

ADAPTACION DE UN ESPECTROFOTOMETRO DE ESFERA INTEGRADORA A FLUJOS LUMINOSOS INTENSOS

Julio Arturo Rabanal Reina- jarr40@gmail.com

Universidad Nacional de Ingeniería, Laboratorio de Fotometría FC-UNI

Resumen. El amplio uso de lámparas de descarga genera la necesidad de hacer análisis de la calidad lumínica y calorimétrica de las mismas. El presente trabajo analiza las peculiares características de estas lámparas que nos impiden hacer medidas directas sobre todo de lámparas de potencias superiores a los 150W en halogenuro metálico. En el laboratorio de fotometría de la UNI se cuenta con un avanzado equipo de fotometría cuyas mediciones se hace a través de un espectrómetro, que genera excelentes mediciones para fuentes lumínicas de espectros continuos de hasta 300W y de dimensiones menores a los 40cm, mas no para fuentes lumínicas de potencias superiores a 150W de espectro discontinuo (con picos espectrales) y/o con fuentes de dimensiones mayores a los 40cm ya sean fluorescentes de uso doméstico. Para llegar a medidas satisfactorias se hace una reducción secuencial del flujo luminoso, reduciendo el área de exposición al espectrómetro, para generar una curva de tendencia de la señal medida contra área de exposición, generando de esta manea una propuesta de adaptación al método de medición usual.

Palabras-clave: Fotometría, esfera integradora, lámparas de descarga.

1. INTRODUCCIÓN

La fotometría describe la transferencia de radiación de una fuente a un detector cuando las unidades de radiación han sido normalizadas a la respuesta (sensibilidad) espectral del ojo humano. Esta sensibilidad espectral se caracteriza por una magnitud denominada respuesta relativa, $V(\lambda)$, cuya dependencia espectral (en longitud de onda) cambia según las condiciones de luminosidad. En condiciones de alta luminosidad (luz del día, niveles superiores a 5×10^{-2} lux), se denomina curva de respuesta fotópica. Está determinada por la respuesta de las células tipo conos de la retina y es una curva cuyo máximo se encuentra a 550nm (correspondiente, aproximadamente al pico de emisión del sol). En condiciones de baja luminosidad (nocturna, niveles inferiores a 5×10^{-2} lux), se denomina curva de respuesta escotópica. Está determinada por la respuesta de las células tipo bastones de la retina y es una curva cuyo máximo se encuentra a 505nm (desplazado hacia longitudes de onda menores).

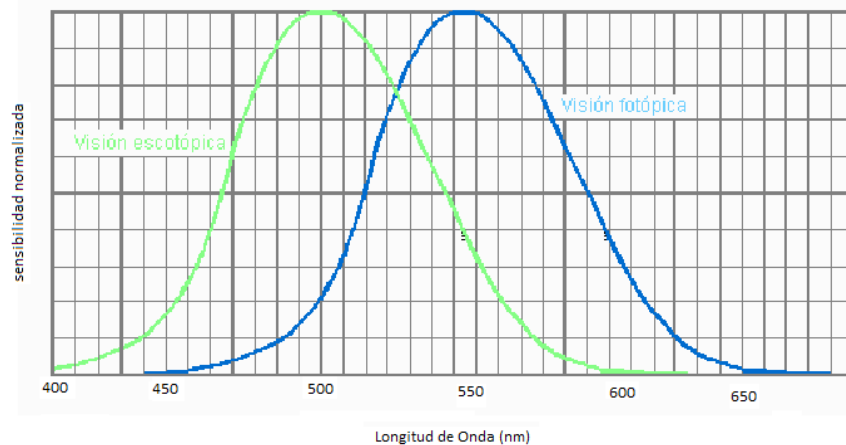


Figura 1- La figura muestra la función de eficiencia luminosa espectral para la visión fotópica y escotópica.

El flujo luminoso de una fuente luminosa (lámpara de trabajo) puede ser medido en una esfera integradora (con superficie interior blanca difusa) a través de una comparación con el flujo luminoso de una lámpara patrón. La medida se realiza al ubicar sucesivamente la lámpara de trabajo y la lámpara patrón en la misma posición y condiciones dentro de la esfera integradora. Para tal fin se mide la iluminancia indirecta en la superficie interior de la esfera que son proporcionales al flujo luminoso de las lámparas respectivas. De acuerdo con la teoría de Ulbricht, el flujo luminoso de la lámpara de trabajo Φ_v es relativo a su iluminancia indirecta E_{ind} en la superficie interna de la esfera. Para ello probamos que la iluminancia en toda la esfera es independiente de la geometría de la iluminación.

Ahora denotaremos factor de la esfera como:

$$k = (1-p).A/p \tag{1}$$

Donde p es la reflectancia de la superficie interna de la esfera y A es su área. Teóricamente k debería ser constante ya que no depende de la luz en la esfera pero en la práctica varía debido a que la esfera no está vacía cuando se hacen las medidas, y las mínimas variaciones en las condiciones entre lámparas de patrón y de trabajo (tipos y tamaño de lámparas, sockets, etc.) Generan variaciones en los valores de k . Por esto es que no podrá ser calculado usando la ecuación anterior.

