



Universidad de Valladolid

FACULTAD DE CIENCIAS

Grado en Óptica y Optometría

MEMORIA TRABAJO FIN DE GRADO TITULADO

Calibración en radiancia de una esfera
integrante.

Presentado por: María Arranz Yagüe

Tutelado por: Carlos Toledano Olmeda

Tipo de TFG: Revisión Investigación

En Valladolid a 25 de junio de 2020

ÍNDICE

RESUMEN	3
ABSTRACT	3
1. INTRODUCCIÓN	4
1.1. Las ondas y el espectro electromagnético	4
1.2. Radiometría	5
1.2.1. Magnitudes radiométricas.	6
1.2.2. Relación radiancia e irradiancia.	7
2. MATERIAL Y METODOLOGÍA.	8
2.1. Material.	8
2.1.1. Esfera integrante.	8
2.1.2. Espectrorradiómetro: FieldSpec® Pro.	10
2.1.3. Lámpara FEL.	11
2.1.4. Banco óptico y elementos de alineación.....	12
2.2. Metodología.	14
2.2.1. Teoría: Obtención radiancia de la esfera integrante.	14
2.2.2. Procedimiento de alineación.....	15
2.2.3. Sistemas de prevención.	15
3. RESULTADOS.	17
3.1. Irradiancia Lámpara FEL.	17
3.2. Unidades de cuentas digitales Lámpara FEL.	17
3.3. Unidades de cuentas digitales esfera integrante.....	18
3.4. Irradiancia esfera integrante.....	18
3.5. Radiancia esfera integrante.	19
3.6. Comparativa radiancia esfera integrante.....	19
4. DISCUSIÓN.....	21
5. CONCLUSIONES.	22
BIBLIOGRAFÍA.....	23
ANEXO I: Certificado Lámpara FEL ¹²	24

RESUMEN

En este trabajo se expone el método práctico por el cual se obtiene la radiancia de una esfera integrante a partir de una lámpara patrón de irradiancia conocida. También se explican conceptos de radiometría, el material usado y su funcionamiento, y los distintos pasos que se han seguido para la comprensión de todo el proceso. Por último, se presentan los resultados obtenidos en las medidas y cálculos realizados, estos se comparan con los resultados esperados y se discute las posibles causas de los errores.

ABSTRACT

This work presents the practical method by which the radiance of an integrating sphere is obtained from a known irradiance reference lamp. It also explains the concepts of radiometry, the material used in this procedure and its operation, and the different steps that have been taken to understand the whole process. The results obtained in the measurements and calculations are presented and compared with the expected results. Finally, there's a discussion on the errors and its causes, as well as the limits of the results that can be obtained by this method.

1. INTRODUCCIÓN.

En el presente trabajo se expone el método práctico a partir del cual se obtiene el coeficiente de calibración en irradiancia de un instrumento de medida, como es el espectrorradiómetro, a partir de una lámpara calibrada; y así obtener la irradiancia de otros elementos emisores, como es la esfera integrante. Una vez obtenida la irradiancia de esta se calcula su radiancia (objetivo principal de este trabajo), gracias a la relación física que existe entre ambas magnitudes radiométricas para una esfera integrante.

Para la comprensión de este proceso es importante conocer varios conceptos como son: el espectro electromagnético, la radiometría y sus magnitudes y la relación entre la irradiancia y la radiancia.

1.1. Las ondas y el espectro electromagnético.

Una onda electromagnética es una propagación de energía que consta de un campo eléctrico y un campo magnético perpendiculares entre sí, y que a su vez son perpendiculares a la dirección de propagación.¹

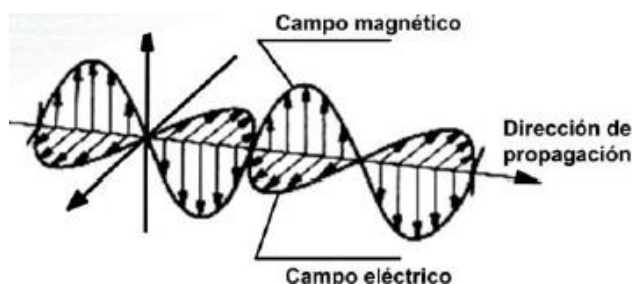


Figura 1. Onda electromagnética ¹

Dicha energía, en forma de onda electromagnética, se la denomina radiación electromagnética, y al conjunto de las frecuencias (cantidad de ciclos de la onda en una unidad de tiempo) a las que se produce radiación electromagnética se le llama espectro electromagnético.¹

Teóricamente el límite inferior del espectro electromagnético es 0 (ya que no existen frecuencias negativas) y el límite superior es el infinito; pero se cree que la longitud de onda electromagnética (distancia entre dos valores de amplitud máxima de la onda) más pequeña posible es la longitud de Planck ($l_p \approx 1,616252 \cdot 10^{-35}$ m) y que el límite máximo para la longitud de una onda electromagnética sería el tamaño del universo.¹

El espectro electromagnético se divide en segmentos de frecuencia. Esta división se realiza en función de unos criterios y no es exacta ya que en ocasiones se producen solapamientos de bandas (una misma frecuencia está en dos rangos).

La clasificación más típica establece las siguientes categorías de radiación electromagnética:

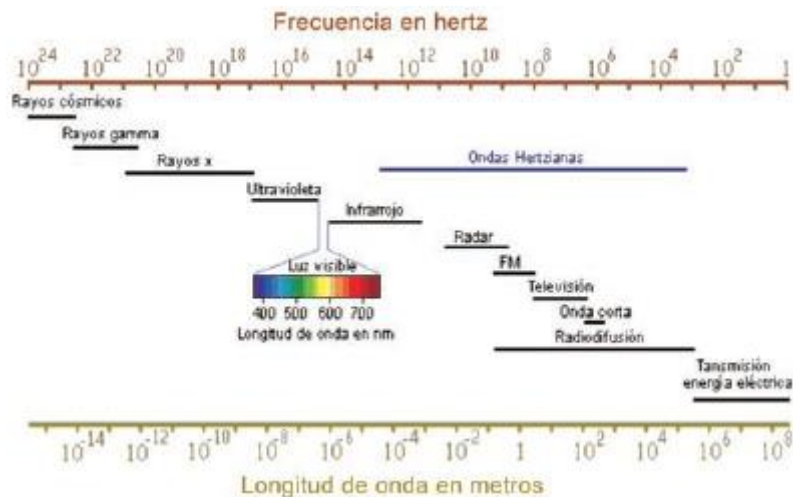


Figura 2. Espectro electromagnético ¹

Como se puede ver en la figura, la luz visible es sólo una porción pequeña del espectro electromagnético, situado entre la radiación ultravioleta y la infrarroja.

