâmpadas-Padrão de Fluxo Luminoso*, Congreso de Metrología 2003, septiembre 01-05,2003, Recife, Pernambuco-Brasil
- [5] International Organization for Standardization (ISO), *Guide to the expresion of Uncertainty in Measurements*, 1995.
- [6] Schmid, Wolfgang y Lazos Martínez, Ruben, *Guía para estimar la incertidumbre de la medición* México, 2000.
- [7] Slomovitz, Daniel, *Mediciones Eléctricas*, IEEE Región Latinoamérica, 2002.
- [8] Canavos, George C., *Probabilidad y Estadística*, México, Mc.Graw-Hill, 1988, ISBN: 968-451-856-0

Nicolás F. Rivero Rodríguez Ingeniero Electricista egresado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de la República Oriental del Uruguay en 2004. Ingeniero en ANTEL en Energía Interior (desde 2007); mantenimiento de Sistemas de Energía de centrales, radiobases, etc. Docente en el Departamento de Potencia del Instituto de Ingeniería Eléctrica de la Facultad de Ingeniería desde 1999, integrante del Laboratorio de Fotometría desde 1997. Actualmente Profesor Adjunto, Encargado del Laboratorio de Fotometría del Instituto de Ingeniería Eléctrica, responsable del tema Iluminación en el curso de Instalaciones Eléctricas y docente en el curso Introducción a la Electrotécnica. Anteriormente (2001 a 2009) asesor técnico y luego Ingeniero especialista en Electrónica e Instrumentación en CSI Ingenieros y CIEMSA habiendo trabajado en proyectos, dirección de obra, elaboración de propuestas, mantenimiento, etc. dentro y fuera del país. Estudiante de Maestría en Ingeniería Eléctrica en el área de Electrónica de Potencia, y de Ingeniería en Computación en la Facultad de Ingeniería de la Universidad de la República.

Andrés Cardozo es Ingeniero Electricista egresado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de la República de Uruguay en 2009. Desde el año 2009 es ayudante en el Departamento de Potencia del Instituto de Ingeniería Eléctrica de Facultad de Ingeniería – UdelaR, donde se desempeña como docente (asignatura Medidas Eléctricas) e investigador. Sus áreas de interés son: Calidad de Energía y Metrología. Se desempeña además en el ámbito del sector industrial privado, donde ha participado desde 2006 en elaboración de proyectos de instrumentación y control. Particularmente en diseño de controles para sistemas hidráulicos.

Pérez, Guzmán es estudiante de la carrera de Ingeniería Eléctrica Perfil Potencia en la Facultad de Ingeniería de la Universidad de la República. Durante el año 2010 ha trabajado como investigador en el marco del convenio celebrado entre la Facultad de Ingeniería y la Intendencia de Montevideo para la elaboración de un Plan Estratégico de Gestión de la Energía. Además, ejerce la docencia dictando la asignatura Electrotécnica para las carreras de Ingeniería Mecánica y Química. En el sector privado, desde 2007 se desempeña como Jefe de Obras de Montajes Electromecánicos en la empresa Electrosistemas SRL.

Sellanes, Matías es estudiante de la carrera de Ingeniería Eléctrica Perfil Potencia en la Facultad de Ingeniería de la Universidad de la República. Durante el año 2010 ha trabajado como investigador en el marco del convenio celebrado entre la Facultad de Ingeniería y la Intendencia de Montevideo para la elaboración de un Plan Estratégico de Gestión de la Energía. Se desempeña como ayudante del Laboratorio de Fotometría del Instituto de Ingeniería Eléctrica, en la Facultad de Ingeniería de la Universidad de la República, y ejerce la docencia en la misma casa de estudios dictando la asignatura Electrotécnica para las carreras de Ingeniería Mecánica y Química.