



CENTRO NACIONAL DE METROLOGÍA

# INCERTIDUMBRE EN LA CALIBRACIÓN DE LÁMPARAS EN IRRADIANCIA ESPECTRAL

Wolfgang A. Schmid  
Verónica Karina Carrillo García

*Nota:* El presente ejercicio ha sido desarrollado bajo aspectos didácticos y lleva por esto algunas simplificaciones. Para aplicarlo a un caso específico, deben tomarse en cuenta los resultados particulares de esa medición o calibración, informes y certificados de calibración, características de los equipos, métodos, condiciones ambientales, habilidades del personal y todos los elementos relevantes particulares de ese sistema de medición.

El Marqués, Qro., México, junio de 2001.

# INCERTIDUMBRE EN LA CALIBRACIÓN DE LÁMPARAS EN IRRADIANCIA ESPECTRAL

Wolfgang A. Schmid, Verónica Karina Carrillo García

Junio ,2001

**Resumen.** El ejemplo presenta la calibración de lámparas incandescentes en irradiancia espectral por comparación con una lámpara patrón, en el intervalo espectral de 250 nm a 2500 nm. La estimación de la incertidumbre se realiza mediante incertidumbres relativas, lo cual tiene la ventaja de presentar coeficientes de sensibilidad sencillos.

## 1. Principio de Medición y el Mensurando

### 1.1 Conceptos básicos

La irradiancia espectral  $E(\lambda)$ <sup>1</sup> está definida por el flujo radiante  $F(\lambda)$  dentro de un pequeño intervalo de longitud de onda  $[\lambda, \lambda + d\lambda]$  que atraviesa perpendicularmente una pequeña área  $dA$  (ver Fig. 1, [3, 4, 6]):

$$E(\lambda) = \frac{d^2\Phi(\lambda)}{d\lambda \cdot dA} \quad (1)$$

La unidad de la irradiancia espectral es:

$$[E(\lambda)] = 1 \frac{W}{m^2 \cdot nm}$$

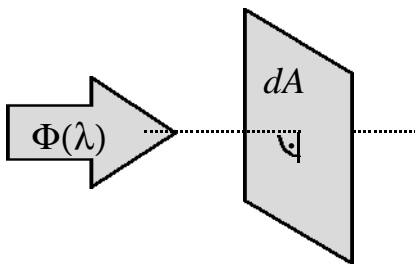


Fig. 1: Concepto de la Irradiancia Espectral

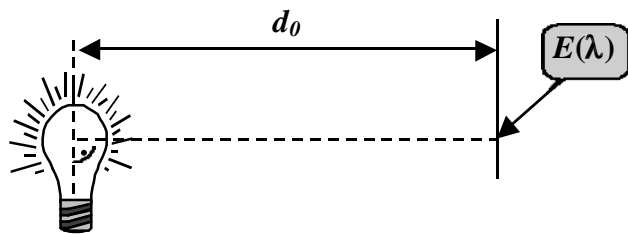


Fig. 2: Irradiancia espectral generada a una distancia  $d_0$  por una lámpara incandescente.

El mantenimiento y la diseminación de la escala de irradiancia espectral generalmente se realiza mediante lámparas incandescentes. Éstas generan la irradiancia espectral respectiva a una distancia definida  $d_0$  y en una dirección definida (ver Fig. 2).

Un espectro típico de una lámpara incandescente tipo FEL [4] se muestra en la Fig. 3.

Nota: Generalmente se utiliza el símbolo  $E_\lambda$  para la irradiancia *espectral*, mientras E es el símbolo para la irradiancia *total*. Por cuestiones de simplicidad, en esta publicación se omite el índice  $\lambda$  y se utiliza E para la irradiancia espectral.

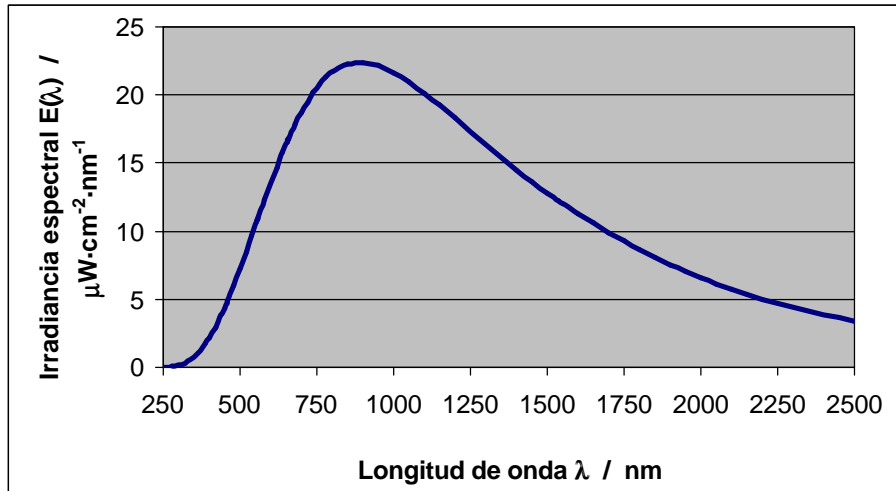


Fig. 3: Espectro típico de irradiancia generado por una lámpara tipo FEL de una potencia eléctrica de 1000 W a una distancia de 50 cm

La calibración de lámparas en irradiancia espectral por comparación se realiza midiendo la lámpara por calibrar y una lámpara patrón sucesivamente con un espectrorradiómetro ([3], p. 4ff).

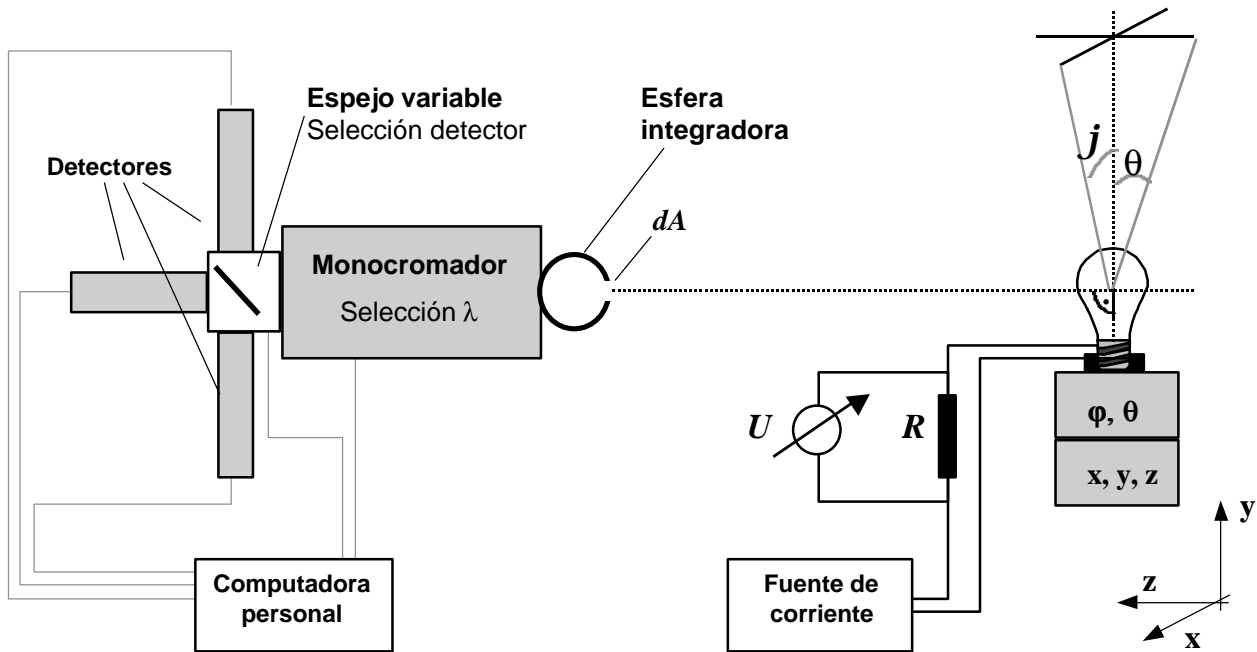


Fig. 4: Componentes principales del Espectrorradiómetro de la División de Óptica y Radiometría (DOR) del CENAM

El **espectrorradiómetro** de la División de Óptica y Radiometría (DOR) del CENAM consiste de los siguientes componentes principales (ver Fig. 4):

- a) **Monocromador doble (aditivo)**, para seleccionar la longitud de onda de interés,
- b) **Esfera integradora** en la entrada del monocromador, cuya apertura define el área  $dA$  y la distancia  $d_0$  donde se mide la irradiancia espectral,
- c) Tres **detectores** a la salida del monocromador que cubren el intervalo espectral de 250 nm a 2500 nm:
  - Fotomultiplicador para el UV                      250 nm a 500 nm ,
  - Fotodiodo de silicio para el VIS,                      500 nm a 1000 nm ,
  - Detector fotoconductor (PbS) para el IR    1000 nm a 2500 nm .
- d) **Monturas**: Elementos para montar y alinear las lámparas,
- e) **Computadora** para realizar mediciones automatizadas (barridos sobre el intervalo espectral).