La Comisión Internacional de Iluminación (CIE) define las siguientes franjas espectrales en el rango óptico: ²

Nombre	Rango de Longitudes de Onda
UV-C	100 nm – 280 nm
UV-B	280 nm – 315 nm
UV-A	315 nm – 400 nm
VIS (visible)	(360-400) nm hasta (760-800) nm
IR-A (infrarrojo cercano, <i>near IR, NIR</i>)	780 nm – 1400 nm
IR-B	1.4 μm – 3.0 μm
IR-C (infrarrojo lejano, <i>far IR</i>)	3.0 μm – 1.0 mm

Figura 3. Tabla de las franjas espectrales por la CIE ²

El espectrorradiómetro utilizado es sensible a un rango de longitudes de onda de 350 nm a 2500nm, por lo que este será el intervalo espectral con el que trabajaremos.

1.2. Radiometría.

La radiometría es la parte de la física que estudia la intensidad de radiación (cantidad de energía que se propaga por unidad de tiempo) de las ondas electromagnéticas. Para ello, proporciona un sistema de magnitudes, unidades y patrones que permiten describir y medir esta radiación electromagnética³.

Tiene como objetivo describir la transferencia de energía desde una fuente a un detector. Para ello, tiene en cuenta la transferencia de energía en todas las franjas espectrales del rango óptico.²

Para caracterizar y cuantificar la energía la radiometría emplea distintas magnitudes.

1.2.1. Magnitudes radiométricas.

- Energía radiante (Q). Es cantidad de energía que incide, se propaga o se emite en una superficie de área determinada en un período de tiempo. Se mide en julios, J.²
- Flujo radiante (Φ). Cantidad de energía radiante por unidad de tiempo. Se mide en vatios, W.²

$$\phi = \frac{dQ}{dt}$$

- Intensidad radiante (I). Densidad de flujo radiante por unidad de ángulo sólido (ω) en un punto en el espacio y con una dirección específica. Se mide en W/sr.²

$$I = \frac{d\phi}{d\omega}$$

- Irradiancia (E). Densidad de flujo radiante por unidad de superficie que incide, atraviesa o emerge de un punto de dicha superficie. Se incluyen todas las direcciones comprendidas en el ángulo sólido hemisférico, por lo que es independiente de la dirección. Se mide en W/m².²

$$E = \frac{d\phi}{ds_o}$$

- Radiancia (L). Es la cantidad de flujo radiante por la unidad de área y de ángulo sólido que incide, atraviesa o es emitido por un elemento de superficie centrado en un punto del espacio propagándose en una dirección específica. Se mide en W/(m²·sr). Su ecuación de definición es:

$$L = \frac{d^2\phi}{d\omega ds} = \frac{d^2\phi}{d\omega ds_o \cos\theta}$$

donde $ds = ds_o \cos\theta$ es el área proyectada (área de la proyección de la superficie que contiene el punto, ds_o , sobre el plano perpendicular a la dirección de propagación).

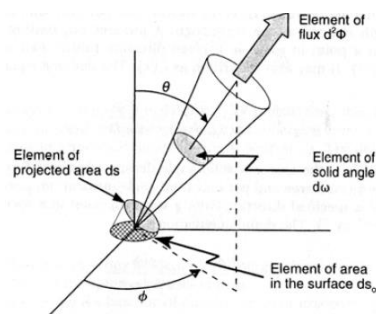


Figura 4. Radiancia²

La radiancia, al igual que las demás magnitudes radiométricas, varía en función de la longitud de onda, lo que se conoce como radiancia espectral (L_λ) y se mide en $W/(m^2 \cdot sr \cdot nm)$.²

$$L_\lambda = \frac{dL}{d\lambda} = \frac{d^3\phi}{d\omega ds_o \cos\theta d\lambda}$$

Se considera la radiancia la magnitud básica a partir de la cual derivan las otras magnitudes radiométricas.

1.2.2. Relación radiancia e irradiancia.

La diferencia entre la radiancia (L) y la irradiancia (E) es que la primera describe una distribución angular de la radiación, y la segunda suma todas las contribuciones angulares contenidas en el ángulo sólido.²

A partir de la fórmula de la radiancia se puede obtener su relación con la irradiancia:

$$L = \frac{d^2\phi}{d\omega ds_o \cos\theta} \quad d\left(\frac{d\phi}{ds_o}\right) = L \cos\theta d\omega$$

$$E = \frac{d\phi}{ds_o} \quad dE = L \cos\theta d\omega$$

donde θ es el ángulo que forma la superficie emisora y el detector, y ω el ángulo sólido (que subtende la superficie observada desde un punto).

En nuestra parte práctica la medida que tiene relación con esta fórmula es la realizada a la esfera integrante, ya que es de esta de la cual calculamos su radiancia a partir de la irradiancia medida. La fórmula que relaciona ambas magnitudes, teniendo en cuenta la posición del detector y de la esfera integrante, es:

$$E = \pi L \sin^2\theta$$

Esta relación se obtiene integrando la relación anterior para una superficie de radiancia L que sea un disco, cuando medimos la irradiancia en el eje y en dirección perpendicular.⁴ Dicha superficie radiante debe además ser lambertiana, es decir, cumplir la ley de Lambert o ley del coseno.³

2. MATERIAL Y METODOLOGÍA.

2.1. Material.

2.1.1. Esfera integrante.

Una esfera integrante o esfera de Ulbricht es un dispositivo para medir radiación óptica. Esto es posible gracias a que por su estructura y características la esfera integra espacialmente el flujo radiante. Consiste en una esfera con un recubrimiento interior reflectante. Según la aplicación que se quiera dar, es necesario disponer de orificios (puertos) a través de los cuales medir, introducir luz, etc.

- Teoría de la esfera integrante.

