

SIMULACIÓN DE LA INCERTIDUMBRE DE MEDICIÓN EN LA CALIBRACIÓN DE MEDIDORES DE IRRADIANCIA UV MEDIANTE EL MÉTODO MONTE CARLO

N. Vidal-Medina, E. Rosas, C. H. Matamoros-García.
División de Óptica y Radiometría, Centro Nacional de Metrología,
km 4.5 Carretera a Los Cués, 76246, Querétaro, México.
nvidal@cenam.mx

Resumen: Se presentan los resultados obtenidos en la simulación de la incertidumbre de medición para la calibración de medidores de irradiancia en el sistema del banco radiométrico, SBR, utilizando los conceptos básicos del método de simulación Monte Carlo recomendado por la Oficina Internacional de Pesas y Medidas, BIPM [1]. La incertidumbre asociada a la simulación es de 1.97 % con un factor de cobertura de $k=2$, se utilizan la media y la desviación estándar de las lecturas con los instrumentos bajo calibración, para simular dos variables con distribución normal de servicios realizados a 365 nm. Estas variables se introducen al procedimiento de estimación de incertidumbre para obtener los resultados.

Palabras Clave: Metrología, Irradiancia UV, Incertidumbre de medición, Simulación, Método Monte Carlo.

1. INTRODUCCIÓN

Debido a que los múltiples usos de la radiación UV en la industria se basan en aplicar la correcta cantidad de energía radiante UV a un compuesto específico para obtener los resultados deseados, es necesario utilizar de manera periódica medidores de radiación UV para garantizar el correcto funcionamiento del sistema. Dichos medidores al cumplir su función, invariablemente también son afectados por la radiación UV lo que resulta en la degradación de los sensores y componentes internos, ocasionando un error de medición de la energía UV que el instrumento es capaz de registrar en un proceso de medición.

Para determinar el error en los medidores de radiación UV y obtener un factor numérico de corrección que ayude a la industria a optimizar el uso de sus sistemas basados en radiación UV, el Centro Nacional de Metrología desarrollo el Patrón Nacional de Dosis de Radiación UV [2] que es mantenido en el Laboratorio de Dosimetría Óptica; y consta de manera general de un sistema de banco radiométrico, SBR, que integra una fuente de radiación UV, un conjunto de radiómetros piroeléctricos como referencias, un juego de filtros de interferencia, componentes ópticas para colimación y enfoque, y un sistema de adquisición de datos, Fig. 1.

Dado que la irradiancia (en un punto de la superficie) es definida como el cociente del flujo radiante incidente en un elemento de la superficie conteniendo el punto, por el área del elemento [3], la radiación proveniente de la lámpara de descarga de Hg(Xe) atraviesa algunos componentes del SBR modificando sus propiedades físicas al paso del tiempo. Esto hace que ciertos componentes específicos (lámpara de descarga de Hg(Xe), filtros de interferencia) presenten desgaste y modifiquen de manera significativa sus valores de contribución a la incertidumbre de medición estimados en ocasiones previas [3].

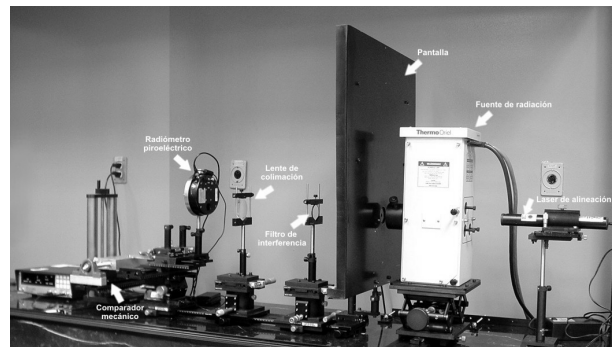


Fig. 1. Sistema de Banco Radiométrico.

Ya que no es posible correlacionar directamente el grado de desgaste de los componentes más sensibles del SBR con la incertidumbre de medición obtenida en los servicios de calibración de

medidores de UV, se utilizan técnicas de simulación para verificar el comportamiento general del sistema de medición. Mediante simulación por el método de Monte Carlo es posible extrapolar los resultados de un servicio de calibración específico, determinar las fuentes de incertidumbre más significativas, modificar sus valores y estimar el comportamiento de la incertidumbre de medición asociada al funcionamiento del SBR.