Si consideramos el caso que k no cambia entonces aprovechamos la relación:

$$k = \Phi_v / E_{ind} \tag{2}$$

Si Φ_{vN} es el flujo luminoso de la lámpara patrón y $E_{ind,N}$ es la iluminancia indirecta de esta misma, se tendrá:

$$\Phi_v = \Phi_{vN} \cdot E_{ind} / E_{ind,N} \tag{3}$$

Como la relación de iluminancia es proporcional a las señales de salida, se puede usar la siguiente relación para determinar Φ_λ .

$$\Phi_\lambda = \Phi_{\lambda N} \cdot Y_\lambda / Y_{\lambda N} \tag{4}$$

Donde Y_λ es la señal de salida por longitud de onda de la lámpara de trabajo y $Y_{\lambda N}$ es la señal de salida por longitud de onda de la lámpara patrón.

El valor de k no es el mismo para una lámpara patrón como para una de trabajo y es debido a que todo cuerpo dentro de la esfera absorbe luz, y al ser las lámparas distintas (la de patrón y trabajo), sockets y otros elementos que las diferencian, absorberá diferentes partes del espectro. Para corregir el error se introduce una lámpara auxiliar, y se realiza una medida Y_H con esta encendida y con la lámpara de trabajo apagada. Se hace lo mismo con la lámpara patrón Y_{HN} . Estas dos medidas permiten corregir la diferencia de absorción entre ambas lámparas.

Como se debe tener el mismo flujo luminoso de la lámpara auxiliar y k depende del medio y no de la luz, se tiene las siguientes ecuaciones:

$$k_1 = \Phi_{vN} / Y_N \tag{5} \quad k_1 = \Phi_{v Aux} / Y_{HN} \tag{6}$$

$$k_2 = \Phi_v / Y \tag{7} \quad k_2 = \Phi_{v Aux} / Y_H \tag{8}$$

Por tanto:

$$\Phi_v = \Phi_{vN} \cdot (Y / Y_N) \cdot (Y_{HN} / Y_H) \tag{9}$$

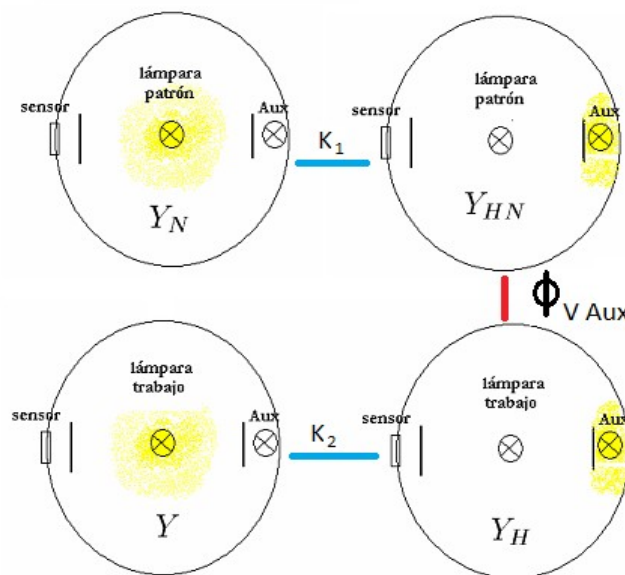


Figura 2- La figura muestra los diferentes momentos de encendido de las lámparas para tomar las señales que permiten determinar el flujo usando la comparación con la patrón y con la corrección de absorción.

2. TIPOS DE LÁMPARAS

Las luz de fuentes incandescentes son generalmente de espectro continuo como muestra la figura 1

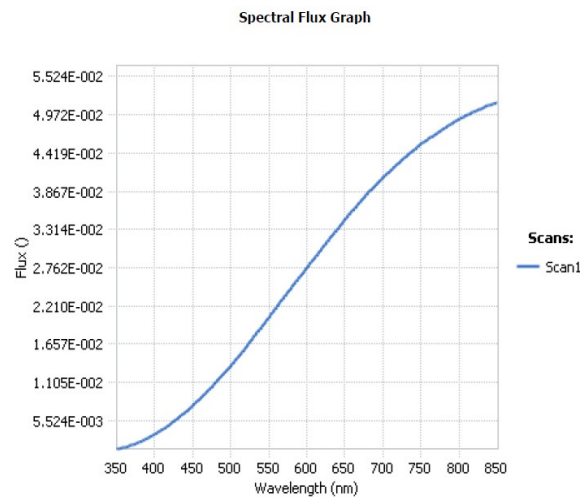


Figura 3- Espectro de una lámpara incandescente halogena de 75W medido en un espectrómetro CDS-1100 (Lab. FC-UNI E0_EIKO1_081222).

Las lámparas de descarga, que funcionan en base a la ionización de gases nobles con elementos metálicos, poseen picos en sus espectros debido a las particularidades de los niveles moleculares del compuesto gaseoso. En la Fig.4 se muestra el espectro típico de una lámpara halogenuro metálico. La iluminación pública y la de reflectores usan generalmente lámparas de sodio y halogenuro metálico, que poseen también un espectro discontinuo.