El **mensurando** es la irradiancia espectral  $E_c(I)$  generada por la lámpara a calibrar a una distancia definida  $d_{0,c}$  y a la longitud de onda  $I$ . En el caso más simple e idealizado, la distancia de referencia de la lámpara por calibrar es igual a la de la lámpara patrón  $d_{0,p} = d_{0,c} = d_0$ , y se cumple perfectamente la igualdad de condiciones de referencia en las mediciones de las dos lámparas (p. ej. distancia, longitud de onda, corriente eléctrica de las lámparas, etc.). Entonces se obtiene  $E_c(I)$  por la siguiente ecuación [4]:

$$E_c(I) = \frac{S_c(I)}{S_p(I)} \cdot E_p(I) \tag{2}$$

$E_c(I)$     Irradiancia espectral de la lámpara a calibrar a la longitud de onda  $I$

$E_p(I)$     Irradiancia espectral de la lámpara patrón a la longitud de onda  $I$ , según el certificado de calibración

$S_c(I)$     Señal medida con el espectrorradiómetro, cuando está puesta la lámpara por calibrar

$S_p(I)$     Señal medida con el espectrorradiómetro, cuando está puesta la lámpara patrón

## 1.2. Factores de corrección

Cuando las condiciones de la medición no corresponden perfectamente a las condiciones de referencia, la ecuación (2) puede ser ampliada por una serie de factores de corrección  $F_x$  para considerar las desviaciones respectivas. Los mismos factores de corrección sirven también para considerar la influencia de la incertidumbre de cada una de las magnitudes de influencia respectivas.

Para una longitud de onda  $I$  fija, la señal de salida  $S$  en el espectrorradiómetro está relacionada con la irradiancia en la entrada de la esfera  $E_e$  por la relación lineal:

$$S = T_{ER} \cdot E_e \quad (3)$$

donde  $T_{ER}$  es un coeficiente del sistema que comprende las pérdidas desde la esfera hasta los detectores y la respuesta espectral (responsividad) de los detectores.  $T_{ER}$  depende de la longitud de onda  $\lambda$ . Para un  $\lambda$  fijo  $T_{ER}$  es igual para la medición de la lámpara a calibrar y la lámpara patrón y debe ser constante durante las mediciones (estabilidad del sistema).

Cuando la lámpara patrón no está exactamente a las condiciones de referencia establecidas en el certificado de calibración, la irradiancia en la entrada de la esfera  $E_{e,p}$  no es igual al valor indicado en el certificado  $E_p$ , lo cual puede ser considerado mediante un factor de corrección  $F_p$  (ó una serie de factores que se combinan en  $F_p$ ).

$$\boxed{E_p = F_p \cdot E_{e,p}} \quad \Rightarrow \quad F_p = \frac{E_p}{E_{e,p}} \quad (4)$$

Considerando la ec. (4), la señal de salida del espectrorradiómetro, generada por la lámpara patrón  $S_p$  es:

$$S_p = T_{ER} \cdot E_{e,p} = \frac{T_{ER}}{F_p} \cdot E_p \quad (5)$$

Lo mismo aplica para la lámpara a calibrar, es decir si no se cumplen perfectamente las condiciones de referencia durante la medición, se debe corregir mediante un factor  $F_c$ :

$$\boxed{E_c = F_c \cdot E_{e,c}} \quad \Rightarrow \quad F_c = \frac{E_c}{E_{e,c}} \quad (6)$$

Igual que en el caso anterior, la señal generada por la lámpara a calibrar  $S_c$  es:

$$S_c = T_{ER} \cdot E_{e,c} = \frac{T_{ER}}{F_c} \cdot E_c \quad (7)$$

Combinando las ecuaciones (5) y (7), resulta:

$$\frac{S_c}{S_p} = \frac{T_{ER} \cdot F_p \cdot E_c}{T_{ER} \cdot F_c \cdot E_p} = \frac{F_p \cdot E_c}{F_c \cdot E_p} \quad (8)$$

Finalmente la ecuación (2) se modifica a:

$$E_c = \frac{S_c}{S_p} \cdot \frac{F_c}{F_p} \cdot E_p \quad (9a)$$

Todas las magnitudes de la Ec. (9a) dependen de la longitud de onda, así que la presentación más precisa es:

$$\boxed{E_c(\lambda) = \frac{S_c(\lambda)}{S_p(\lambda)} \cdot \frac{F_c(\lambda)}{F_p(\lambda)} \cdot E_p(\lambda)} \quad (9b)$$

## 2. Identificación y organización de las fuentes de incertidumbre

### 2.1. Fuentes de Incertidumbre

#### a) Incertidumbre de la lámpara patrón:

Incertidumbre de  $E_p(I)$  cuando la lámpara patrón se opera a las condiciones de referencia.

#### b) Distancia de las lámparas:

La irradiancia disminuye con el cuadrado de la distancia de la lámpara:

$$E(d) = \left(\frac{d_0}{d}\right)^2 \cdot E(d_0) \quad (10)$$

donde  $d$  es la distancia actual de la lámpara,  $d_0$  la distancia de referencia y  $E(d_0)$  la irradiancia a la distancia de referencia.

$E(d)$  representa la irradiancia en el plano de entrada de la esfera integradora  $E_{e,p}$  ó  $E_{e,c}$  respectivamente. Considerando las Ecs. (4) y (6), resulta para los factores de corrección  $F_{dist,p}$  y  $F_{dist,c}$  respecto a la distancia (ver también [5]):

$$\frac{F_{dist,c}}{F_{dist,p}} = \frac{\left(\frac{d_c}{d_{0,c}}\right)^2}{\left(\frac{d_p}{d_{0,p}}\right)^2} = \frac{d_{0,p}^2 \cdot d_c^2}{d_{0,c}^2 \cdot d_p^2} \quad (11a)$$

$$\frac{F_{dist,c}}{F_{dist,p}} = \frac{d_c^2}{d_p^2} \quad \text{para} \quad d_{0,p} = d_{0,c} \quad (11b)$$

Generalmente no se utiliza la lámpara a una distancia  $d$  diferente la distancia de referencia  $d_0$ , así que no serán necesarias *correcciones* según las Ec. (11). Sin embargo, los factores  $F_{dist,p}$  y  $F_{dist,c}$  sirven para relacionar la incertidumbre en la distancia de las lámparas  $u(d_c)$  y  $u(d_p)$  con el mensurando.

En el caso de que la lámpara patrón se utilice a una distancia diferente a  $d_{0,p}$ , debe verificarse que la ley presentada en la Ec. (10) aplica estrictamente en el intervalo de corrección de la distancia. Las posibles desviaciones pueden ser consideradas como una fuente adicional de incertidumbre.

#### c) Alineación de las lámparas:

Aparte de una desviación de la distancia nominal (coordenada  $z$ , ver Fig. 4), las mediciones se ven afectadas también por falta de alineación de las lámparas respecto a las coordenadas  $x$ ,  $y$ ,  $\mathbf{j}$ ,  $\mathbf{q}$ . De la misma manera que el efecto de la distancia, el efecto de la alineación puede ser considerado por factores de corrección  $F_{alin,p}$  y  $F_{alin,c}$ , de acuerdo a las Ec. (4) y (6).

**d) Luz extraviada:**

En la calibración de lámparas en irradiancia, se debe tomar en cuenta solamente la luz que llega directamente de la lámpara al sistema de detección (ó sea a la apertura de la esfera integradora) [3]. En sistemas de medición reales siempre existen reflexiones en las paredes, en la mesa óptica o en monturas, aunque sean negras (luz extraviada), que pueden llegar al sistema de detección y aumentar las señales medidas  $E_{e,p}$  y  $E_{e,c}$ . Estas reflexiones deben ser reducidas a un mínimo posible y las reflexiones inevitables deben ser determinadas y corregidas.

La irradiancia directa  $E_c$  ó  $E_p$  puede ser relacionada con la irradiancia total  $E_{e,c}$  ó  $E_{e,p}$  que entra en la esfera integradora mediante factores de corrección  $F_{LE,c}$  y  $F_{LE,d}$ , con valores menores a 1 (de acuerdo a la definición de los factores de corrección en las Ecs. (4) y (6)).

Estos factores de corrección deben ser determinados individualmente para cada lámpara con su montura respectiva, bloqueando la luz directa con una pequeña pantalla y midiendo exclusivamente la luz extraviada que entra al sistema de medición. Un resultado típico se muestra en la Fig. 5:

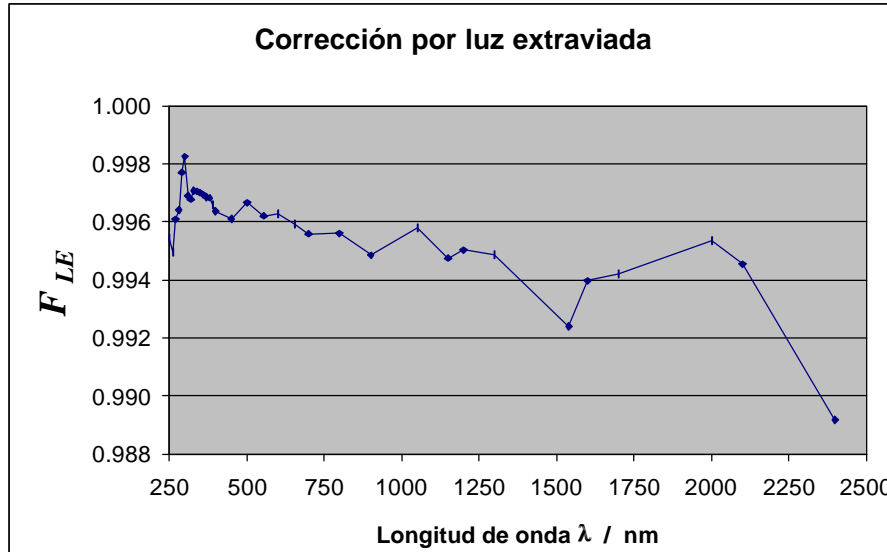


Fig. 5: Factor de corrección por luz extraviada de una lámpara estabilizada (OMTEC)

**e) Nolinealidad de los detectores:**

Debe garantizarse que los detectores sean lineales sobre todo el intervalo utilizado (en potencia óptica) con el fin de desprestigiar los efectos de la nolinealidad, aprovechando el hecho de que se miden señales pequeñas (donde los detectores generalmente son lineales) y que se comparan señales muy parecidas (de la lámpara patrón y la lámpara a calibrar).