La teoría de la esfera integrante se origina en la teoría del intercambio de radiación en un recinto de superficies difusas: ⁴

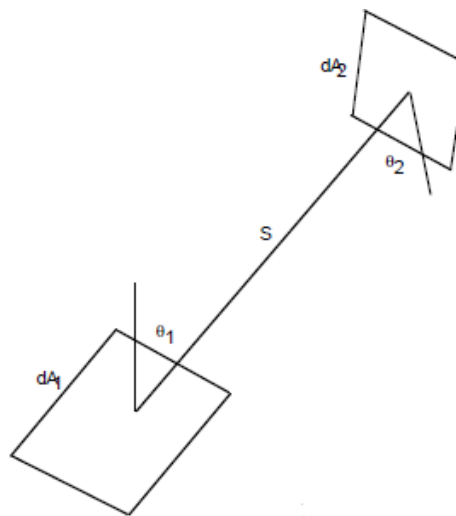


Figura 5. Esquema intercambio de radiación entre superficies difusas³

La fracción de energía que sale de dA1 y llega a dA2 se llama factor de intercambio:

$$dF_{d1-d2} = \frac{\cos\theta_1 \cos\theta_2}{\pi s^2} dA_2$$

Pero en el caso de una esfera el resultado es independiente del ángulo de visión y de la distancia entre las áreas, entonces la fracción de flujo recibida por dA2 es la misma en cualquier punto de la superficie de esta: ⁴

$$F_{1-2} = \frac{A_2}{4\pi R^2} = \frac{A_2}{A_S}$$

Al incidir luz sobre una superficie difusa se crea una fuente de luz virtual por reflexión, a mayor reflectancia del material menos diferencia habrá entre la radiación incidente y la reflejada. Dicha reflectancia tiene que ser alta en el mayor rango espectral posible, es decir, no sirve un material cuya reflectancia sea máxima sólo para una longitud de onda

concreta, lo óptimo es que sea altamente reflectante para un espectro amplio de longitudes de onda. Por ejemplo, el revestimiento Spectralon (ofrecido por la empresa Labsphere³) es útil para la región espectral de 250 nm a 2500 nm, con más del 95% de reflectancia en el rango de 350 nm a 1350 nm.

Aparte de la reflectancia, para conseguir el rendimiento espacial óptimo de la esfera integrante, intervienen el diámetro de esta y la fracción de puerto (relación entre la superficie de la esfera y la superficie consumida por los puertos de entrada).⁴

- Aplicaciones.

- Si esta acoplada a un fotodetector con respuesta espectral puede emplearse para medir el flujo geométrico que emana una fuente de luz.
- Medir espectralmente la reflectancia y transmitancia de materiales difusos, y así tener información como: cuál es la resistencia de un material a los rayos UV, cuantificar el de color de un material...
- Fuente de luz difusa (y radiancia uniforme) de gran área. Colocando dentro de la esfera integrante una o varias lámparas, que comúnmente son lámparas halógenas de tungsteno (porque proporcionan un espectro continuo).⁴

En nuestro caso, para obtener la radiancia de la esfera integrante tendríamos en cuenta la última de las aplicaciones descritas; se emplea la esfera integrante como una fuente de luz difusa de la cual se necesita saber la radiancia que emite al encender las 4 lámparas halógenas de tungsteno que tiene acopladas, disponiendo los elementos como muestra el esquema (*Figura 6*).

Pero en la práctica se usan 2 esferas:

1. La esfera principal, de la cual se calcula la radiancia, es de Labsphere. Tiene un diámetro de 20 pulgadas y su diámetro de puerto es de 8 pulgadas. Está iluminada con 4 lámparas de tungsteno de 35W.
2. Una segunda esfera cuya función es servir de receptor para medir el flujo geométrico que emana la lámpara FEL, acoplándola a la fibra óptica del espectrorradiómetro. Esta tiene un diámetro interno de 1 pulgada.

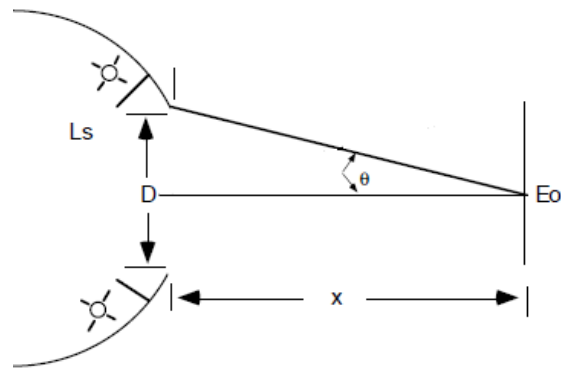


Figura 6. Esquema disposición elementos³

Como se ha mencionado anteriormente, esta disposición se traduce en que la relación entre radiancia e irradiancia sea:

$$E = \pi L \sin^2 \theta$$

2.1.2. Espectrorradiómetro: FieldSpec® Pro.

Un espectrorradiómetro es un instrumento diseñado para medir magnitudes radiométricas en función de la longitud de onda. Determina la distribución de energía radiante espectral de una fuente cualquiera.

La fibra óptica permite la entrada de la luz al interior de este, donde es separada en los distintos componentes de longitud de onda por una rejilla de difracción holográfica, para así poder medir cada uno independientemente por el detector (o detectores). Los datos obtenidos son traducidos al ordenador para mostrar los resultados de la medida.

El espectrorradiómetro empleado en este trabajo es el FieldSpec® Pro⁵ (Analytical Spectral Devices, Inc.) y está conectado a un ordenador portátil. Éste muestra, cuantificado en unidades de cuentas digitales, la cantidad de energía radiante para cada longitud de onda.

Para las distintas medidas su fibra óptica se acopla en la esfera integrante pequeña (para medir la lámpara FEL) y en una estructura específica (para medir a la esfera integrante).



Figura 7. Espectrorradiómetro FieldSpec® Pro.

El rango espectral de medida es de 350nm a 2500nm. Para ello dispone de un detector de Silicio (350-1000nm) y dos detectores de Germanio e Indio (1000-1800nm y 1800-2500nm respectivamente).⁵

2.1.3. Lámpara FEL.

La lámpara, usada como referencia de irradiancia espectral, es una lámpara de tipo FEL calibrada por el NIST (National Institute of Standards and Technology)⁶. En el Anexo I se encuentra su certificado de calibración.



Figura 8. Lámpara tipo FEL de 1000 W.

Se alimenta con una fuente de alimentación estabilizada Newport que proporciona 8.2 amperios de corriente estabilizada a la lámpara.

Las lámparas FEL son lámparas halógenas de cuarzo de 1000 W. El termino FEL no es un acrónimo, es la designación del tipo de lámpara dado por el ANSI (American National Standards Institute).⁶

La calibración de este tipo de lámparas sigue una serie de pasos que, resumidamente, consiste en comparar la irradiancia espectral de una lámpara conocida (calibrada a su vez con el fin de que su irradiancia espectral se asemeje a la emitida por un cuerpo negro) con la lámpara a calibrar hasta conseguir el patrón de irradiancia espectral deseado.⁶

Esta lámpara permite tener un patrón conocido de la irradiancia y así compararlo con los patrones no conocidos que obtengamos con el espectrorradiómetro.