Mediante esta técnica es posible relacionar el desgaste progresivo de los elementos con la varianza relativa de los datos obtenidos en un proceso de calibración. Cuando la dispersión de los datos sea atípica a los resultados obtenidos con anterioridad será necesario revisar el sistema del SBR y sustituir el elemento que presenta desgaste excesivo. De esta forma es posible determinar los valores aceptables de las fuentes de incertidumbre más significativas para mantener un nivel de incertidumbre en medidores de UV adecuado a las necesidades de la industria.

2. ESTIMACIÓN DE LA INCERTIDUMBRE

La calibración de medidores UV en irradiancia se realiza mediante el método de comparación directa entre las lecturas proporcionadas por el radiómetro bajo calibración y por el radiómetro piroeléctrico de referencia [4, 5]. Ambos instrumentos se exponen a un mismo campo radiante, de manera alternada, de tal modo que las lecturas respectivas en irradiancia se comparan para calcular el error de medición que comete el medidor bajo calibración ε , que constituye el mensurando durante la calibración, mismo que se define por la siguiente relación:

$$\varepsilon = E_R - E_P, \quad [W \cdot cm^{-2}] \quad (1)$$

donde E_R es el valor promedio de las lecturas del radiómetro bajo calibración y E_P corresponde al valor promedio de las lecturas del radiómetro piroeléctrico patrón.

Por otro lado, el radiómetro piroeléctrico patrón obtiene los valores de irradiancia mediante la siguiente relación:

$$E_P = \frac{\Phi_P}{A}, \quad [W \cdot cm^{-2}] \quad (2)$$

donde Φ_P es el flujo radiante incidente y A corresponde al área activa del detector del radiómetro piroeléctrico.

Como puede observarse en la Ec. (1) se tienen dos variables de entrada principales y cada una de ellas presenta diversos factores involucrados en la medición. Las fuentes de incertidumbre más significativas pueden observarse en el diagrama de árbol mostrado en la Fig. 2.

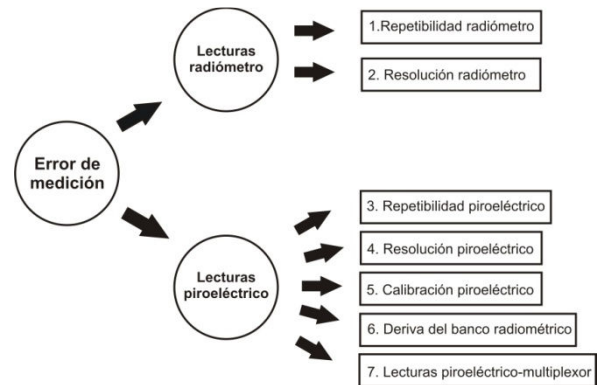


Fig. 2. Fuentes de incertidumbre más significativas para la determinación del error de medición.

Utilizando el modelo de la Ec. (1) se obtienen los coeficientes de sensibilidad que determinan la relación de cambio entre las variables de entrada de E_R y E_P . Dichos coeficientes de sensibilidad se definen mediante:

$$c_{E_R} = \frac{\partial \varepsilon}{\partial E_e} = 1, \quad (3)$$

$$c_{E_P} = \frac{\partial \varepsilon}{\partial E_p} = -1. \quad (4)$$

La estimación de incertidumbre se realiza de acuerdo a las recomendaciones de la *Guide pour l'Expression de l'Incetitude de Mesure* [6]. Las ecuaciones utilizadas para combinar todas las fuentes de incertidumbre en la calibración de medidores UV se resumen en la Tabla 1.

Debido a que la estimación de incertidumbre en la medición de irradiancia UV depende de dos variables de entrada (E_R y E_P), es recomendado utilizar el método de simulación de Monte Carlo, el cual se basa en la aproximación de la propagación de distribuciones. Mediante la asociación de las variables de entrada a una distribución estadística conocida, el uso de un generador de números aleatorios y la aplicación de la metodología de estimación de incertidumbre anteriormente descrita es posible generar una estimación del comportamiento de la incertidumbre en medidores UV en casos específicos.