**f) Corriente eléctrica de las lámparas:**

Las lámparas del CENAM se utilizan a una corriente eléctrica nominal  $I_0$  entre 8,0 A y 8,3 A. Una desviación de la corriente  $I$  de su valor nominal resulta en una variación en la potencia

eléctrica disipada en el filamento de la lámpara, y con éste en una desviación de su valor nominal de irradiancia. En intervalos pequeños es válida la aproximación (ver también [5]):

$$E(I) = \left( \frac{I}{I_0} \right)^2 \cdot E(I_0) \quad (12)$$

Igual que en el caso de la distancia, se considera el efecto mediante factores de corrección:

$$\frac{F_{I,c}}{F_{I,p}} = \frac{(I_{0,c}/I_c)^2}{(I_{0,p}/I_p)^2} \quad (13)$$

A la incertidumbre debido a la corriente eléctrica contribuyen dos efectos principales:

- i) las fluctuaciones de la corriente
- ii) la incertidumbre de la medición de la corriente

### **g) Longitud de onda:**

Una desviación de la longitud de onda de medición  $I$  de su valor nominal  $I_0$  resulta en la medición de la irradiancia espectral  $E(I)$  en lugar de  $E(I_0)$  y con esto en valores erróneos (ver Fig. 7). Debido a que los espectros emitidos de las lámparas utilizadas son muy parecidos, este error se compensa prácticamente, si se mide la lámpara a calibrar y la lámpara patrón a *la misma* longitud de onda, aunque sea errónea (por lo menos si  $I$  no difiere mucho de  $I_0$ ).

La contribución de la longitud de onda a la incertidumbre de la irradiancia proviene prácticamente de posibles variaciones de  $I$  en el proceso de medición (o sea la reproducibilidad de  $I$  por el monocromador entre las mediciones de la lámpara a calibrar y la lámpara patrón).

Igual que en los casos anteriores, se considera este efecto mediante factores de corrección  $F_{I,c}$  y  $F_{I,p}$  (de acuerdo a la definición de los factores de corrección en las Ecs. (4) y (6)).

La escala de longitud de onda del monocromador se calibra con lámparas espectrales de Hg y Hg-Xe.

### **h) Función del monocromador:**

Aparte de desviaciones de la longitud de onda de su valor nominal, las mediciones también pueden ser afectadas por el perfil espectral de transmisión del monocromador (“función del monocromador”), que comprende efectos por su resolución espectral y “luz espectralmente extraviada”. Debido a la similitud de los espectros de la lámpara patrón y la lámpara a calibrar, las contribuciones por estos efectos se compensan prácticamente en la comparación de las dos lámparas, y no serán consideradas en la estimación de la incertidumbre.

### **i) Resolución del espectrorradiómetro:**

La resolución del espectrorradiómetro contribuye a la incertidumbre de la lectura de las señales  $S_c$  y  $S_p$ .



**j) Repetibilidad de las mediciones:**

En una calibración se mide el espectro de la lámpara patrón y de la lámpara a calibrar repetidas veces, generalmente iniciando y terminando la secuencia con la medición de la lámpara patrón, para detectar y corregir posibles derivas del sistema ([3] p. 22). Una secuencia típica es la siguiente:

Patrón:	2 barridos
Lámpara a calibrar	4 barridos
Patrón	2 barridos

A la dispersión de las lecturas en diferentes barridos contribuye una serie de efectos, por ejemplo el ruido de los detectores, la estabilidad del espectrorradiómetro (o sea del coeficiente  $T_{ER}$ , ver Ec.(3)), variaciones de la corriente eléctrica de las lámparas, variaciones de la longitud de onda (reproducibilidad en barridos diferentes), el reposicionamiento de la lámpara.

**2.2. Modelo matemático detallado**

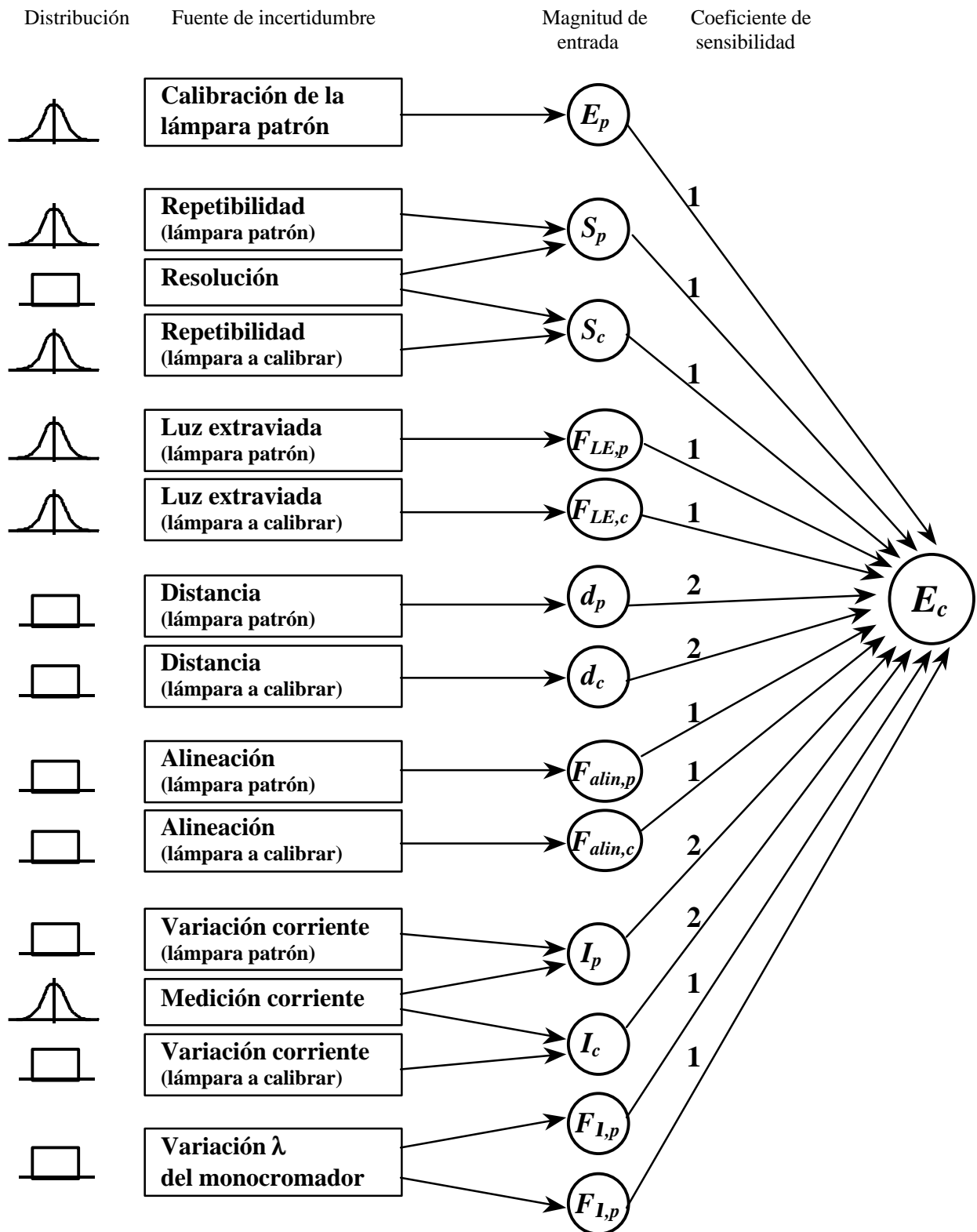
Todos los efectos discutidos en el Cap. 2.1 pueden ser considerados explícitamente en el modelo matemático, presentado en la Ec. (9):

$$E_c(\lambda) = \frac{S_c(\lambda)}{S_p(\lambda)} \cdot \frac{d_{0,p}^2 \cdot d_c^2}{d_{0,c}^2 \cdot d_p^2} \cdot \frac{F_{alin,c}}{F_{alin,p}} \cdot \frac{F_{LE,c}(\lambda)}{F_{LE,p}(\lambda)} \cdot \frac{(I_{0,c}/I_c)^2}{(I_{0,p}/I_p)^2} \cdot \frac{F_{1,c}(\lambda)}{F_{1,p}(\lambda)} \cdot E_p(\lambda) \quad (14)$$

La ec. (14) indica que los factores de corrección por la luz extraviada y por las variaciones de la longitud de onda dependen de la longitud de onda, mientras los demás son constantes en todo el intervalo espectral.

Debido a que el modelo matemático detallado de la Ec. (14) representa una serie de productos y coeficientes, el cálculo con incertidumbres puede realizarse mediante incertidumbres relativas, lo que resultará en coeficientes de sensibilidad sencillos, ó sea de números enteros (ver [1] Cap. 8.4).