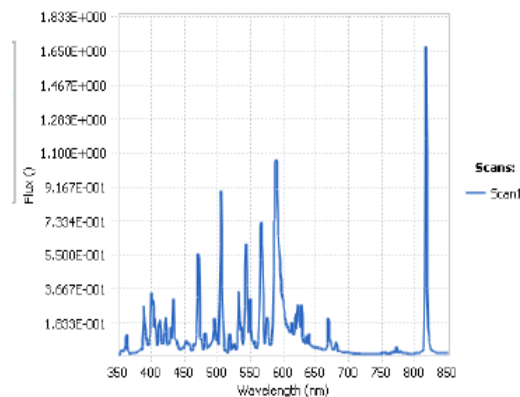
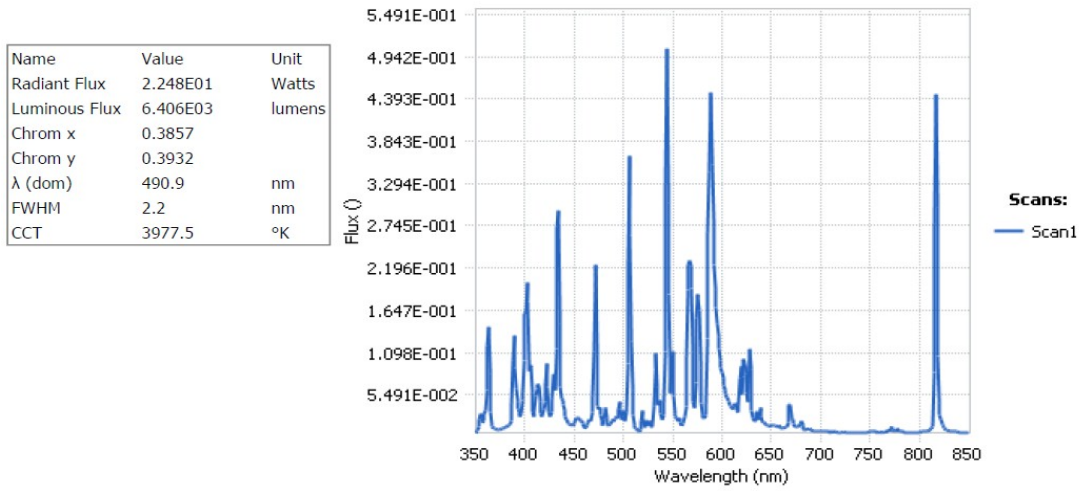


Figura 4- Espectro de una lámpara de halogenuro metálico de 16 000lm medido en un espectrómetro CDS-1100 (Lab. FC-UNI. 150_081028).

La intensidad de luz es proporcional a la cantidad de fotones que captan los sensores por longitud de onda. Cuando una lámpara tiene un mayor flujo luminoso, este emite mayor cantidad de fotones, estimulando en menor tiempo a los sensores que una lámpara con el mismo gas pero de menor flujo.

2.1 Determinación de la saturación del espectrómetro.

Al realizar el procedimiento descrito en la sección anterior para medir el flujo de las lámparas de descarga de halogenuro metálico con quemador de cuarzo (HMQ) de 70W, 150W y 250W, se obtiene los siguientes espectros.

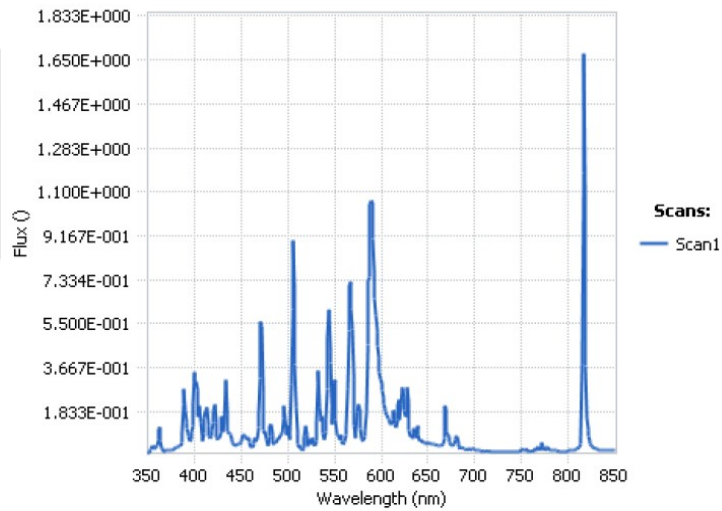


(a)

Spectral Results

Name	Value	Unit
Radiant Flux	5.939E01	Watts
Luminous Flux	1.674E04	lumens
Chrom x	0.407	
Chrom y	0.4003	
λ (dom)	491.8	nm
FWHM	1.9	nm
CCT	3537.8	°K