Tabla 1. Resumen del procedimiento de estimación de incertidumbre en medidores UV.

Componentes de la incertidumbre	Incertidumbre estándar	Tipo	Distribución	Coefficiente de sensibilidad	Contribución
Repetibilidad de las lecturas del piroeléctrico	$u_{rep}(E_p)$	A	Normal, (k=1)	1	$\frac{S_p}{\sqrt{n}}$
Resolución del piroeléctrico	$u_{res}(E_p)$	A	Rectangular	1	$\frac{\Delta a_p}{\sqrt{12}}$
Calibración del piroeléctrico	$u_{cal}(E_p)$	B	Normal, (k=2)	1	$\frac{U_{\text{piroeléctrico}}}{k}$
Estabilidad del SBR	$u_{SBR}(E_p)$	A	Normal, (k=1)	1	$\chi_{\text{piroeléctrico}} * \left(\frac{S_{\text{estabilidad}} * 100}{x_{\text{estabilidad}}} \right)$
Calibración multiplexor	$u_{multi}(E_p)$	B	Normal, (k=2)	1	$\frac{U_{\text{multiplexor}}}{k}$
Repetibilidad de las lecturas del medidor UV	$u_{rep}(E_R)$	A	Normal, (k=1)	-1	$\frac{S_R}{\sqrt{n}}$
Resolución del medidor UV	$u_{res}(E_R)$	A	Rectangular	-1	$\frac{\Delta a_R}{\sqrt{12}}$
Incertidumbre estándar combinada	$u_c(\text{error}) = \sqrt{u_{rep}^2(E_p) + u_{res}^2(E_p) + u_{cal}^2(E_p) + u_{lamp}^2(E_p) + u_{multi}^2(E_p) + u_{rep}^2(E_R) + u_{res}^2(E_R)}$				
Incertidumbre expandida	$U = u_c \cdot k$				

3. SIMULACIÓN MONTE CARLO DE LA INCERTIDUMBRE

El método de simulación Monte Carlo ha proporcionado diversas soluciones aproximadas a una gran variedad de aplicaciones en metrología desde que el *Draft ISO Guide Supplement One* [1] comenzó a circular en 2004, ya que posibilita la realización de experimentos con muestreos de números pseudo-aleatorios generados mediante una computadora, introduciéndolos como variables de entrada en un modelo matemático previamente definido y obteniendo de esa forma resultados cuantitativos del comportamiento general del sistema. Entre mayor sea el número n de experimentos que se lleven a cabo, será más exacto el análisis del sistema simulado mediante el método Monte Carlo.

Para simular la incertidumbre de medidores UV se generan números aleatorios de las lecturas del radiómetro de referencia y del medidor UV. Dichas variables de entrada tienen una distribución normal con media y desviación estándar $E_R \approx N(\mu_1, \sigma_1)$ y $E_p \approx N(\mu_2, \sigma_2)$, similares a los valores obtenidos en una medición. Se utilizan los resultados provenientes de los certificados de calibración del radiómetro

piroeléctrico y del multiplexor, se estima el valor de la estabilidad del banco radiométrico, y los valores resultantes se aplican al procedimiento de estimación de incertidumbre durante 10 000 ciclos, cada uno de los cuales considera el valor promedio y la desviación estándar de diez variables de entrada. Los valores de entrada usados para alimentar el programa de cómputo desarrollado para realizar la simulación, Fig. 3, se listan en la Tabla 2.

Tabla 2. Valores de entrada en la simulación de la incertidumbre de medición en irradiancia UV.