### 2.3. Diagrama de árbol



### 3. Cuantificación y reducción

En este capítulo se presenta la cuantificación de cada una de las fuentes identificadas en el capítulo anterior. La reducción a incertidumbres estándar sigue las reglas simples ya conocidas (ver p. ej. [1], Cap. 7), por lo cual no será presentada para cada caso. Los resultados de la reducción se indican en las tablas del anexo A.

Un problema particular de la incertidumbre de irradiancia espectral es, que algunas de las fuentes de incertidumbre, y con esto la incertidumbre combinada, dependen de la longitud de onda. Quiere decir que no se obtiene un valor único para la incertidumbre en todo el intervalo espectral.

La estimación de la incertidumbre se realiza por esto individualmente en los siguientes intervalos espectrales:

<i>Intervalo</i>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>	<b>D</b>	<b>E</b>	<b>F</b>	<b>G</b>
$I_{min} / \text{nm}$	250	270	400	500	800	1000	2000
$I_{max} / \text{nm}$	269	399	499	799	999	1999	2500

Tabla 1: Intervalos espectrales para las estimaciones individuales de la incertidumbre

#### a) Incertidumbre de la lámpara patrón:

La tabla 2 muestra los valores de incertidumbre de los diferentes patrones de la DOR:

<b>Tipo / Trazabilidad</b>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>	<b>D</b>	<b>E</b>	<b>F</b>	<b>G</b>
<b>1) OMTEC / PTB</b>	11 % * / 6 % **	3 %	1,6 %	1,6 %	3 %	3 %	5 %
<b>2) FEL / NIST</b>	1,82 %	1,82 %	1,09 %	1,08 %	1,13 %	2,33 %	4,44 %

Tabla 2: Valores de incertidumbre expandida ( $k=2$ ) para diferentes patrones de referencia. El patrón (1) es una lámpara tipo FEL, estabilizada por detectores, con trazabilidad al PTB. En el intervalo A el valor \* es para 250 nm y \*\* para 260 nm. Los patrones (2) son lámparas tipo FEL con trazabilidad al NIST.

#### b) Distancia de las lámparas:

Generalmente en la DOR se trabaja con lámparas a una distancia de referencia de 50 cm. La lámpara patrón (1) de la tabla 2 está calibrada a una distancia de referencia de 70 cm.

El problema en la determinación de la distancia es la definición y “accesibilidad” del punto de referencia. Generalmente este punto de referencia es el centro del filamento [3]. Debido a la extensión geométrica y una posible deformación del filamento este punto no está claramente definido. Se estima una incertidumbre de  $\pm 2$  mm (distribución rectangular). Para una distancia de 50 cm esto corresponde a una incertidumbre relativa de  $\pm 0,4$  %.

Existen lámparas instaladas en soportes especiales (p. ej. la lámpara (1) de la tabla 2), que tienen como referencia para la medición de la distancia un plano definido de este soporte. La incertidumbre para estos tipos de lámparas está reducida a  $\pm 1$  mm.

Cabe mencionar que la distancia se mide con una regla calibrada, cuya incertidumbre de calibración no contribuye significativamente.

**c) Alineación de las lámparas:**

El efecto de una alineación imperfecta se determina experimentalmente, inclinando ( $j, q$ ) y desplazando ( $x, y$ ) en forma controlada la lámpara encendida dentro del “intervalo de incertidumbre” respecto a la alineación y midiendo las variaciones de las señales  $S_c$  y  $S_p$ .

Se obtiene que las señales no varían más de  $\pm 0,5 \%$ .

Los factores  $F_{alin,p}$  y  $F_{alin,c}$  son 1 dentro de esta incertidumbre de  $\pm 0,5 \%$ .

**d) Luz extraviada:**

La incertidumbre del factor de corrección por luz extraviada  $F_{LE}$  se estima considerando la dispersión entre diferentes mediciones de  $F_{LE}$  con la misma lámpara, pero con arreglos “nuevos” (o sea después de quitar y posicionar nuevamente la lámpara y el baffle que bloquea la luz directa, hasta mediciones en diferentes días) y adicionalmente las dispersiones dentro del mismo barrido (ver Fig. 5). Un resultado típico se muestra en tabla 3:

<i>Intervalo</i>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>	<b>D</b>	<b>E</b>	<b>F</b>	<b>G</b>
<i>Incert. estándar</i>	0,8 %	0,4 %	0,2 %	0,2 %	0,2 %	0,6 %	1,0 %

Tabla 3: Incertidumbre estándar (k=1) del factor de corrección por luz extraviada  $F_{LE}$

**e) Nolinealidad de los detectores:**

No se considera esta contribución.

**f) Corriente eléctrica de las lámparas:**

La corriente eléctrica se proporciona por una fuente estabilizada. El valor nominal de la fuente se mide mediante la tensión eléctrica  $U$  que cae sobre una resistencia  $R$  de un valor nominal de  $0,1 \Omega$  (derivador de corriente).

La corriente se calcula por la ley de Ohm  $I = U/R$ . Se permite calcular la incertidumbre combinada por la raíz de la suma cuadrática de las incertidumbres relativas.

Según las especificaciones de la fuente, su estabilidad es mejor a  $\pm 0,01\%$ , lo cual corresponde a las variaciones observadas. Una desviación sistemática entre el valor nominal y el valor medido no se observa dentro de la incertidumbre de la medición de esta corriente.

La incertidumbre de la medición de la corriente está determinada por las siguientes fuentes:

Fuente de incertidumbre	Incertidumbre relativa original	Tipo	Incertidumbre estándar relativa	
<i>Medición corriente</i>				<b>0,0038 %</b>
Resistencia	$76 \cdot 10^{-6}$	B, normal, k=2	0,0038 %	
Calibración Multímetro	$1 \cdot 10^{-6}$	B, normal, k=2	0,00005 %	
Estabilidad Multímetro	$\pm 9 \cdot 10^{-6}$	B, rectangular	0,0005 %	
Resolución Multímetro	$0,1 \cdot 10^{-6}$	B, rectangular	0 %	
<i>Estabilidad Corriente</i>	$\pm 0,01\%$	<b>B, rectangular</b>		<b>0,0057 %</b>
<b>Incertidumbre estándar combinada</b>				<b>0,007 %</b>

Tabla 4: Contribuciones a la incertidumbre combinada de la corriente eléctrica de la lámpara.

**g) Longitud de onda:**

La reproducibilidad de una longitud de onda seleccionada con el monocromador es de  $\pm 0,1$  nm en el UV y VIS, y de  $\pm 0,4$  nm en el IR ( $\lambda > 1500$  nm).

Para estimar su impacto en la señal medida (irradiancia espectral), hay que determinar el coeficiente de sensibilidad con respecto a la longitud de onda  $\lambda$ , a partir del espectro  $E(\lambda)$  (ver Fig. 7).

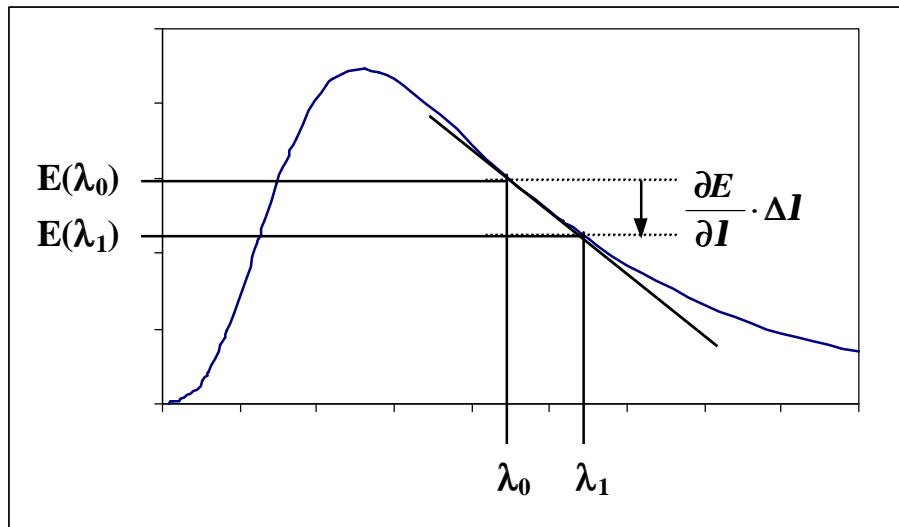


Fig. 7: Efecto de la medición de E a una longitud de onda errónea ( $\lambda_1$  en lugar de  $\lambda_0$ )

El espectro emitido por lámparas incandescentes corresponde en buena aproximación al espectro de un cuerpo negro (ver [4] 1-13):

$$E(\mathbf{I}) = \text{const} \cdot \frac{1}{\mathbf{I}^5 \cdot \left( e^{c_2/\mathbf{I}T} - 1 \right)} \quad (15)$$

$T$  Temperatura de distribución. Valores típicos:  $T \approx 3000 \text{ K} \dots 3200 \text{ K}$

$c_2$  Constante de radiación  $c_2 = 0,014388 \text{ m} \cdot \text{K}$

$\text{const}$  Constante de radiación, que incluye, entre otros distancia y área radiante