Spectral Flux Graph

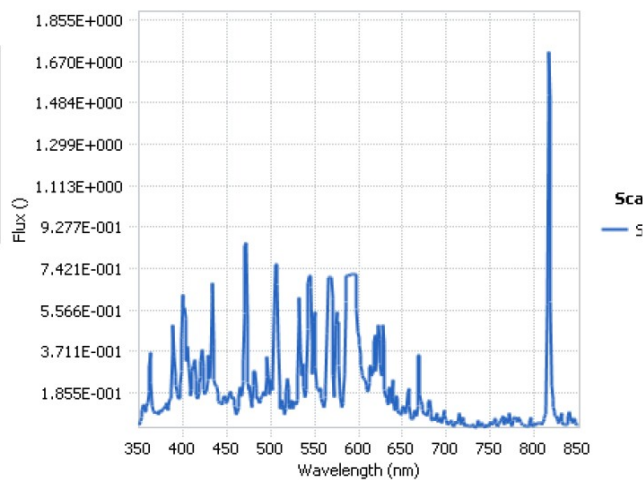


(b)

Spectral Results

Name	Value	Unit
Radiant Flux	1.037E02	Watts
Luminous Flux	2.517E04	lumens
Chrom x	0.3691	
Chrom y	0.3727	
λ (dom)	576.9	nm
FWHM	2.0	nm
CCT	4293.4	°K

Spectral Flux Graph



(c)

Figura 5- Lámpara HMQ de 70W (a), 150W (b) y 250W (c) (medidas Lab. FC-UNI. 70/150/250_081028).

Se observa que a medida que se aumenta la potencia de las lámparas los picos del espectro entre los 500 a 600nm disminuye inversamente a la potencia de la lámpara, además la proporción de estos picos en comparación con el pico que ubicado entre los 810 a 820 nm, no se conserva entre espectro y espectro. Y si comparamos la formación de picos, estos se dan en las mismas longitudes de onda para las diversas lámparas. Normalizamos las diversas curvas en función al área bajo ellas, con la finalidad de ver con mayor resolución del espectro y las comparamos entre si.

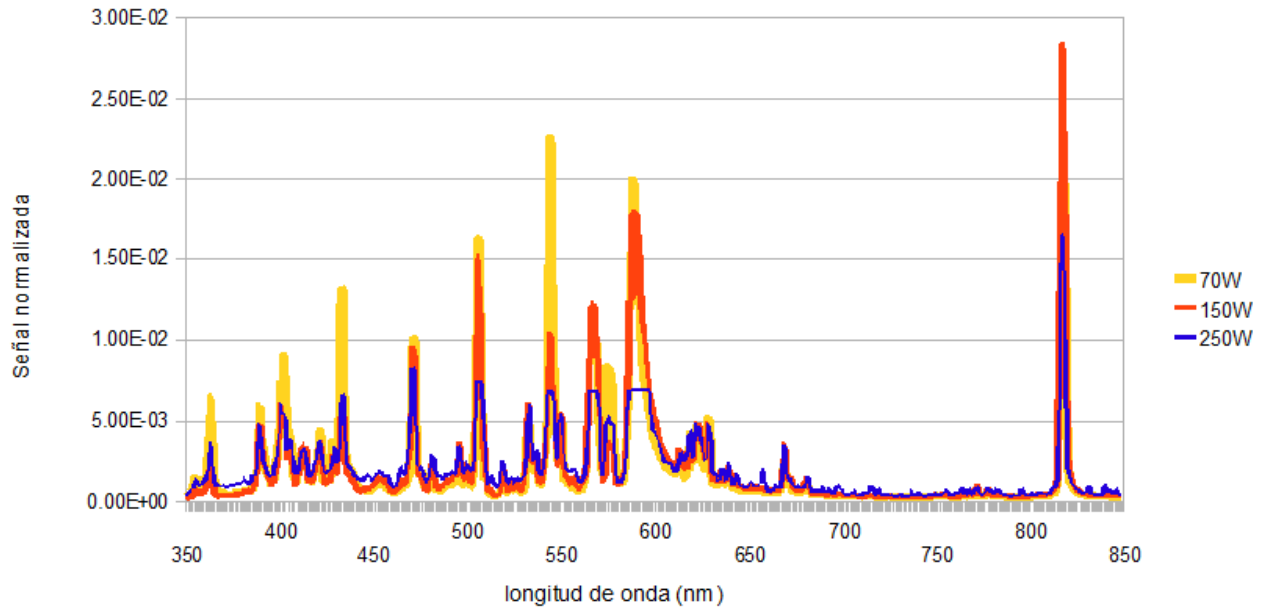


Figura 6-Superposición de espectros normalizados. (Datos de archivos XML generados por el programa MetraLight en las mediciones de HMQ de 70W, 150W y 250W)

Este análisis nos demuestra que poseen el mismo gas, mas la intensidad radiada por longitud esta cambiando para cada potencia en los picos más pronunciado. Entonces existe la posibilidad que la reducción del tamaño de los picos espectrales es debido a una saturación de los sensores del espectrómetro para determinadas longitudes de onda, obligando a un reseteo del mismo y contabilizando menor intensidad. Para descartar una posible saturación del equipo se procedió a disminuir la señal que recibe el espectrómetro para la misma lámpara, y comparar dichos espectros. Para ello reducimos la apertura a la esfera satélite. La apertura original se denomina E0 y las de aperturas de mayor a menor son E2, E3 y E4. Superponiendo las curvas espectrales normalizadas, se obtiene la siguiente gráfica.