	Parámetro	Valor
E_R	Valor promedio del radiómetro piroeléctrico (μ_1)	9.997 (mW / cm ²)
	Desviación estándar del radiómetro piroeléctrico (σ_1)	0.035 (mW / cm ²)
	Resolución del radiómetro piroeléctrico	0.001 (mW / cm ²)
	Incertidumbre por calibración del radiómetro piroeléctrico	0.18 %
	Incertidumbre por calibración del multiplexor	20 μ W / W
	Incertidumbre por estabilidad del SBR	0.35 %
E_p	Valor promedio del medidor UV (μ_2)	9.747 (mW / cm ²)
	Desviación estándar del medidor UV (σ_2)	0.294 (mW / cm ²)
	Resolución del medidor UV	0.01 (mW / cm ²)

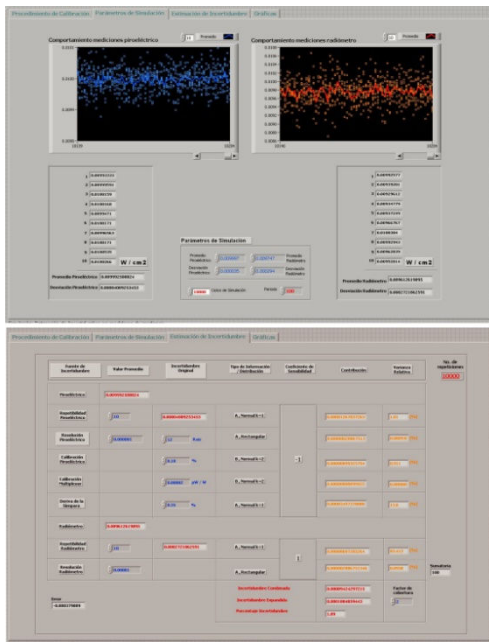


Fig. 3. Interfaz gráfica para la simulación de la incertidumbre de medición en irradiancia UV.

4. RESULTADOS

Los resultados obtenidos del proceso de simulación se agrupan en la Tabla 3. Mediante histogramas se verifica que la distribución estadística de las variables de entrada simuladas se aproximen a una distribución normal con media y desviación estándar conocidas. También se utilizan histogramas para revelar la distribución de los valores del error de medición y su incertidumbre combinada, obtenidos mediante el método Monte Carlo. Estos gráficos se muestran en la Fig. 4.

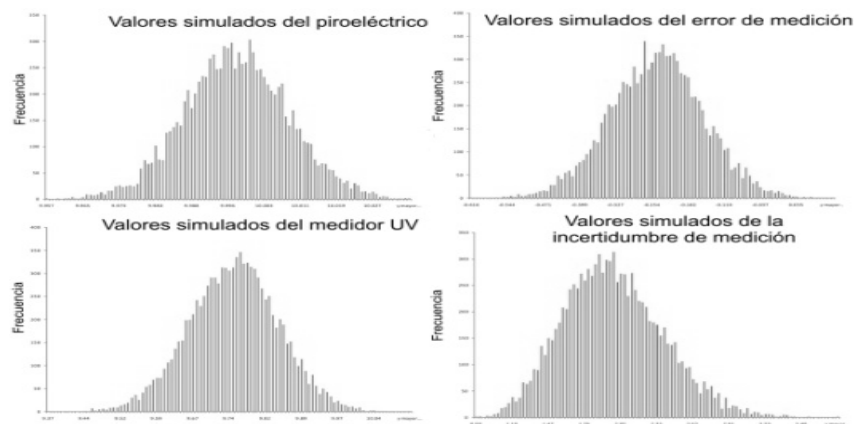


Fig. 4. Histogramas de las variables de entrada (E_R y E_p) y del error de medición y su incertidumbre (ε y u_c).

Tabla 3. Resultados de la simulación de la incertidumbre de medición en irradiancia UV después de 200 000 datos.

Fuente de Incertidumbre	Incertidumbre estándar (mW/cm ²)	Varianza relativa (%)
Repetibilidad Piroeléctrico	0.010 821	1.44
Resolución Piroeléctrico	0.000 289	0.001
Calibración Piroeléctrico	0.008 997	0.94
Calibración Multiplexor	0.001 000	0.01
Estabilidad del SBR	0.034 990	14.29
Repetibilidad Radiómetro	0.090 506	83.22
Resolución Radiómetro	0.002 887	0.10
Incertidumbre Combinada	0.098 506	□ = 100
Incertidumbre Expandida, (k=2)	0.197 011	1.97

De acuerdo a los resultados obtenidos, es posible determinar que las fuentes más significativas en la estimación de incertidumbre para irradiancia UV son la repetibilidad del medidor UV y la estabilidad del banco radiométrico. La incertidumbre expandida obtenida de la simulación, de 1.97 % (k=2) es consistente con las reportadas anteriormente [7]. La incertidumbre por repetibilidad del radiómetro piroeléctrico, cuya contribución es de 1.44 % (k=1), es la siguiente fuente de incertidumbre en orden de importancia.