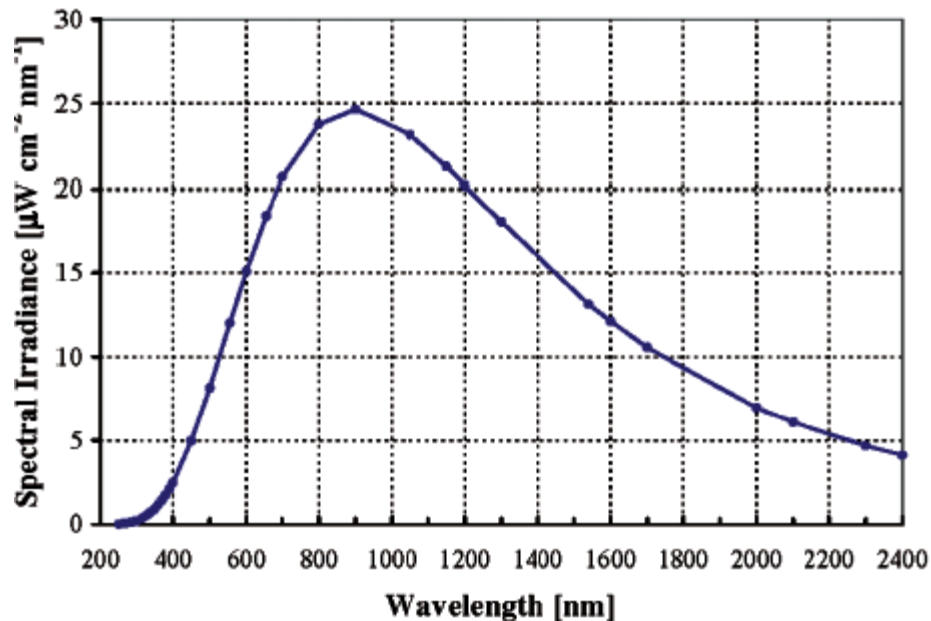


Figura 9. Curva de irradiancia espectral típica de una lámpara FEL.⁶

2.1.4. Banco óptico y elementos de alineación.

Los distintos instrumentos descritos en los anteriores puntos se alinean gracias a un banco óptico y otros elementos específicos.

El banco óptico que se ha utilizado es de la marca Qioptic y está formado por distintas piezas.⁷

Los distintos elementos de alineación son de la marca Newport.^{8,9,10} Sirven como soporte de los distintos instrumentos para poder desplazarlos por el banco óptico y hacer ajustes de alineación de gran precisión:



Figura 10. XYZ Liner Stage.
Modelo: M-460A-XYZ⁸



Figura 11. Tip/Tilt and rotation plataforma.
Modelo: M-37⁹



Figura 12. Platform, 200 lb., 1/4-20
and M6. Modelo:271¹⁰

La esfera integrante se coloca en uno de los extremos del banco, y sobre este los distintos soportes con la lámpara FEL y con la estructura que contiene la fibra óptica del espectrorradiómetro.

En la imagen se observa, de izquierda a derecha: la esfera integrante secundaria, el láser de doble haz, el soporte con la fibra óptica del espectrorradiómetro y la esfera integrante principal.

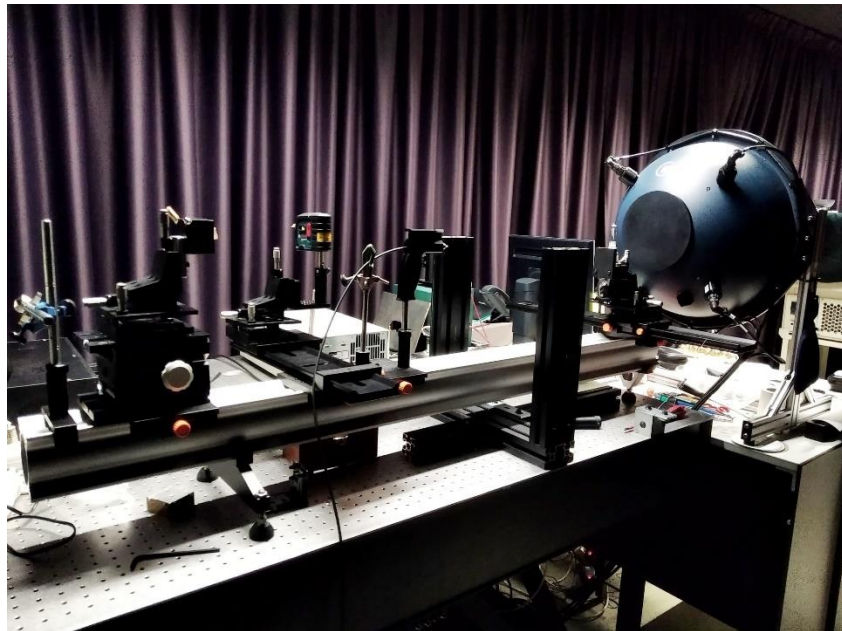


Figura 13. Disposición de los distintos elementos sobre el banco óptico.

Por último, para la alineación se utiliza además un láser de doble haz (Bosch GPL5):



Figura 14. Láser de doble haz Bosch GPL5.

2.2. Metodología.

2.2.1. Teoría: Obtención radiancia de la esfera integrante.

Como se ha mencionado al principio, el objetivo principal de este trabajo es obtener la radiancia que emite la esfera integrante con sus 4 lámparas internas encendidas.

El instrumento que disponemos para realizar dicha medida es el espectrorradiómetro FieldSpec® Pro, que mide en cuentas digitales la radiación espectral de objetos emisores. El camino más fácil para medir la radiancia de la esfera integrante sería pasar la medida que nos da el espectrorradiómetro en cuentas digitales a su equivalente en radiancia, pero no se sabe el coeficiente de calibración que relaciona ambas magnitudes.

Entonces, para obtener la radiancia de la esfera integrante, primero hay que conseguir un coeficiente de calibración que relacione las unidades de cuentas digitales con una magnitud radiométrica. Esto es posible gracias a la lámpara FEL, ya que su irradiancia espectral es conocida, a partir de una fórmula dada por el laboratorio de calibración, permitiendo compararla con la medida en cuentas digitales del espectrorradiómetro realizada en el laboratorio.

$$\text{Coeficiente de calibración} = \frac{\text{Cuentas digitales espectrorradiómetro}}{\text{Irradiancia espectral fórmula}}$$

Una vez conseguido el coeficiente que convierte las cuentas digitales en irradiancia, se puede obtener la irradiancia espectral de la esfera integrante (a partir de la medida del espectrorradiómetro a la esfera integrante).