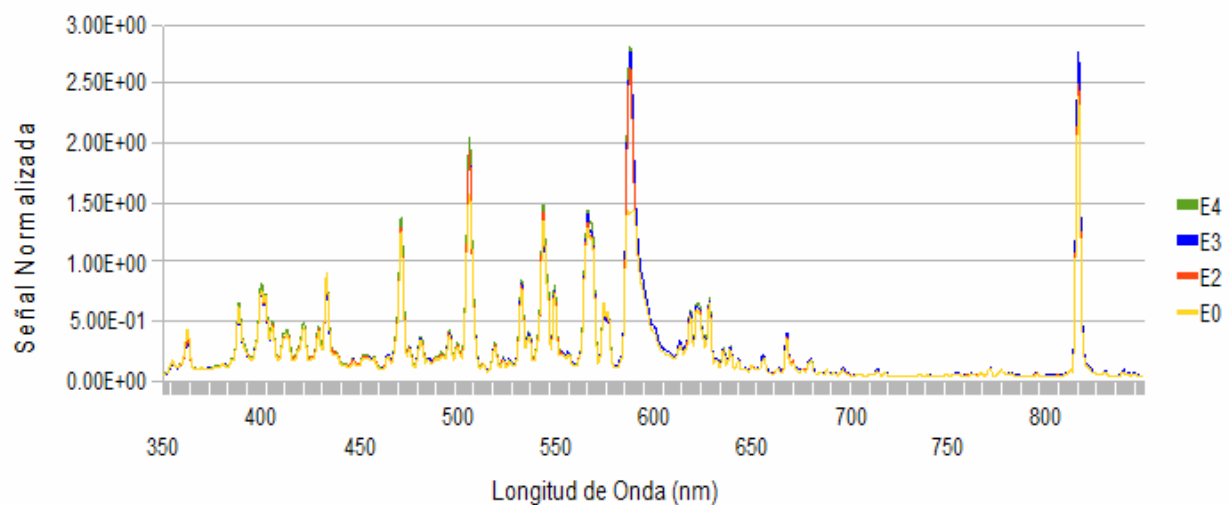


Figura 7- Superposición de curva espectral normalizada E0, medida sin disminución de señal, E2, E3 y E4, disminución progresiva de la intensidad a medir. Lámpara HMQ de 250W (Lab. FC-UNI. E0, E2, E3 y E4_Yamin250_Patron1).

El espectro debe ser el mismo pero se observa que la medida de los picos más intensos (500nm y 600nm) son recortados cuando el sensor recibe señales muy intensas (E0 y E2) mas la grafica para el caso de E3 y E4 son iguales. Este resultado es la que demuestra que el equipo incurrirá en errores cuando se mide fuentes luminosas muy intensas.

3. DESARROLLO DEL MÉTODO DE MEDICIÓN

3.1 Adaptación de la esfera integradora

Los componentes básicos del sistema de medición están constituidos por la esfera madre de 1m de diámetro que contiene las lámparas que deseamos medir, la esfera satélite que realiza una segunda homogenización de la luz y finalmente el espectrómetro que recibe la luz a través de una fibra óptica Fig.8.

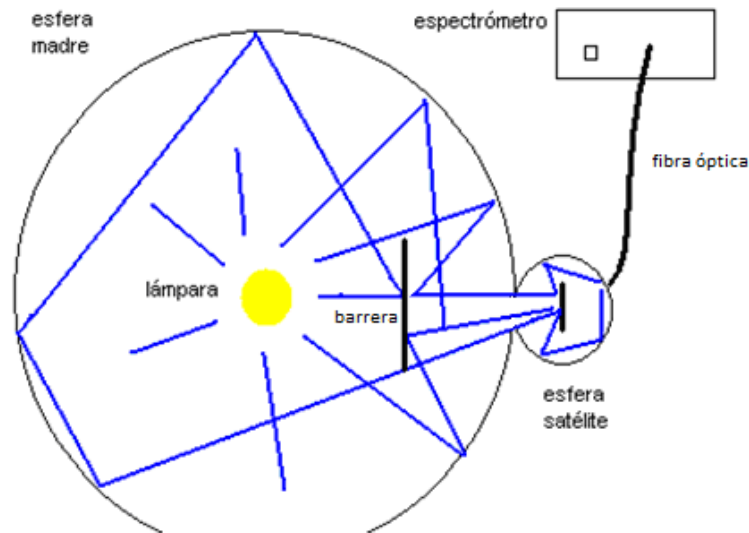


Figura 8- Esquema de la esfera integradora madre conectada a la esfera integradora satélite y a través de la fibra óptica al espectrómetro.

Para reducir la cantidad de luz que ingresa al espectrómetro y evitar la saturación del equipo en determinadas longitudes de onda, se redujo el área de ingreso de luz a la esfera satélite, haciendo uso de anillos planos (llamados desde el momento máscaras) con orificio de diferentes áreas y así obtener una relación de área de apertura contra señal medida. Esta máscara debe de evitar dañara el recubrimiento de pintura de la esfera, además que cualquier estructura de soporte no debe afectar la distribución geométrica de la esfera satélite, ya que por ser de dimensiones pequeñas (3cm de radio), cualquier cuerpo de dimensiones de mas de 1cm dentro de ella generará absorciones considerables.