Cuando el haz de salida del monocromador es de una longitud de onda  $\mathbf{I}_1$  y difiere del valor nominal  $\mathbf{I}_0$  indicado por el monocromador (sea  $\mathbf{I}_1 = \mathbf{I}_0 - \mathbf{DI}$ ), la señal actual que se mide corresponde a la irradiancia  $E(\mathbf{I}_1)$  en lugar de  $E(\mathbf{I}_0)$ . Considerando las Ecs. (4) ó (6),  $E(\mathbf{I}_1)$  y  $E(\mathbf{I}_0)$  pueden ser relacionados con un factor de corrección  $F_I$  :

$$E(\mathbf{I}_0) = F_I \cdot E(\mathbf{I}_1) \quad (16)$$

$$E(\mathbf{I}_0) = E(\mathbf{I}_1 + \Delta\mathbf{I}) \approx E(\mathbf{I}_1) + \frac{\partial E}{\partial \mathbf{I}}(\mathbf{I}_1) \cdot \Delta\mathbf{I} = E(\mathbf{I}_1) \cdot \left( 1 + \frac{\frac{\partial E}{\partial \mathbf{I}}(\mathbf{I}_1)}{E(\mathbf{I}_1)} \cdot \Delta\mathbf{I} \right)$$

$$\boxed{F(\mathbf{I}_1) = 1 + \frac{\frac{\partial E}{\partial \mathbf{I}}(\mathbf{I}_1)}{E(\mathbf{I}_1)} \cdot \Delta\mathbf{I}} \quad (17)$$

Si el monocromador no tiene un error sistemático, ó si éste fue corregido, resulta  $\mathbf{DI} = 0$  y el mejor estimado del factor de corrección es uno:  $F_I = 1$ . Sin embargo,  $\mathbf{DI}$  tiene la incertidumbre  $u(\mathbf{DI})$  debido a las variaciones aleatorias de  $\mathbf{I}$ , respectivamente  $\mathbf{DI}$ . Aplicando el concepto del coeficiente de sensibilidad, se obtiene para la incertidumbre de  $F_I$  :

$$\boxed{u(F_I) = c_1 \cdot u(\Delta\mathbf{I})} \quad (18)$$

donde  $u(\mathbf{DI}) = u(\mathbf{I})$  incertidumbre de  $\lambda$  (en particular respecto a variaciones de  $\lambda$  en diferentes ciclos de medición)

$$c_1 = \frac{\frac{\partial E}{\partial \mathbf{I}}(\mathbf{I})}{E(\mathbf{I})} \quad \text{coeficiente de sensibilidad con respecto a } \lambda$$

Utilizando la Ec. (15) resulta:

$$c_1 = \frac{\frac{c_2}{T \cdot \mathbf{I}^2} \cdot e^{c_2/\mathbf{I}T} - \frac{5}{\mathbf{I}} \cdot \left( e^{c_2/\mathbf{I}T} - 1 \right)}{\left( e^{c_2/\mathbf{I}T} - 1 \right)}$$

La Fig. (8) muestra el coeficiente de sensibilidad  $c_I$  en el intervalo de 250 nm a 2500nm. Se observa que el efecto de la incertidumbre de  $I$  es más crítico en el UV, que en el VIS o IR.

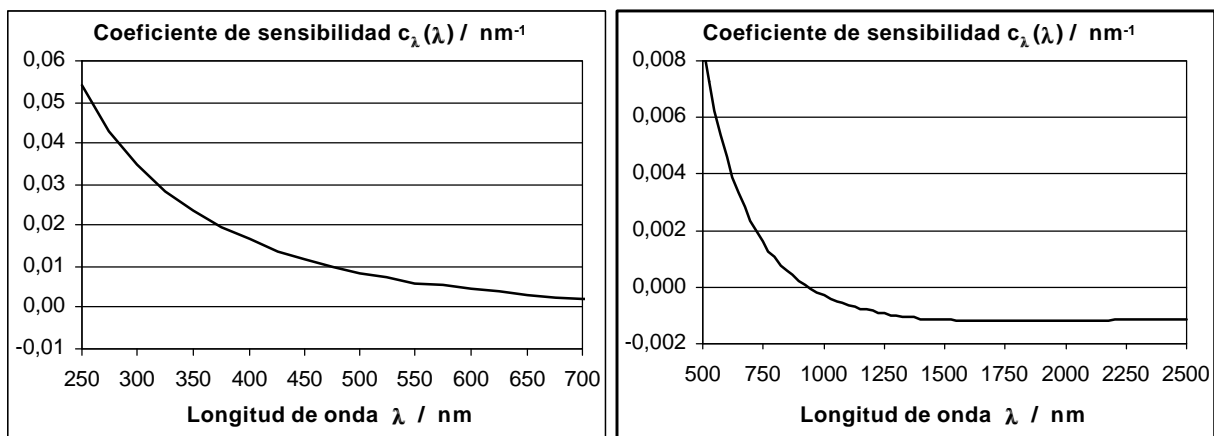


Fig. 8: Coeficiente de sensibilidad de  $F_I$  con respecto a  $\lambda$ .

Finalmente resulta para la incertidumbre  $u(F_I)$  debido a variaciones de longitud de onda lo siguiente:

Intervalo	$\lambda$	Incertidumbre original	Incertidumbre estándar	$c_I$	$u(F_I)$
A, B	250 nm – 399 nm	$\pm 0,1$ nm	0,058 nm	$< 5,5$ %/nm	$< 0,32$ %
C	400 nm – 499 nm	$\pm 0,1$ nm	0,058 nm	$< 1,6$ %/nm	$< 0,09$ %
D	500 nm – 799 nm	$\pm 0,1$ nm	0,058 nm	$< 0,8$ %/nm	$< 0,05$ %
E	800 nm – 999 nm	$\pm 0,1$ nm	0,058 nm	$< 0,1$ %/nm	$< 0,006$ %
F, G	1000 nm – 2500 nm	$\pm 0,4$ nm	0,23 nm	$< 0,13$ %/nm	$< 0,03$ %

Tab 5: Incertidumbre estándar debido a variaciones de la longitud de onda.

**h) Resolución del monocromador, función del monocromador:**

Esta contribución es pequeña, por lo cual no se considera.

**i) Resolución del espectrorradiómetro:**

La incertidumbre por resolución depende del detector con el que se mide. Como un límite superior para la incertidumbre estándar relativa resulta:

$$u(\text{resolución}) \ll 10^{-6}$$

**j) Repetibilidad de las mediciones:**

La incertidumbre por repetibilidad depende en primera instancia del detector utilizado y del valor absoluto de la irradiancia en el intervalo respectivo. Es importante evitar en todo lo posible la dispersión de las mediciones causada por efectos que ya se consideran explícitamente en la estimación de la incertidumbre, como variaciones de la distancia o de la alineación de las lámparas.

La tabla 6 muestra valores típicos para la desviación estándar de los valores individuales  $s(E)$  :

$$s(E) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (\bar{E}(I) - E_i(I))^2}$$

y para la incertidumbre estándar que se obtiene a partir de  $s(E)$  para  $n=4$  y  $n=10$  mediciones repetidas.

Intervalo	A	B	C	D	E	F	G
$s(E)$	3,1 %	1,8 %	0,4 %	0,25 %	0,3 %	0,4 %	1,2 %
$u_{rep,4} = s(E)/\sqrt{4}$	1,6 %	0,9 %	0,2 %	0,13 %	0,15 %	0,2 %	0,6 %
$u_{rep,12} = s(E)/\sqrt{10}$	1,0 %	0,57 %	0,13 %	0,08 %	0,09 %	0,12 %	0,38 %

Tabla 6: Valores típicos para la desviación estándar  $s(E)$  de mediciones repetidas y la incertidumbre estándar en el caso de 4 y 10 mediciones repetidas.

Cabe mencionar que la tabla 6 presenta nada más valores típicos y que se determina explícitamente la incertidumbre por repetibilidad en cada medición con los datos medidos.

**4. Combinación**

Las tablas del anexo A presentan los cálculos para la calibración de un patrón de trabajo, utilizando como patrón de referencia una lámpara estabilizada por detectores (OMTEC) con trazabilidad al PTB (ver tabla 2, patrón (1)).

En el cálculo con incertidumbres relativas, los coeficientes de sensibilidad están dados por los exponentes de cada magnitud de entrada en la Ec. (14) que define el mensurando.

Correlaciones entre fuentes de incertidumbre existen de tal manera, que la variabilidad de algunas magnitudes de entrada (variaciones de la corriente  $I$ , reproducibilidad de la longitud de onda  $\lambda$  en diferentes barridos) contribuyen (aunque no exclusivamente) a la dispersión de las mediciones, la cual está considerada mediante la repetibilidad de las mediciones. Debido a la dificultad de cuantificar estas correlaciones, no se consideran en la combinación de las incertidumbres.

No corregir estas correlaciones resulta en una sobreestimación de la incertidumbre combinada (y con ello en una estimación conservadora), puesto que las variaciones aleatorias se consideran dos veces, una vez mediante la causa original (variaciones de  $I$  y de  $\lambda$ ), y otra vez mediante su efecto en la dispersión de las mediciones.



## 5. Grados de libertad

Los grados de libertad que corresponden a cada una de las fuentes de incertidumbre se presentan en las tablas del anexo A. En el caso de fuentes que se estiman con un método tipo B, estos números reflejan la seguridad ó “incertidumbre” de esta cuantificación (ver p. ej. [1] Cap. 10.3).

Cabe mencionar que la estimación de la incertidumbre debido a la luz extraviada es ciertamente difícil (y con esto insegura), por lo cual se le asigna un número pequeño de grados de libertad.

Para el ejemplo presentado en anexo A resultan números efectivos de grados de libertad grandes (mayor de 80) en todo el intervalo espectral.

## 6. Incertidumbre expandida, informe del resultado

Los valores de incertidumbre expandida que se presentan en tabla (7) corresponden a un nivel de confianza de 95 %. Se obtienen multiplicando los valores de incertidumbre combinada con un factor de cobertura  $k = 2$ , puesto que los números efectivos de grados de libertad son grandes ( $\nu_i > 80$ ).