Finalmente, con la fórmula que relaciona la irradiancia y la radiancia en una esfera integrante, se obtiene la radiancia que emite la esfera integrante.

$$E = \pi L \sin^2 \theta \quad L = \frac{E}{\pi \sin^2 \theta}$$

(en la situación de la *Figura 6*) Siendo θ el ángulo que subtiende el radio del puerto de entrada de la esfera integrante (el diámetro del puerto de entrada es de 8 pulgadas, por lo que su radio es de 10.16 cm) y la distancia entre la esfera y la fibra óptica (62 cm).

2.2.2. Procedimiento de alineación.

Antes de tomar las distintas medidas se tienen que alinear los distintos instrumentos en un mismo eje óptico, si los instrumentos no se encuentran en el mismo eje (tanto horizontal como vertical) las medidas que se toman no son correctas.

Para alinear los distintos instrumentos se usa un láser que proyecta dos haces perpendiculares entre sí. Al posicionarlo en uno de los soportes del banco, uno tiene que quedar perpendicular a la mesa de trabajo, y el otro paralelo a esta y siguiendo el centro del banco óptico.

Las medidas tomadas se hacen con dos sistemas distintos:

- Sistema 1: Medida a la lámpara FEL. Para esta medida el sistema consta de la fibra óptica del espectrorradiómetro (acoplada a la esfera integrante pequeña) en un soporte y la lámpara FEL en otro. Para alinearlas se hace coincidir el haz horizontal del láser con el centro del puerto de entrada de la esfera integrante y con el centro del filamento de la lámpara.
- Sistema 2: Medida a la esfera integrante. Este segundo sistema está formado por la esfera integrante y por la estructura del espectrorradiómetro que contiene la fibra óptica. Para alinear los elementos se sigue el mismo procedimiento que con el anterior sistema, conseguir que el haz horizontal pase por el centro del puerto de entrada de la esfera integrante y que incida en la apertura de la estructura que contiene la fibra óptica. Se emplea un espejo para comprobar que el haz láser regresa por el mismo camino, lo que garantiza que las superficies son perpendiculares al eje óptico.

2.2.3. Sistemas de prevención.

Durante la medida a la lámpara FEL hay que tomar una serie de precauciones debido a que la emisividad de radiación en el rango ultravioleta es muy alta. Como prevención hay que:

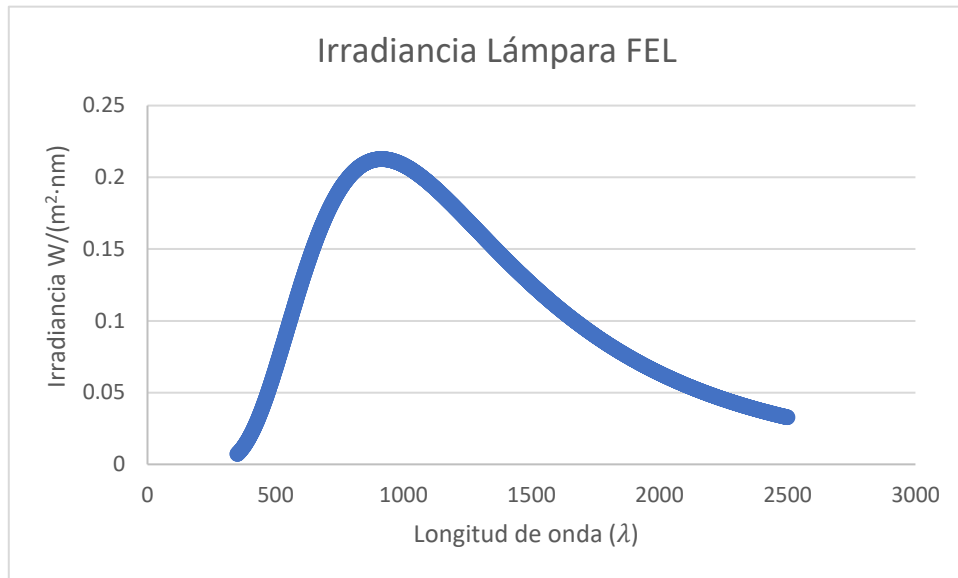
- Cubrirse la piel (chaquetas y pantalones largos) porque la radiación ultravioleta es perjudicial para este órgano y puede

causar alteraciones en él.

- Gafas de protección con filtro ultravioleta para prevenir alteraciones por alta exposición a luz ultravioleta, como es el pterigion (en la conjuntiva) o la queratitis actínica (en córnea). También hay que evitar mirar directamente a la lámpara ya que produce deslumbramiento debido al exceso de luz.¹¹

3. RESULTADOS.

3.1. Irradiancia Lámpara FEL.

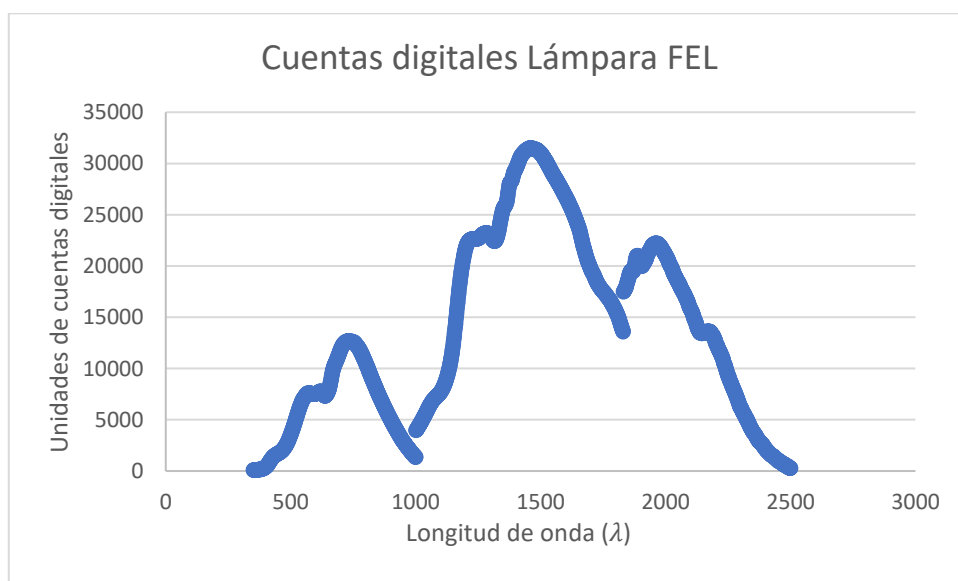


Gráfica 1. Representación de la irradiancia espectral conocida de la Lámpara FEL, obtenida a partir de la fórmula dada por el laboratorio.

3.2. Unidades de cuentas digitales Lámpara FEL.

Se tomaron 10 medidas a las cuales se les restó el ruido de cada una. El ruido en este caso es toda la luz que llega al detector del espectrorradiómetro que no es emitida directamente por la Lámpara FEL, sino que proviene de reflexiones en otros materiales y luego impactan en el detector.