Se consideró dos soportes paralelepípedos (0,5 cm de longitud mayor) a un ángulo de 120° y 0.9cm de distancia del centro para que calce dentro del hoyo Fig. 9.

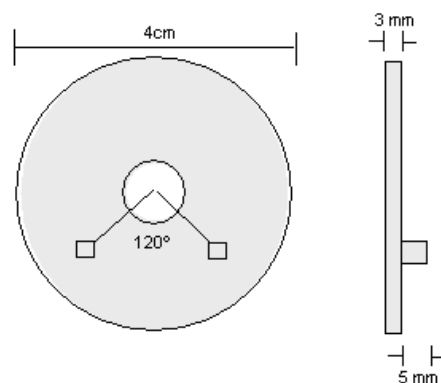


Figura 9-Dimensiones de la máscara

Las máscaras son de acrílico negro revestidos con tres capas de Spray y se las denominó A1 a A8, y donde A0 es la abertura original a la esfera satélite.

Tabla1-Dimensiones de abertura de las máscaras usadas y la proporción con el orificio original de la esfera satélite. (Incertidumbre de 0.025mm)

máscara	diámetro (cm)	área (cm ²)	en relación a A0
A0	2,00	3,14	1
A1	1,60	2,01	0,64
A2	1,35	1,43	0,46
A3	1,15	1,03	0,33
A4	0,96	0,72	0,23
A5	0,69	0,37	0,12
A6	0,55	0,24	0,08
A7	0,50	0,2	0,06
A8	0,38	0,11	0,04

Este anillo debería ser completamente revestido con pinturas blancas de alto índice de reflexión, similar a la pintura de la esfera integradora que posee 98% de índice de reflexión.

Se utilizó dos pinturas, la primera fue una pintura en polvo y secado al horno usado en luminarias de alta calidad que denominaremos Josfel y la segunda opción fue pintura blanca en Spray (Tolueno, Xileno y Acetona). Se midió la reflectancia difusa de estas pinturas para determinar la más óptima para la adaptación. Para obtener resultados en cada longitud de onda del rango visible se usa una fuente de espectro continuo que en este caso fue una halógena de 75W.

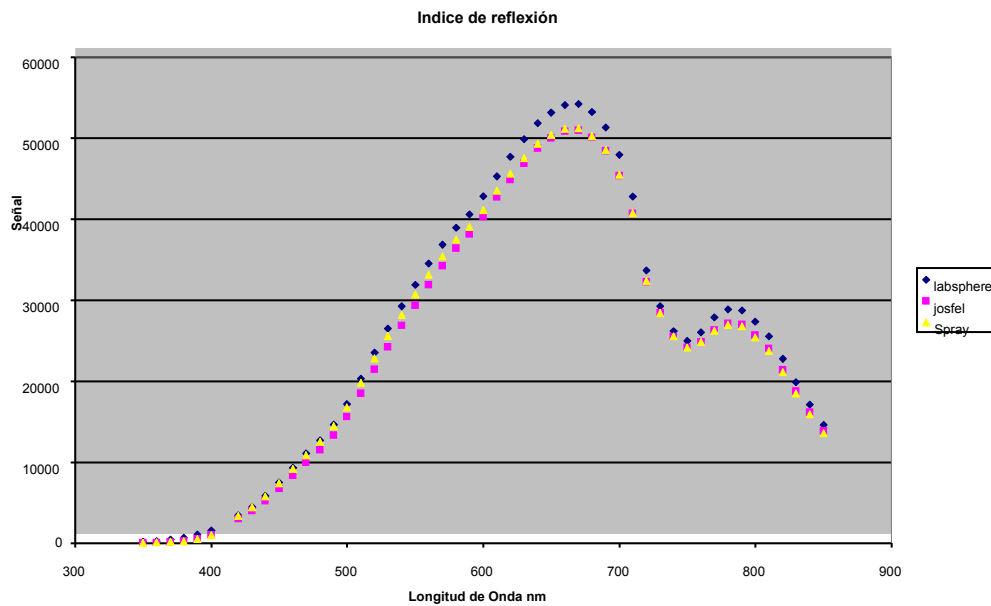


Figura-10 Comparación de espectros de luz reflejada por superficies blancas de Labsphere, Josfel y Spray.

Para medir la señal de la reflexión difusa se hizo uso de una pequeña esfera integradora de 5cm de diámetro, con una distribución según el siguiente esquema Fig. 11.