Intervalo	A	B	C	D	E	F	G
Incertidumbre expandida $U_c$	11,8 % / 7,2 %	3,9 %	2,2 %	2,2 %	3,3 %	3,7 %	6,1 %
$U_c / U_p$	1,07 / 1,20	1,30	1,38	1,38	1,10	1,23	1,22

Tabla 7: Valores de incertidumbre expandida  $U_c$  ( $k=2$ ) para una lámpara tipo FEL calibrada por comparación con una lámpara estabilizada por detectores (tabla 2, patrón 1). El valor de 11,7 % en el intervalo A corresponde a  $I = 250\text{nm}$ . La segunda fila indica el crecimiento con respecto a la incertidumbre del patrón de referencia  $U_p$ .

## 7. Discusión de los resultados

La contribución dominante a la incertidumbre combinada en todo el intervalo espectral es la incertidumbre del patrón. Debido a que la incertidumbre del patrón ya está muy cercana a valores requeridos para las aplicaciones, la meta debe ser que en el proceso de la calibración no aumente mucho esta incertidumbre.

Una contribución importante, especialmente en el intervalo del UV y en el IR puede ser la incertidumbre por repetibilidad en el caso de pocas (p. ej. 4) repeticiones. Cabe mencionar que el envejecimiento de lámparas está directamente relacionado con el tiempo de encendido, por lo cual, no es recomendable aumentar innecesariamente el número de mediciones y con esto el tiempo de operación de la lámpara. Por esto hay que encontrar un compromiso con un número pequeño de repeticiones que alcance valores de incertidumbre aceptables.

## 8. Referencias

- [1] Schmid W., Lazos R.: “Guía para estimar la incertidumbre de la medición” , Publicación Técnica CNM-INC-PT-001, CENAM, Querétaro, Mayo de 2000.
- [2] “Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement”, ISO, 1995.
- [3] “The Spectroradiometric Measurement of Light Sources”, Comisión Internacional de Iluminación CIE, Publicación N° 63, 1984
- [4] James H. Walker et al: “NBS Measurement Service: Spectral Irradiance Calibrations”, National Bureau of Standards, 1987
- [5] CIPM Key Comparison K1-a: “Spectral Irradiance 250 to 2500 nm – Technical Protocol”, 1999
- [6] Walter G. Driscoll, William Vaughan: “Handbook of Optics”, 1978

**Autores:** Wolfgang Alfons Schmid, Coordinador Científico de la División de Óptica y Radiometría, CENAM, [wschmid@cenam.mx](mailto:wschmid@cenam.mx), Tel (52) 4 2 11 05 54; Fax (52) 4 2 11 05 53

Verónica Karina Carrillo García, Responsable del Laboratorio de Espectroradiometría I, División de Óptica y Radiometría, CENAM, [vcarrill@cenam.mx](mailto:vcarrill@cenam.mx), Tel (52) 4 2 11 05 00 ext. 3337, Fax (52) 4 2 11 05 53

### Anexo A-a: Tabla de presupuesto de incertidumbre en el intervalo espectral A (250 nm / 260 nm)

Nº	Magnitud de entrada $X_i$ Fuente de incertidumbre	Valor estimado $x_i$	Fuente de información	Incertidumbre original absoluta	Incertidumbre original relativa	Tipo, Distribución	Incertidumbre estándar $u(x_i)$	Coefficiente sensibilidad $c_i$	Contribu ción $u_i(y)$	Grados de libertad $n$
1	Lámpara patrón $E_p$	---	Certificado	---	11,0 / 6,0 %	B, norm. k=2	5,5 / 3,0 %	1	5,5 / 3,0 %	$\infty$
2	Señal patrón $S_p$	---	---	---	---	---	1,0 %	1	1,0 %	---
2a	Repetibilidad	---	Med. repetidas	---	1,0 %	A, normal	1,0 %	---	1,0 %	9
2b	Resolución	---	Escala	---	---	B, rect.	< 0,0001 %	---	0,0001 %	$\infty$
3	Señal lámp. a calibrar $S_c$	---	---	---	---	---	1,0 %	1	1,0 %	---
3a	Repetibilidad	---	Med. repetidas	---	1,0 %	A, normal	1,0 %	---	1,0 %	9
3b	Resolución	---	Escala	---	---	B, rect.	< 0,0001 %	---	0,0001 %	$\infty$
4	Luz extraviada patrón $F_{LE,p}$	0,995	Medición	---	0,8 %	B, norm. k=1	0,8 %	1	0,80 %	2
5	Luz extraviada l. cal. $F_{LE,c}$	0,991	Medición	---	0,8 %	B, norm. k=1	0,8 %	1	0,80 %	2
6	Distancia patrón $d_p$	700 mm	Medición	$\pm 1$ mm	0,3 %	B, rect.	0,08 %	2	0,16 %	50
7	Distancia lamp. cal. $d_c$	500 mm	Medición	$\pm 2$ mm	0,8 %	B, rect.	0,23 %	2	0,46 %	50
8	Alineación patrón $F_{alin,p}$	1	Pruebas	---	$\pm 0,5$ %	B, rect.	0,29 %	1	0,29 %	50
9	Alineación lamp. cal. $F_{alin,c}$	1	Pruebas	---	$\pm 0,5$ %	B, rect.	0,29 %	1	0,29 %	50
10	Corriente patrón. $I_p$	8,300 A	Especif. tec.	---	$\pm 0,01$ %	B, rect.	0,006 %	2	0,012 %	100
11	Corriente lámp. cal. $I_c$	8,200 A	---	---	---	---	0,007 %	2	0,014 %	100
11a	Incert. de medición	---	Instrumentos	---	0,0038 %	B, norm. k=1	0,0038 %	---	0,0038 %	$\infty$
11b	Variaciones	---	Pruebas	---	$\pm 0,01$ %	B, rect.	0,0058 %	---	0,0058 %	$\infty$
12	Longitud de onda, patrón $F_{I,p}$	1	Pruebas	---	$\pm 0,32$ %	B, norm. k=1	$\pm 0,32$ %	1	0,32 %	50
13	Longitud de onda, l. cal. $F_{I,c}$	1	Pruebas	---	$\pm 0,32$ %	B, norm. k=1	$\pm 0,32$ %	1	0,32 %	50
	<b>Incertidumbre estándar combinada de <math>E_c</math></b>		---	---	---	---	---	---	<b>5,9 / 3,6 %</b>	<b>1841 / 262</b>

## Anexo A-b: Tabla de presupuesto de incertidumbre en el intervalo espectral B (270 nm – 399 nm)

Nº	Magnitud de entrada $X_i$ Fuente de incertidumbre	Valor estimado $x_i$	Fuente de información	Incertidumbre original absoluta	Incertidumbre original relativa	Tipo, Distribución	Incertidumbre estándar $u(x_i)$	Coefficiente sensibilidad $c_i$	Contribu ción $u_i(y)$	Grados de libertad <b>n</b>
1	Lámpara patrón $E_p$	---	Certificado	---	3,0 %	B, norm. k=2	1,5 %	1	1,5 %	$\infty$
2	Señal patrón $S_p$	---	---	---	---	---	0,57 %	1	0,57 %	---
2a	Repetibilidad	---	Med. repetidas	---	0,57 %	A, normal	0,57 %	---	0,57 %	9
2b	Resolución	---	Escala	---	---	B, rect.	< 0,0001 %	---	0,0001 %	$\infty$
3	Señal lámp. a calibrar $S_c$	---	---	---	---	---	0,57 %	1	0,57 %	---
3a	Repetibilidad	---	Med. repetidas	---	0,57 %	A, normal	0,57 %	---	0,57 %	9
3b	Resolución	---	Escala	---	---	B, rect.	< 0,0001 %	---	0,0001 %	$\infty$
4	Luz extraviada patrón $F_{LE,p}$	0,997	Medición	---	0,4 %	B, norm. k=1	0,4 %	1	0,40 %	2
5	Luz extraviada l. cal. $F_{LE,c}$	0,994	Medición	---	0,4 %	B, norm. k=1	0,4 %	1	0,40 %	2
6	Distancia patrón $d_p$	700 mm	Medición	$\pm 1$ mm	0,3 %	B, rect.	0,08 %	2	0,16 %	50
7	Distancia lamp. cal. $d_c$	500 mm	Medición	$\pm 2$ mm	0,8 %	B, rect.	0,23 %	2	0,46 %	50
8	Alineación patrón $F_{alin,p}$	1	Pruebas	---	$\pm 0,5$ %	B, rect.	0,29 %	1	0,29 %	50
9	Alineación lamp. cal. $F_{alin,c}$	1	Pruebas	---	$\pm 0,5$ %	B, rect.	0,29 %	1	0,29 %	50
10	Corriente patrón. $I_p$	8,300 A	Especif. tec.	---	$\pm 0,01$ %	B, rect.	0,006 %	2	0,012 %	100
11	Corriente lámp. cal. $I_c$	8,200 A	---	---	---	---	0,007 %	2	0,014 %	100
11a	Incert. de medición	---	Instrumentos	---	0,0038 %	B, norm. k=1	0,0038 %	---	0,0038 %	$\infty$
11b	Variaciones	---	Pruebas	---	$\pm 0,01$ %	B, rect.	0,0058 %	---	0,0058 %	$\infty$
12	Longitud de onda, patrón $F_{I,p}$	1	Pruebas	---	$\pm 0,32$ %	B, norm. k=1	$\pm 0,32$ %	1	0,32 %	50
13	Longitud de onda, l. cal. $F_{I,c}$	1	Pruebas	---	$\pm 0,32$ %	B, norm. k=1	$\pm 0,32$ %	1	0,32 %	50
	<b>Incertidumbre estándar combinada de <math>E_c</math></b>		---	---	---	---	---	---	<b>1,96 %</b>	<b>292</b>