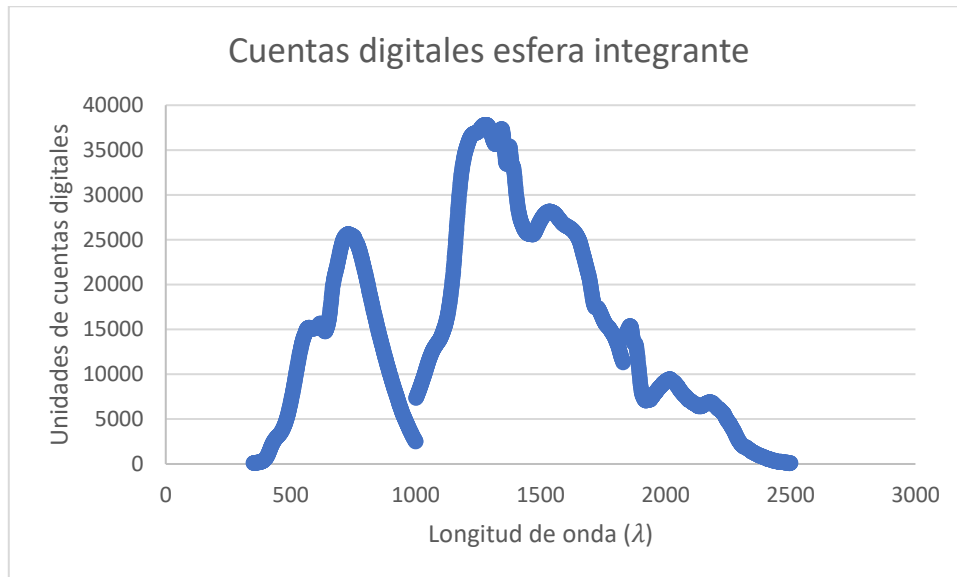
Una vez restado dicho ruido, se promedian las 10 medidas para obtener una medida promedio de la lámpara FEL, en cuentas digitales.



Gráfica 2. Representación de las cuentas digitales en función de la longitud de onda al medir la lámpara FEL.

3.3. Unidades de cuentas digitales esfera integrante.

También se realizaron 10 medidas a la esfera integrante con sus 4 lámparas internas encendidas, y se promediaron para obtener una medida promedio:

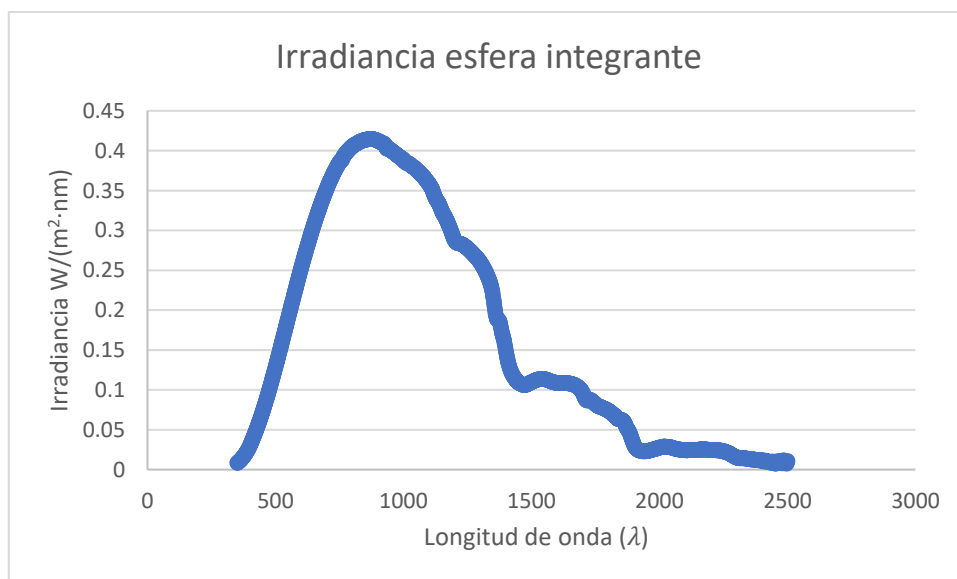


Gráfica 3. Representación de las cuentas digitales en función de la longitud de onda al medir la irradiancia de la esfera integrante a una distancia de 62cm del puerto.

Estas medidas se realizaron a 62cm de la boca de la esfera, sobre el eje que marca el centro de la boca de la esfera, como se indicó en la figura 6.

3.4. Irradiancia esfera integrante.

A partir del coeficiente de calibración en irradiancia, obtenido gracias a la lámpara FEL, se saca la irradiancia que emite la esfera integrante.

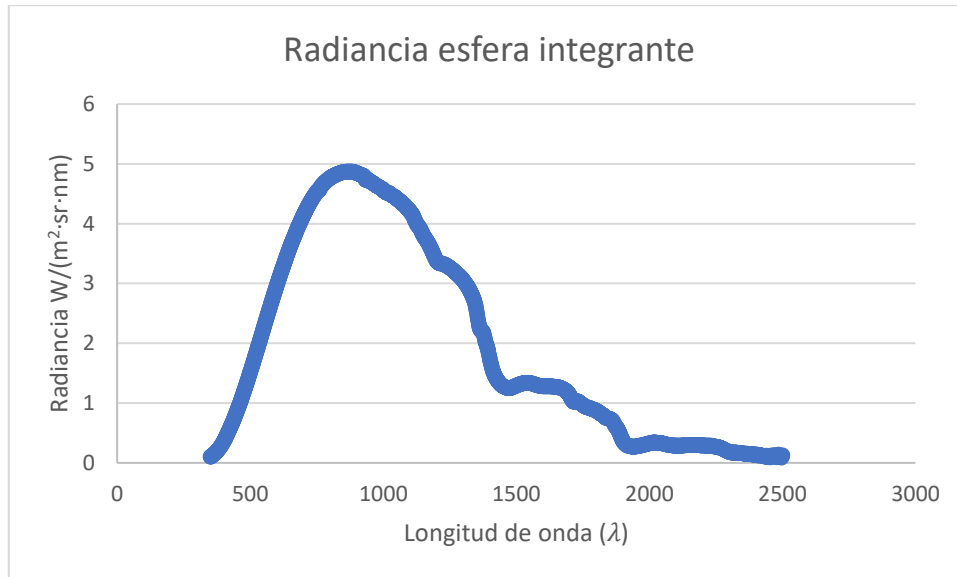


Gráfica 4. Representación de las cuentas digitales en función de la longitud de onda al medir la lámpara FEL.