Las fuentes de incertidumbre que provienen de la calibración de los instrumentos utilizados en la medición y su resolución no presentan valores significativos por lo que eventualmente podrían omitirse del procedimiento de estimación de incertidumbre.

5. DISCUSIÓN

Una vez definidas las fuentes más significativas de incertidumbre, es posible definir sus valores más probables, dividir el intervalo, y de esta forma nuevamente combinar estas dos variables para estimar el comportamiento de la incertidumbre de medición en irradiancia UV utilizando un nuevo proceso de simulación mediante Monte Carlo. Para el caso de la repetibilidad del radiómetro los valores más probables pueden definirse entre el intervalo de 1.0 % y el 6.0 % de dispersión del valor obtenido por el instrumento, de acuerdo a las especificaciones generales que ofrecen los fabricantes de medidores UV. Para la estabilidad del banco radiométrico se consideran valores entre 0.5 % y 2.5 % de dispersión del valor de estabilidad que el detector piroeléctrico puede registrar.

Los intervalos mencionados se dividen y se combinan entre sí para repetir sistemáticamente el mismo proceso de simulación inicial. Las nuevas variables de entrada son $u_{rep}(E_R)$ y $u_{SBR}(E_p)$, nuevamente se utilizan diez valores de cada nueva variable de entrada durante 10 000 ciclos. Los resultados del comportamiento de la incertidumbre de medición proveniente de las simulaciones se muestran en la Tabla 4.

Tabla 4. Resultados de la incertidumbre expandida (U) simulada para la medición en irradiancia UV.

Repetibilidad del radiómetro, (%) $u_{rep}(E_R)$	Estabilidad del SBR, (%) $u_{SBR}(E_p)$				
	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5
1.0	1.19	2.13	3.08	4.06	5.05
2.0	1.60	2.36	3.25	4.20	5.16
3.0	2.09	2.74	3.53	4.41	5.34
4.0	2.63	3.15	3.87	4.70	5.57
5.0	3.17	3.65	4.27	5.05	5.87
6.0	3.76	4.15	4.72	5.41	6.20

Considerando los resultados mostrados, es posible verificar que la incertidumbre expandida se incrementa en relación a los valores extremos de las variables de entrada simuladas. El porcentaje de dispersión de los valores en la estabilidad del banco radiométrico está relacionado con el buen estado físico de la lámpara de descarga de Hg(Xe), el número de horas de uso del filtro de

interferencia, del adecuado mantenimiento del comparador mecánico para posicionar los detectores en el campo radiante y del buen funcionamiento del sistema de adquisición de datos que integra el banco radiométrico. Este porcentaje se modificará y continuará aumentando su valor de acuerdo al número de horas de uso, al número de ciclos de encendido y apagado de la fuente de radiación UV, y en general por el desgaste natural de los elementos por la acción de la radiación UV. Por lo tanto es posible definir el límite de control para la deriva banco radiométrico mediante la siguiente relación:

$$u_{SBR}(D_p) = \chi_{\text{piroelectrico}} * \left(\frac{s_{\text{estabilidad}} * 100}{x_{\text{estabilidad}}} \right) \leq 1.5\% \quad (5)$$

Si la dispersión en el porcentaje de la estabilidad del banco radiométrico es mayor a 1.5 % o existen cambios significativos en los valores obtenidos en una calibración con respecto al historial, debe de considerarse que hay una posible falla o degradación en alguno de los elementos del banco radiométrico, y entonces será necesario encontrar y sustituir dicho elemento, pudiendo ser necesario repetir el proceso de calibración.

Para el caso de la dispersión en los valores por repetibilidad del radiómetro, éstos se relacionan con el adecuado funcionamiento del instrumento, y de esta forma, el límite de control puede definirse mediante las especificaciones que el fabricante declare para cada medidor de UV y depende del número de horas de uso y de la degradación en los elementos sensibles del instrumento.