### Anexo A-c: Tabla de presupuesto de incertidumbre en el intervalo espectral C (400 nm – 599 nm)

Nº	Magnitud de entrada $X_i$ Fuente de incertidumbre	Valor estimado $x_i$	Fuente de información	Incertidumbre original absoluta	Incertidumbre original relativa	Tipo, Distribución	Incertidumbre estándar $u(x_i)$	Coefficiente sensibilidad $c_i$	Contribu ción $u_i(y)$	Grados de libertad $n$
1	Lámpara patrón $E_p$	---	Certificado	---	1,6 %	B, norm. k=2	0,8 %	1	<b>0,8 %</b>	$\infty$
2	Señal patrón $S_p$	---	---	---	---	---	0,20 %	1	<b>0,20 %</b>	---
2a	Repetibilidad	---	Med. repetidas	---	0,20 %	A, normal	0,20 %	---	0,20 %	3
2b	Resolución	---	Escala	---	---	B, rect.	< 0,0001 %	---	0,0001 %	$\infty$
3	Señal lámp. a calibrar $S_c$	---	---	---	---	---	0,20 %	1	<b>0,20 %</b>	---
3a	Repetibilidad	---	Med. repetidas	---	0,20 %	A, normal	0,20 %	---	0,20 %	3
3b	Resolución	---	Escala	---	---	B, rect.	< 0,0001 %	---	0,0001 %	$\infty$
4	Luz extraviada patrón $F_{LE,p}$	0,996	Medición	---	0,2 %	B, norm. k=1	0,20 %	1	<b>0,20 %</b>	2
5	Luz extraviada l. cal. $F_{LE,c}$	0,993	Medición	---	0,2 %	B, norm. k=1	0,20 %	1	<b>0,20 %</b>	2
6	Distancia patrón $d_p$	700 mm	Medición	$\pm 1$ mm	0,3 %	B, rect.	0,08 %	2	<b>0,16 %</b>	50
7	Distancia lamp. cal. $d_c$	500 mm	Medición	$\pm 2$ mm	0,8 %	B, rect.	0,23 %	2	<b>0,46 %</b>	50
8	Alineación patrón $F_{alin,p}$	1	Pruebas	---	$\pm 0,5$ %	B, rect.	0,29 %	1	<b>0,29 %</b>	50
9	Alineación lamp. cal. $F_{alin,c}$	1	Pruebas	---	$\pm 0,5$ %	B, rect.	0,29 %	1	<b>0,29 %</b>	50
10	Corriente patrón. $I_p$	8,300 A	Especif. tec.	---	$\pm 0,01$ %	B, rect.	0,006 %	2	<b>0,012 %</b>	100
11	Corriente lámp. cal. $I_c$	8,200 A	---	---	---	---	0,007 %	2	<b>0,014 %</b>	100
11a	Incert. de medición	---	Instrumentos	---	0,0038 %	B, norm. k=1	0,0038 %	---	0,0038 %	$\infty$
11b	Variaciones	---	Pruebas	---	$\pm 0,01$ %	B, rect.	0,0058 %	---	0,0058 %	$\infty$
12	Longitud de onda, patrón $F_{I,p}$	1	Pruebas	---	$\pm 0,09$ %	B, norm. k=1	0,09 %	1	<b>0,09 %</b>	50
13	Longitud de onda, l. cal. $F_{I,c}$	1	Pruebas	---	$\pm 0,09$ %	B, norm. k=1	0,09 %	1	<b>0,09 %</b>	50
	<b>Incertidumbre estándar combinada de <math>E_c</math></b>		---	---	---	---	---	---	<b>1,11 %</b>	<b>387</b>

### Anexo A-d: Tabla de presupuesto de incertidumbre en el intervalo espectral D (500 nm – 799 nm)

Nº	Magnitud de entrada $X_i$ Fuente de incertidumbre	Valor estimado $x_i$	Fuente de información	Incertidumbre original absoluta	Incertidumbre original relativa	Tipo, Distribución	Incertidumbre estándar $u(x_i)$	Coefficiente sensibilidad $c_i$	Contribu ción $u_i(y)$	Grados de libertad <b>n</b>
1	Lámpara patrón $E_p$	---	Certificado	---	1,6 %	B, norm. k=2	0,8 %	1	<b>0,8 %</b>	$\infty$
2	Señal patrón $S_p$	---	---	---	---	---	0,13 %	1	<b>0,13 %</b>	---
2a	Repetibilidad	---	Med. repetidas	---	0,13 %	A, normal	0,13 %	---	0,13 %	3
2b	Resolución	---	Escala	---	---	B, rect.	< 0,0001 %	---	0,0001 %	$\infty$
3	Señal lámp. a calibrar $S_c$	---	---	---	---	---	0,13 %	1	<b>0,13 %</b>	---
3a	Repetibilidad	---	Med. repetidas	---	0,13 %	A, normal	0,13 %	---	0,13 %	3
3b	Resolución	---	Escala	---	---	B, rect.	< 0,0001 %	---	0,0001 %	$\infty$
4	Luz extraviada patrón $F_{LE,p}$	0,996	Medición	---	0,2 %	B, norm. k=1	0,20 %	1	<b>0,20 %</b>	2
5	Luz extraviada l. cal. $F_{LE,c}$	0,993	Medición	---	0,2 %	B, norm. k=1	0,20 %	1	<b>0,20 %</b>	2
6	Distancia patrón $d_p$	700 mm	Medición	$\pm 1$ mm	0,3 %	B, rect.	0,08 %	2	<b>0,16 %</b>	50
7	Distancia lamp. cal. $d_c$	500 mm	Medición	$\pm 2$ mm	0,8 %	B, rect.	0,23 %	2	<b>0,46 %</b>	50
8	Alineación patrón $F_{alin,p}$	1	Pruebas	---	$\pm 0,5$ %	B, rect.	0,29 %	1	<b>0,29 %</b>	50
9	Alineación lamp. cal. $F_{alin,c}$	1	Pruebas	---	$\pm 0,5$ %	B, rect.	0,29 %	1	<b>0,29 %</b>	50
10	Corriente patrón. $I_p$	8,300 A	Especif. tec.	---	$\pm 0,01$ %	B, rect.	0,006 %	2	<b>0,012 %</b>	100
11	Corriente lámp. cal. $I_c$	8,200 A	---	---	---	---	0,007 %	2	<b>0,014 %</b>	100
11a	Incert. de medición	---	Instrumentos	---	0,0038 %	B, norm. k=1	0,0038 %	---	0,0038 %	$\infty$
11b	Variaciones	---	Pruebas	---	$\pm 0,01$ %	B, rect.	0,0058 %	---	0,0058 %	$\infty$
12	Longitud de onda, patrón $F_{I,p}$	1	Pruebas	---	$\pm 0,05$ %	B, norm. k=1	0,05 %	1	<b>0,05 %</b>	50
13	Longitud de onda, l. cal. $F_{I,c}$	1	Pruebas	---	$\pm 0,05$ %	B, norm. k=1	0,05 %	1	<b>0,05 %</b>	50
	<b>Incertidumbre estándar combinada de <math>E_c</math></b>		---	---	---	---	---	---	<b>1,08 %</b>	<b>454</b>

### Anexo A-e: Tabla de presupuesto de incertidumbre en el intervalo espectral E (800 nm – 999 nm)

Nº	Magnitud de entrada $X_i$ Fuente de incertidumbre	Valor estimado $x_i$	Fuente de información	Incertidumbre original absoluta	Incertidumbre original relativa	Tipo, Distribución	Incertidumbre estándar $u(x_i)$	Coefficiente sensibilidad $c_i$	Contribu ción $u_i(y)$	Grados de libertad $n$
1	Lámpara patrón $E_p$	---	Certificado	---	3,0 %	B, norm. k=2	1,5 %	1	1,5 %	$\infty$
2	Señal patrón $S_p$	---	---	---	---	---	0,15 %	1	0,15 %	---
2a	Repetibilidad	---	Med. repetidas	---	0,15 %	A, normal	0,15 %	---	0,15 %	3
2b	Resolución	---	Escala	---	---	B, rect.	< 0,0001 %	---	0,0001 %	$\infty$
3	Señal lámp. a calibrar $S_c$	---	---	---	---	---	0,15 %	1	0,15 %	---
3a	Repetibilidad	---	Med. repetidas	---	0,15 %	A, normal	0,15 %	---	0,15 %	3
3b	Resolución	---	Escala	---	---	B, rect.	< 0,0001 %	---	0,0001 %	$\infty$
4	Luz extraviada patrón $F_{LE,p}$	0,995	Medición	---	0,2 %	B, norm. k=1	0,20 %	1	0,20 %	2
5	Luz extraviada l. cal. $F_{LE,c}$	0,991	Medición	---	0,2 %	B, norm. k=1	0,20 %	1	0,20 %	2
6	Distancia patrón $d_p$	700 mm	Medición	$\pm 1$ mm	0,3 %	B, rect.	0,08 %	2	0,16 %	50
7	Distancia lamp. cal. $d_c$	500 mm	Medición	$\pm 2$ mm	0,8 %	B, rect.	0,23 %	2	0,46 %	50
8	Alineación patrón $F_{alin,p}$	1	Pruebas	---	$\pm 0,5$ %	B, rect.	0,29 %	1	0,29 %	50
9	Alineación lamp. cal. $F_{alin,c}$	1	Pruebas	---	$\pm 0,5$ %	B, rect.	0,29 %	1	0,29 %	50
10	Corriente patrón. $I_p$	8,300 A	Especif. tec.	---	$\pm 0,01$ %	B, rect.	0,006 %	2	0,012 %	100
11	Corriente lámp. cal. $I_c$	8,200 A	---	---	---	---	0,007 %	2	0,014 %	100
11a	Incert. de medición	---	Instrumentos	---	0,0038 %	B, norm. k=1	0,0038 %	---	0,0038 %	$\infty$
11b	Variaciones	---	Pruebas	---	$\pm 0,01$ %	B, rect.	0,0058 %	---	0,0058 %	$\infty$
12	Longitud de onda, patrón $F_{I,p}$	1	Pruebas	---	$\pm 0,006$ %	B, norm. k=1	0,006 %	1	0,006 %	50
13	Longitud de onda, l. cal. $F_{I,c}$	1	Pruebas	---	$\pm 0,006$ %	B, norm. k=1	0,006 %	1	0,006 %	50
	<b>Incertidumbre estándar combinada de <math>E_c</math></b>		---	---	---	---	---	---	<b>1,67 %</b>	<b>2465</b>