3.5. Radiancia esfera integrante.

Finalmente, se calcula la radiancia espectral de la esfera integrante a partir de la fórmula:

$$E = \pi L \sin^2 \theta \quad L = \frac{E}{\pi \sin^2 \theta}$$

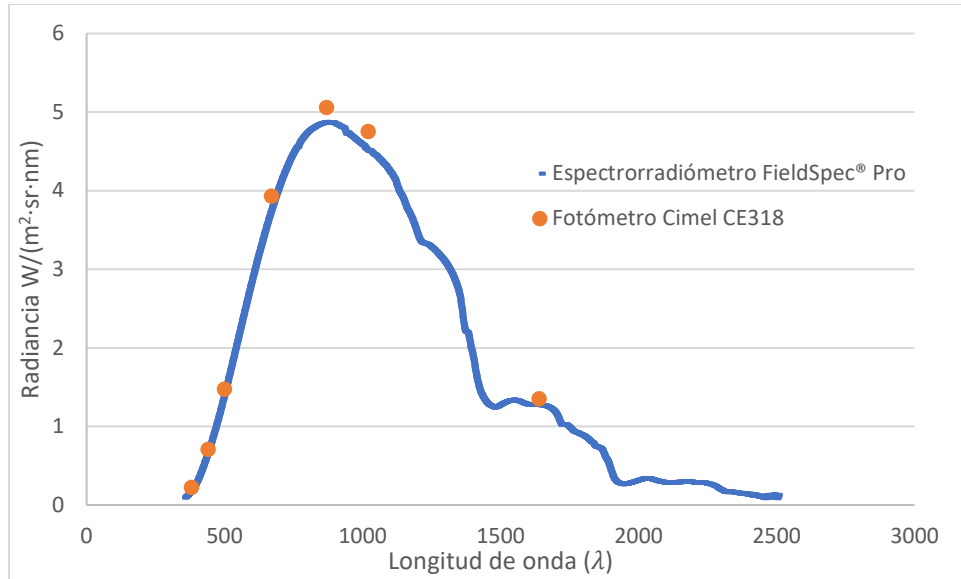


Gráfica 5. Representación de la radiancia espectral emitida por la esfera integrante.

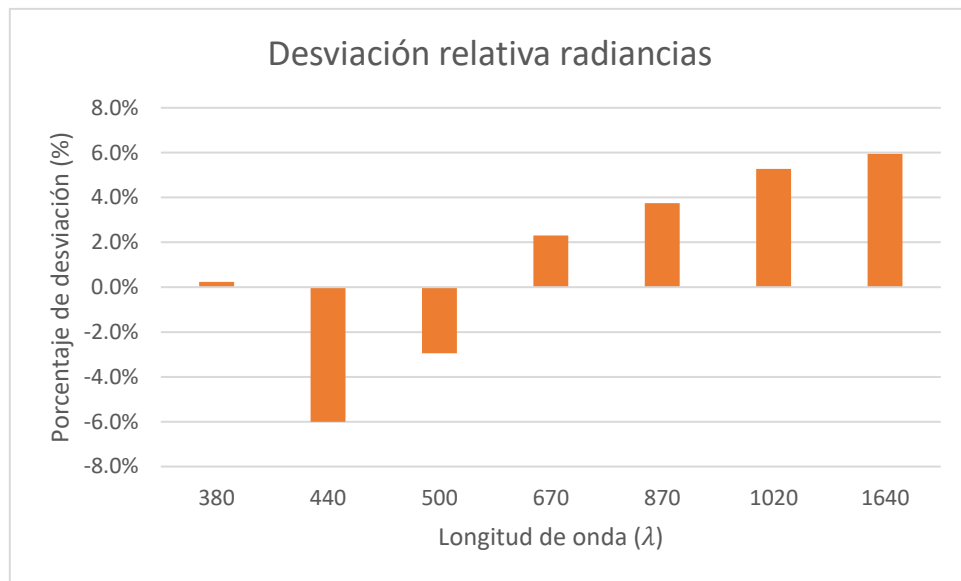
3.6. Comparativa radiancia esfera integrante.

Para valorar experimentalmente si el proceso de calibración ha sido el esperado, contamos con las medidas tomadas a la esfera integrante con el fotómetro Cimel CE318. Este instrumento mide directamente la radiancia emitida y es el equipo de referencia de la red AERONET de la NASA. De esta medida se obtiene la radiancia espectral de 7 longitudes de onda.

La desviación relativa entre las medidas del espectrorradiómetro y las medidas del fotómetro (gráfica 7) nos muestra el margen de error aproximado que tiene cada rango de longitudes de onda; a mayor porcentaje mayor error con respecto al equipo estándar. Esta se ha calculado a partir de comparar las medidas del espectrorradiómetro con las medidas del fotómetro.



Gráfica 6. Representación de la radiancia espectral obtenida con 2 instrumentos diferentes.



Gráfica 7. Representación de la desviación relativa de las medidas del espectrorradiómetro con respecto a las medidas del fotómetro.

4. DISCUSIÓN.

En las gráficas correspondientes a las medidas del espectrorradiómetro (gráfica 2 y 3), que se representan las unidades en cuentas digitales, se observan 2 cortes correspondientes a las longitudes de onda de 1000 nm y 1800nm. Estos cortes se producen por el cambio de detector en el espectrorradiómetro, que, como se ha mencionado antes, cuenta con 2 tipos de detectores de 3 elementos diferentes: un detector de Silicio (350-1000nm) y dos detectores de Germanio e Indio (1000-1800nm y 1800-2500nm respectivamente).⁵ Una vez aplicada la calibración, estos saltos dejan de apreciarse en la medida en W/m^2 .

En la gráfica 7 se aprecia desviación de la medida realizada con el espectrorradiómetro con respecto al fotómetro, alcanzado una diferencia máxima del 6% en la longitud de onda de 440 nm. Una incertidumbre en torno a un 5% es habitual en este tipo de medidas, por lo que entendemos que el procedimiento ha sido correcto.

La diferencia con respecto al fotómetro Cimel se puede relacionar con varios factores:

- El mal alineamiento de los elementos del sistema, tanto en la medida de la lámpara como de la esfera integrante, afectando a todos los resultados del trabajo. El alineamiento de los distintos elementos es clave para que las medidas sean lo más precisas posibles, todos los elementos tienen que estar en el mismo eje o la medida contará con aberraciones y errores.
- La luz parásita, es decir, luz que ha impactado en el detector del espectrorradiómetro pero que no proviene directamente del elemento emisor, si no de la reflexión de las paredes u otros objetos presentes en el laboratorio. Para disminuir las reflexiones indeseadas, las paredes del laboratorio están pintadas de negro y se hacen las medidas correspondientes al ruido como se ha mencionado en la gráfica 2.
- Las horas de uso de la lámpara de referencia FEL. Este tipo de lámparas tienen un número de horas de uso para que la calibración siga siendo válida; y en el caso de la lámpara que se ha empleado, se encuentra cerca de ese límite (42h de 50h).
- El espectrorradiómetro también podría presentar problemas de dependencia con la temperatura, estabilidad o linealidad.