El incremento de la incertidumbre de medición en irradiancia UV en relación de la estabilidad del banco radiométrico y las características propias de cada medidor UV puede verse en la Fig. 5. Es posible asegurar que la incertidumbre combinada de medición se incrementa de manera progresiva y sistemática respecto al desgaste que presentan los elementos importantes del banco radiométrico al ser utilizado en los procesos de calibración, y al combinarse con la calidad de fabricación del medidor de UV es posible estimar un valor probable de la incertidumbre combinada en la medición de irradiancia UV.

Al estimar el comportamiento de la incertidumbre de medición y relacionarlo al grado de desgaste del banco radiométrico es posible definir límites de

control para elegir los tiempos óptimos de sustitución de los elementos básicos del banco radiométrico. Así mismo es posible verificar que la incertidumbre de medición sigue el comportamiento reportado en publicaciones

anteriores [8] donde se asumía una contribución por la estabilidad de la lámpara de descarga de Hg(Xe) de 2.5 % para obtener 5.9 % de incertidumbre expandida, ($k=2$).

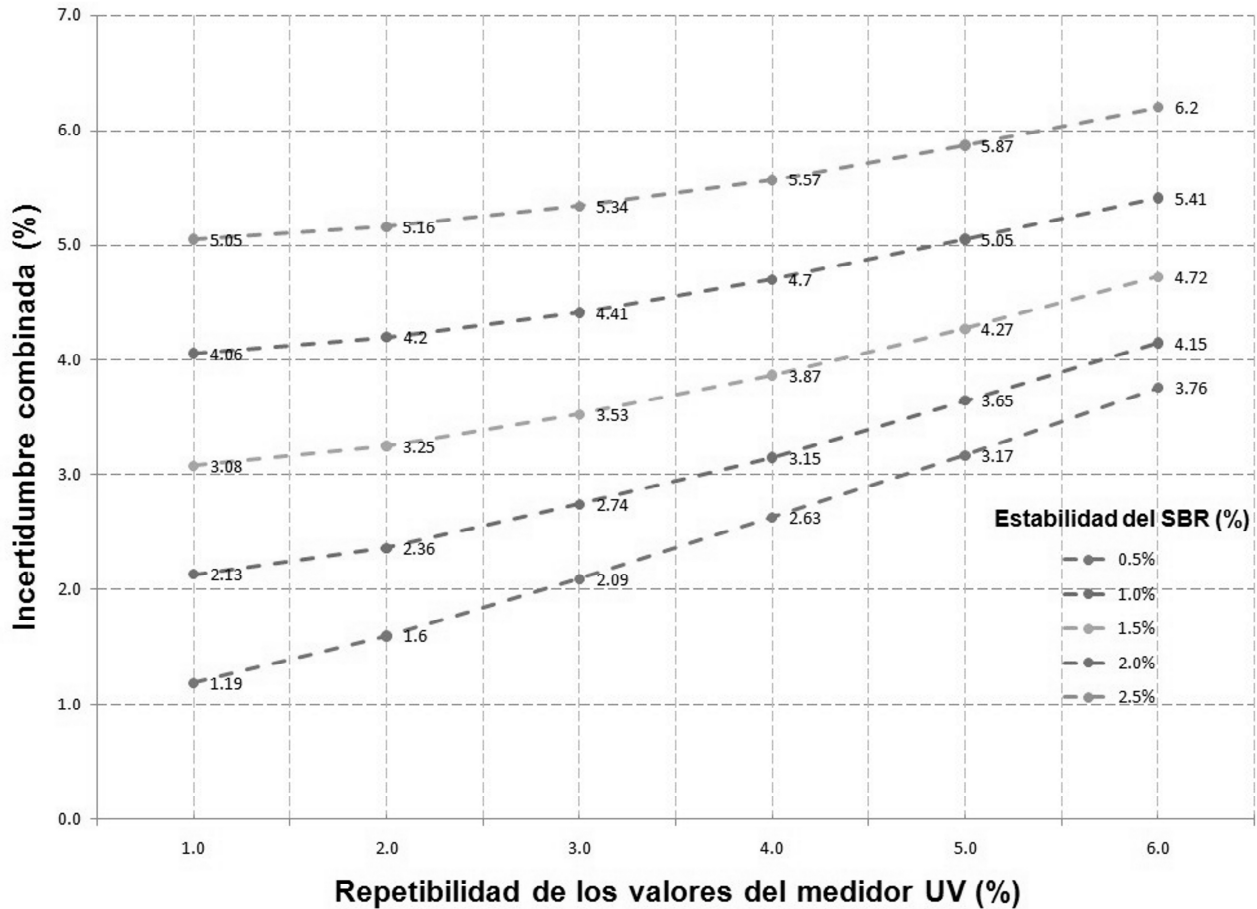


Fig. 5. Incertidumbre de medición en irradiancia y sus límites de control.