### Anexo A-f: Tabla de presupuesto de incertidumbre en el intervalo espectral F (1000 nm – 1999 nm)

Nº	Magnitud de entrada $X_i$ Fuente de incertidumbre	Valor estimado $x_i$	Fuente de información	Incertidumbre original absoluta	Incertidumbre original relativa	Tipo, Distribución	Incertidumbre estándar $u(x_i)$	Coefficiente sensibilidad $c_i$	Contribu ción $u_i(y)$	Grados de libertad <b>n</b>
1	Lámpara patrón $E_p$	---	Certificado	---	3,0 %	B, norm. k=2	1,5 %	1	1,5 %	$\infty$
2	Señal patrón $S_p$	---	---	---	---	---	0,20 %	1	0,20 %	---
2a	Repetibilidad	---	Med. repetidas	---	0,20 %	A, normal	0,20 %	---	0,20 %	3
2b	Resolución	---	Escala	---	---	B, rect.	< 0,0001 %	---	0,0001 %	$\infty$
3	Señal lámp. a calibrar $S_c$	---	---	---	---	---	0,20 %	1	0,20 %	---
3a	Repetibilidad	---	Med. repetidas	---	0,20 %	A, normal	0,20 %	---	0,20 %	3
3b	Resolución	---	Escala	---	---	B, rect.	< 0,0001 %	---	0,0001 %	$\infty$
4	Luz extraviada patrón $F_{LE,p}$	0,994	Medición	---	0,6 %	B, norm. k=1	0,60 %	1	0,60 %	2
5	Luz extraviada l. cal. $F_{LE,c}$	0,990	Medición	---	0,6 %	B, norm. k=1	0,60 %	1	0,60 %	2
6	Distancia patrón $d_p$	700 mm	Medición	$\pm 1$ mm	0,3 %	B, rect.	0,08 %	2	0,16 %	50
7	Distancia lamp. cal. $d_c$	500 mm	Medición	$\pm 2$ mm	0,8 %	B, rect.	0,23 %	2	0,46 %	50
8	Alineación patrón $F_{alin,p}$	1	Pruebas	---	$\pm 0,5$ %	B, rect.	0,29 %	1	0,29 %	50
9	Alineación lamp. cal. $F_{alin,c}$	1	Pruebas	---	$\pm 0,5$ %	B, rect.	0,29 %	1	0,29 %	50
10	Corriente patrón. $I_p$	8,300 A	Especif. tec.	---	$\pm 0,01$ %	B, rect.	0,006 %	2	0,012 %	100
11	Corriente lámp. cal. $I_c$	8,200 A	---	---	---	---	0,007 %	2	0,014 %	100
11a	Incert. de medición	---	Instrumentos	---	0,0038 %	B, norm. k=1	0,0038 %	---	0,0038 %	$\infty$
11b	Variaciones	---	Pruebas	---	$\pm 0,01$ %	B, rect.	0,0058 %	---	0,0058 %	$\infty$
12	Longitud de onda, patrón $F_{I,p}$	1	Pruebas	---	$\pm 0,03$ %	B, norm. k=1	0,03 %	1	0,03 %	50
13	Longitud de onda, l. cal. $F_{I,c}$	1	Pruebas	---	$\pm 0,03$ %	B, norm. k=1	0,03 %	1	0,03 %	50
	<b>Incertidumbre estándar combinada de <math>E_c</math></b>		---	---	---	---	---	---	<b>1,86 %</b>	<b>90</b>



## Anexo A-g: Tabla de presupuesto de incertidumbre en el intervalo espectral G (2000 nm – 2500 nm)

Nº	Magnitud de entrada $X_i$ Fuente de incertidumbre	Valor estimado $x_i$	Fuente de información	Incertidumbre original absoluta	Incertidumbre original relativa	Tipo, Distribución	Incertidumbre estándar $u(x_i)$	Coefficiente sensibilidad $c_i$	Contribu ción $u_i(y)$	Grados de libertad <b>n</b>
1	Lámpara patrón $E_p$	---	Certificado	---	5,0 %	B, norm. k=2	2,5 %	1	2,5 %	$\infty$
2	Señal patrón $S_p$	---	---	---	---	---	0,60 %	1	0,60 %	---
2a	Repetibilidad	---	Med. repetidas	---	0,60 %	A, normal	0,60 %	---	0,60 %	3
2b	Resolución	---	Escala	---	---	B, rect.	< 0,0001 %	---	0,0001 %	$\infty$
3	Señal lámp. a calibrar $S_c$	---	---	---	---	---	0,60 %	1	0,60 %	---
3a	Repetibilidad	---	Med. repetidas	---	0,60 %	A, normal	0,60 %	---	0,60 %	3
3b	Resolución	---	Escala	---	---	B, rect.	< 0,0001 %	---	0,0001 %	$\infty$
4	Luz extraviada patrón $F_{LE,p}$	0,991	Medición	---	1,0 %	B, norm. k=1	1,0 %	1	1,0 %	2
5	Luz extraviada l. cal. $F_{LE,c}$	0,988	Medición	---	1,0 %	B, norm. k=1	1,0 %	1	1,0 %	2
6	Distancia patrón $d_p$	700 mm	Medición	$\pm 1$ mm	0,3 %	B, rect.	0,08 %	2	0,16 %	50
7	Distancia lamp. cal. $d_c$	500 mm	Medición	$\pm 2$ mm	0,8 %	B, rect.	0,23 %	2	0,46 %	50
8	Alineación patrón $F_{alin,p}$	1	Pruebas	---	$\pm 0,5$ %	B, rect.	0,29 %	1	0,29 %	50
9	Alineación lamp. cal. $F_{alin,c}$	1	Pruebas	---	$\pm 0,5$ %	B, rect.	0,29 %	1	0,29 %	50
10	Corriente patrón. $I_p$	8,300 A	Especif. tec.	---	$\pm 0,01$ %	B, rect.	0,006 %	2	0,012 %	100
11	Corriente lámp. cal. $I_c$	8,200 A	---	---	---	---	0,007 %	2	0,014 %	100
11a	Incert. de medición	---	Instrumentos	---	0,0038 %	B, norm. k=1	0,0038 %	---	0,0038 %	$\infty$
11b	Variaciones	---	Pruebas	---	$\pm 0,01$ %	B, rect.	0,0058 %	---	0,0058 %	$\infty$
12	Longitud de onda, patrón $F_{I,p}$	1	Pruebas	---	$\pm 0,03$ %	B, norm. k=1	0,03 %	1	0,03 %	50
13	Longitud de onda, l. cal. $F_{I,c}$	1	Pruebas	---	$\pm 0,03$ %	B, norm. k=1	0,03 %	1	0,03 %	50
	<b>Incertidumbre estándar combinada de <math>E_c</math></b>		---	---	---	---	---	---	<b>3,06 %</b>	<b>80</b>

**1) Magnitudes:**

$E_I(I), E(I)$	Irradiancia espectral
$E_e$	Irradiancia espectral, valor actual (real) en la entrada del espectrorradiómetro
$I$	Longitud de onda
$F$	Flujo radiante, potencia óptica
$A$	Área
$F$	Factor de corrección
$S$	Señal de salida del espectrorradiómetro
$T_{ER}$	Coefficiente del espectrorradiómetro, que comprende las pérdidas y la responsividad de los detectores
$T$	Temperatura
$I$	Corriente eléctrica
$U$	Tensión eléctrica
$R$	Resistencia eléctrica
$d$	Distancia a la lámpara
$x, y, z$	Coordenadas cartesianas de la lámpara
$j, q$	Coordenadas angulares de la lámpara
$s$	Desviación estándar
$u$	Incertidumbre
$u_c$	Incertidumbre combinada
$U$	Incertidumbre expandida
$c_j$	Coefficiente de sensibilidad con respecto a la magnitud de influencia $j$
$k$	Factor de cobertura

**2) Índices**

$X_p$	lámpara patrón
$X_c$	lámpara a calibrar
$X_0$	valor nominal
$X_{dist}$	efectos por distancia a la lámpara
$X_{alin}$	efectos por alineación de la lámpara
$X_{LE}$	efectos por luz extraviada
$X_I$	efectos por error de la escala de longitud de onda del monocromador