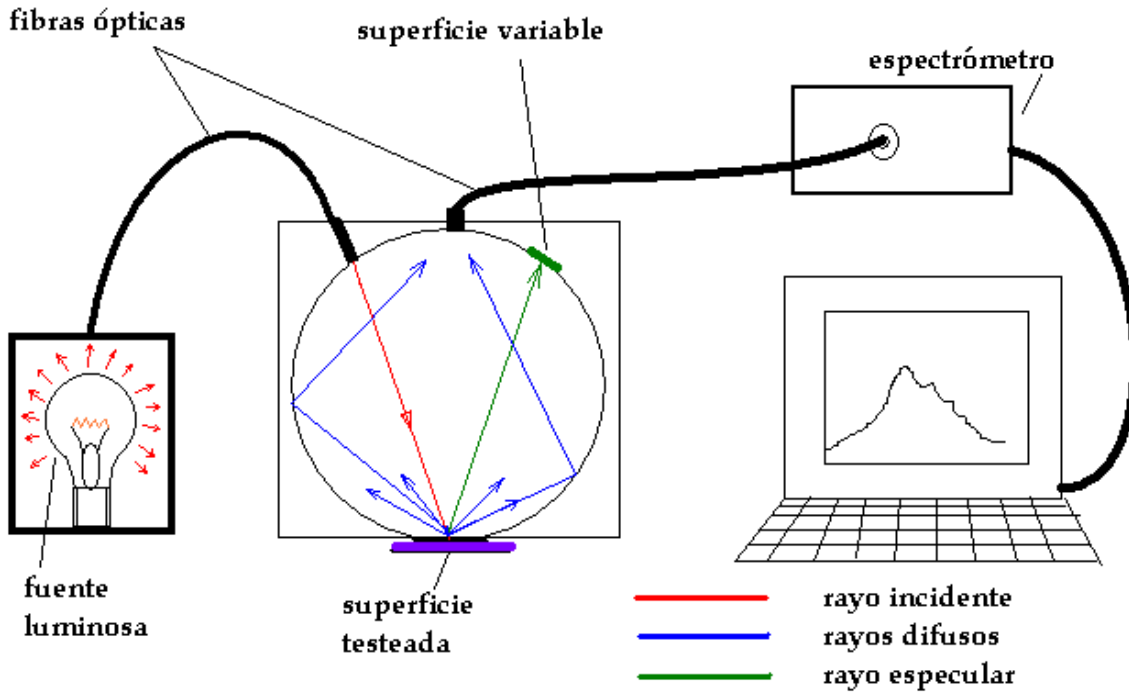


Figura 11-Esquema usado para medir reflectancia difusa de diversas superficies.

La superficie que se indica como variable se puede cambiar de negro si deseamos eliminar la reflexión especular o blanco si deseamos medirla. En nuestro caso nos interesa más la reflexión difusa ya que la superficie debe ser la mas granulada posible.

Podremos determinar la capacidad reflectiva de las pinturas Josfel y del Spray usando como referencia el espectro obtenido con la pintura Labsphere. El programa LightMtrX y el espectrómetro nos permite obtener señal por cada nanómetro desde 350 nm hasta 850nm. Como se conoce que el índice de reflexión de la pintura de Labsphere es de 98%, el área que determina esta curva (entre 350nm-750nm) será equivalente a esta, y por simple relación de áreas se determina el índice de reflexión de las otras pinturas.

Como el área de la curva es en buena aproximación equivalente a la suma de cada señal por nanómetro de longitud de onda entonces se cumple.

$$I_x = \frac{\sum_{n=350}^{750} Y_x(n)}{\sum_{n=350}^{750} Y_{labsphere}(n)} (I_{labsphere}) = \frac{\sum_{n=350}^{750} Y_x(n)}{\sum_{n=350}^{750} Y_{labsphere}(n)} (98\%)$$

Según esto se obtiene:

$$I_{Josfel} = 91,6\%$$

$$I_{Spray} = 93,8\%$$

La ubicación de las máscaras se muestra en la Fig. 12. La limpieza y cuidado debe ser estricto, para evitar ensuciar la pintura altamente reflectante. Cualquier suciedad en la esfera cambia el parámetro k , y genera errores que en algunos casos contribuyen al error en más del 1%