6. CONCLUSIONES

Se han presentado los resultados de la simulación de la incertidumbre de medición en irradiancia UV mediante el método de Monte Carlo. El valor de incertidumbre obtenido después de 10 000 ciclos es de 1.97 % ($k=1$). Se determinó que las fuentes de incertidumbre más significativas son la estabilidad del banco radiométrico y la repetibilidad de los valores del medidor UV.

Es posible visualizar el efecto de la calidad del instrumento de medición en la incertidumbre de medición. Este factor no puede ser controlado durante el proceso de calibración y depende

directamente de la fabricación y la calidad de los componentes internos del medidor UV.

Al combinar esta fuente de incertidumbre con el desgaste del banco radiométrico en intervalos de valores definidos reales y mediante estas técnicas de simulación, es posible definir límites reales de control para mantener la incertidumbre de medición en irradiancia UV en valores útiles para la industria y que estén acordes con los ofrecidos por otros institutos nacionales de metrología, para este tipo de mediciones con radiación UV.

Los resultados de la estimación de incertidumbre obtenidos mediante simulación, están en el orden de magnitud esperado respecto a los resultados de la estimación de incertidumbre declarados para

el Patrón Nacional (Mexicano) de Dosis de Radiación Ultravioleta a 365 nm; y más recientemente, en la línea de emisión de 254 nm.

REFERENCIAS

- [1] BIPM, IEC, IFCC, ISO, OIML, IUPAC, IUPAP, "ISO Guide Supplement One: Numerical Methods for the Propagation of Distributions", ISO, Suiza, (2004).
- [2] Gobierno Federal Mexicano, "Acuerdo mediante el cual se da a conocer al público en general la autorización del Patrón Nacional de Dosis de Radiación Ultravioleta, así como la cédula que describe sus características de magnitud, unidad, definición, alcance e incertidumbre", Diario Oficial de la Federación, 2007-11-22, Ciudad de México, México, (2007).
- [3] R. Cardoso, E. Rosas, "Ultraviolet Radiation Dose National Standard of Mexico", Ninth Mexican Symposium on Medical Physics, H. Mercado-Urbe, G. García-Torales, J. L. Flores-Núñez, E. Castillo-Corona, AIP Conference Proceedings, 854(5SO-0D3), 96-98, Melville, Estados Unidos de América, (2006).
- [4] Cardoso, R., Valdéz-Chaparro, J. P., Rosas, E., "UV radiation dose measurements", Fifth Symposium Optics in Industry, E. Rosas, R. Cardoso, J. C. Bermudez, O. Barbosa-Garcia, Proceedings of SPIE, 6046(60461R), Bellingham, Estados Unidos de América, (2006).
- [5] International Commission of Illumination, "International Lighting Vocabulary", CIE Publication No. 17.4, Paris, France, (1987).
- [6] BIPM, IEC, IFCC, ISO, OIML, IUPAC, IUPAP, "Guide pour l'Expression de l'Incertitude de Mesure", ISO-BIPM, Génova, Suiza, (1995).
- [7] J. G. Suárez, R. Cardoso, E. Rosas, "Determinación de la Uniformidad Espacial del Flujo Radiante en las Mediciones de Irradiancia a 365 nm", TA-028, Simposio de Metrología 2004, CENAM, Querétaro, México, (2004).
- [8] N. Vidal-Medina, E. Rosas, "Uncertainty component estimation for combined spatial non-uniformity of detector responsivity and 254 nm radiant field", Memorias de la XXII Reunión Anual de Óptica, Academia Mexicana de Óptica, Acapulco, México, (2009).