5. CONCLUSIONES.

Los resultados son los esperados, y hemos podido transferir el patrón de calibración de irradiancia de una lámpara a la esfera integrante, que es una fuente uniforme de radiancia. Esto se refleja en las medidas tomadas, en las que se puede apreciar el acuerdo dentro de los márgenes habituales (5%) con otro instrumento calibrado.

Las diferencias encontradas pueden ser debidas al alineamiento de los elementos en los distintos sistemas, aun siendo la parte a la que se ha dedicado más tiempo y se ha creído llegar a un punto de máxima precisión. También a otros factores que son menos controlables, como el envejecimiento de la lámpara de referencia o problemas con el espectrorradiómetro empleado.

Por lo tanto, el coeficiente de calibración obtenido puede servir para trabajar en el futuro, por ejemplo, para calibrar otros instrumentos del laboratorio como se ha hecho con la esfera integrante en este trabajo.

BIBLIOGRAFÍA.

1. Ordóñez JL. Espectro electromagnético y espectro radioeléctrico. Rev la Asoc Autores Científico-Técnicos y Académicos [Internet]. 2012;62(2):17–31. Available from: https://www.acta.es/medios/articulos/ciencias_y_tecnologia/062017.pdf [Accessed 28 April 2020].
2. González Gómez E. Guía básica de conceptos de radiometría y fotometría. Campos electromagnéticos - Óptica [Internet]. 2006;1–41. Available from: <http://laplace.us.es/campos/optica/opt-guia2.pdf> [Accessed 5 April 2020].
3. McCluney W.R. Introduction to radiometry and photometry. Artech House Inc., 1994.
4. Labsphere. Integrating Sphere Theory and Applications [Internet]. 2017 Available from: https://www.labsphere.com/site/assets/files/2551/integrating_sphere_theory_apps_tech_guide.pdf [Accessed 3 March 2020].
5. Analytical Spectral Devices I. FieldSpec ® Pro User ' s Guide. Anal Spectr Devices, Inc [Internet]. 2002;(January):1–136. Available from: ftp://snowserver.colorado.edu/pub/fromDominik/ASD_calibration_files/fieldspec_pro_manual.PDF
6. Fraser GT, Gibson CE, Yoon HW, Parr AC. "Once is enough" in radiometric calibrations. J Res Natl Inst Stand Technol [Internet]. 2007;112(1):39–51. Available from: <https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/jres/112/1/V112.N01.A03.pdf>
7. Qioptiq Q-Shop | Rail/ Profile System 95 [Internet]. Available from: <http://www.qioptiq-shop.com/en/Optomechanics/Rail-Systems/Rail-Profile-System-95/> [Accessed 12 May 2020].
8. M-460A-XYZ [Internet]. Available from: <https://www.newport.com/p/M-460A-XYZ> [Accessed 12 May 2020].
9. M-37 [Internet]. Available from: <https://www.newport.com/p/M-37> [Accessed 12 May 2020].
10. 271 [Internet]. Available from: <https://www.newport.com/p/271> [Accessed 12 May 2020].
11. Aires B, York XN, Juan SAN, Bogot DE, Auckland P, Par ND, et al. Aprendizaje basado en competencias Segunda edición.
12. Buy WE, Equipment U, For L, Information M, Inspection R. Artisan Technology Group is your source for quality new and certified-used/pre-owned equipment

ANEXO I: Certificado Lámpara FEL¹²

Certificado de calibración en irradiancia de la lámpara FEL, proporcionado por NIST.

	<p>Artisan Technology Group is your source for quality new and certified-used/pre-owned equipment</p>	
<ul style="list-style-type: none"> • FAST SHIPPING AND DELIVERY • TENS OF THOUSANDS OF IN-STOCK ITEMS • EQUIPMENT DEMOS • HUNDREDS OF MANUFACTURERS SUPPORTED • LEASING/MONTHLY RENTALS • ITAR CERTIFIED SECURE ASSET SOLUTIONS 	<p>SERVICE CENTER REPAIRS Experienced engineers and technicians on staff at our full-service, in-house repair center</p>	<p>WE BUY USED EQUIPMENT Sell your excess, underutilized, and idle used equipment. We also offer credit for buy-backs and trade-ins www.artisantg.com/WeBuyEquipment</p>
	<p>InstraView™ REMOTE INSPECTION Remotely inspect equipment before purchasing with our interactive website at www.instraview.com</p>	<p>LOOKING FOR MORE INFORMATION? Visit us on the web at www.artisantg.com for more information on price quotations, drivers, technical specifications, manuals, and documentation</p>
<p>Contact us: (888) 88-SOURCE sales@artisan.com www.artisantg.com</p>		

La calibración viene dada por un ajuste a un polinomio en función de la longitud de onda, con una serie de coeficientes.

Fórmula para	calcular irradiancia NIST		% Model 63350 Quartz Tungsten Halogen Lamp
A	44.4507838		%Lamp Standard Spectral Irradiance Calibration Certificate (mW.m-2.nm-1)
B	-4575.84284		%(Wavelength versus Irradiance)
C	0.97765139		
D	20.4350489		
E	28931.1765		
F	-26618878		
G	3378168498		
H	0		
LampIrr=invlambda.^(5).*exp(A + B*invlambda).*(C + D*invlambda.^(1) + E*invlambda.^(2) + F*invlambda.^(3) + G*invlambda.^(4) + H*invlambda.^(5));			
Wavelength	1/lambda	Irradiance (m)	Irradiance (W/m2/nm)
300	0.00333333	1.57446483	0.001574465
301	0.00332226	1.63289131	0.001632891
302	0.00331126	1.69296808	0.001692968
303	0.00330033	1.75472402	0.001754724
304	0.00328947	1.81818801	0.001818188
305	0.00327869	1.88338899	0.001883389
306	0.00326797	1.95035587	0.001950356
307	0.00325733	2.01911759	0.002019118
308	0.00324675	2.08970303	0.002089703
309	0.00323625	2.16214108	0.002162141
310	0.00322581	2.23646057	0.002236461
311	0.00321543	2.3126903	0.00231269
312	0.00320513	2.39085899	0.002390859