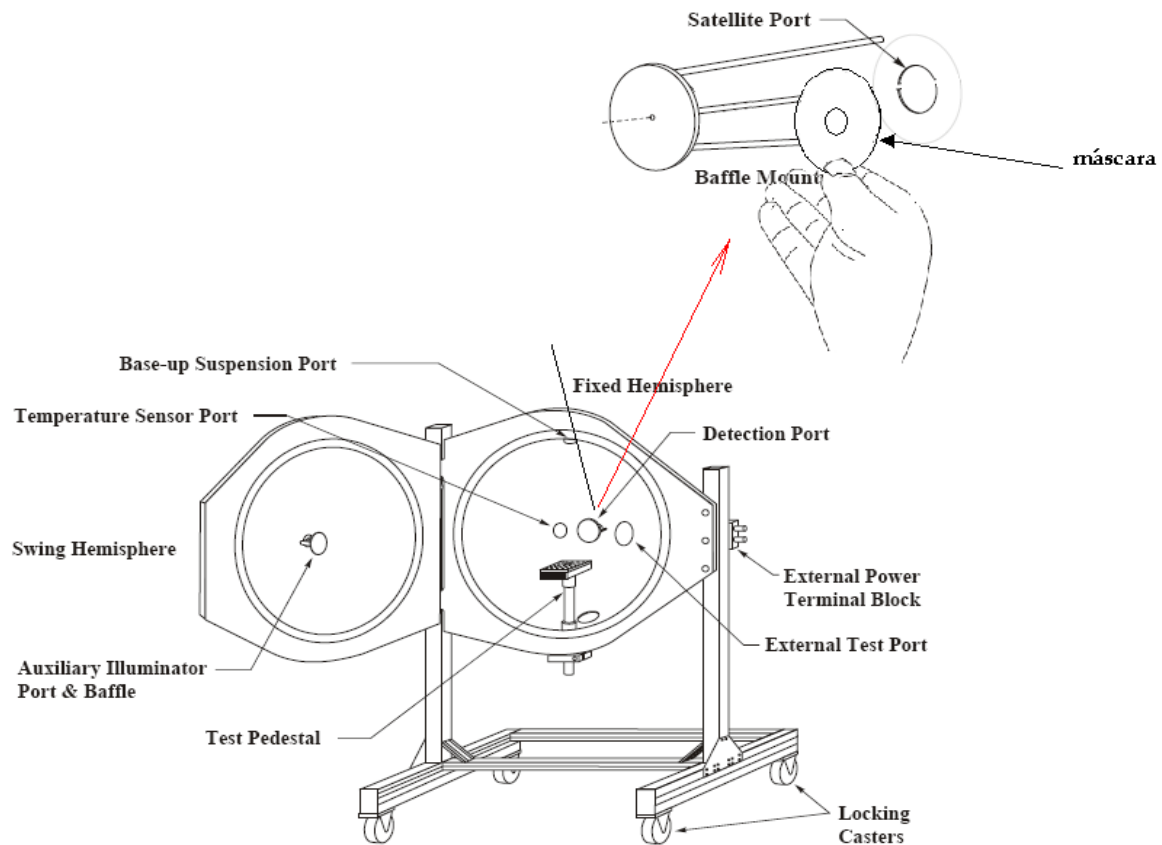


Figura-12 Ubicación de la máscara en la esfera

3.2 Cálculo de medición

Antes de realizar la medida de la lámpara de descarga de 250W se debía hacer mediciones de lámparas cuyos datos sean perfectamente conocidos y que se hayan medido en condiciones normales, por lo que debían ser lámparas de flujos menores a los 10000 lm y preferible y de potencias por debajo de los 150W, ya que sus picos espectrales son muy altos que inician a saturar al espectrómetro. Se escogió una lámpara incandescente halógena de 75W denominada Eiko1 y una lámpara fluorescente compacta de 20 W denominada Ref3, usada en el cuarto informe al MINEM (Procedimiento de Evaluación del flujo luminoso de luminarias compactas-Curto informe final para el Ministerio de Energía y Minas ,2008). Se usa una incandescente y fluorescente por la diferencia de sus espectros.

Cuando no se mide sin corrección de absorción se denomina señal pura. En esta parte del trabajo se determinó la relación entre la señal pura y el área por la que pasa la luz a la esfera integradora satélite, los datos obtenidos fueron:

Tabla2. Flujo luminoso de Eiko1, Ref3 y sus relaciones normalizados contra relación de área de exposición.

máscara	Relación de áreas de exposición	Eiko1		Ref3	
		Flujo luminoso (lm±4,5%)	normalizados	Flujo luminoso (lm±4,5%)	normalizados
A0	1	1421	1	573.1	1
A1	0.64	690.7	0.49	282	0.49
A2	0.46	490.2	0.34	199.7	0.35
A3	0.33	376.7	0.27	153.7	0.27
A4	0.23	253.5	0.18	105.5	0.18
A5	0.12	124.5	0.09	53.35	0.09
A6	0.08	78.9	0.06	34.74	0.06
A7	0.06	53.66	0.04	24.51	0.04
A8	0.04	27.76	0.02	11.6	0.02

Se hace una tendencia lineal de los datos normalizados de cada lámpara de A1 a A8 versus relación de áreas de exposición, como se observa en la Fig.13.



Figura13-Curva de tendencia del flujo luminoso (lm) vs relación de áreas de exposición Eiko1 y Ref3.

Según la Fig. 13 para ambas lámparas, la dependencia lineal del flujo luminoso normalizado contra el área de exposición es la misma ($f(x)=0,78x$), es decir que no importa el tipo de espectro, el comportamiento por la disminución del flujo mantiene la misma tendencia. Ahora si usamos la ecuación de la curva que se muestra en la Fig. 13 para determinar el flujo de las lámparas de mayor flujo como la lámpara de 250W halogenuro metálico, se debe comprobar primero unos cálculos que las relacione.

Asumamos que desconozco el valor del flujo de Ref3 en A0 o medición ordinaria y utilizo como referencia los datos de Eiko1, para determinar dicho valor (Entre las razones por las que se escoge la EIKO1 como referencia es por el espectro continuo en el visible, que posee y permite analizar cualquier espectro). Entonces armamos la siguiente relación.

Tabla3. Cálculo del flujo luminoso de Ref3 usando como referencia los flujos de Eiko1 con las diversas máscaras.

máscara	Flujo medido (lm±4,5%)		flujo calculado
	Eiko1	REF3	1421xRef3/Eiko1
A0	1421		
A1	690.7	282	580.17
A2	490.2	199.7	578.89
A3	376.7	153.7	579.79
A4	253.5	105.5	591.38
A5	124.5	53.35	608.92
A6	78.9	34.74	625.67
A7	53.66	24.51	649.06

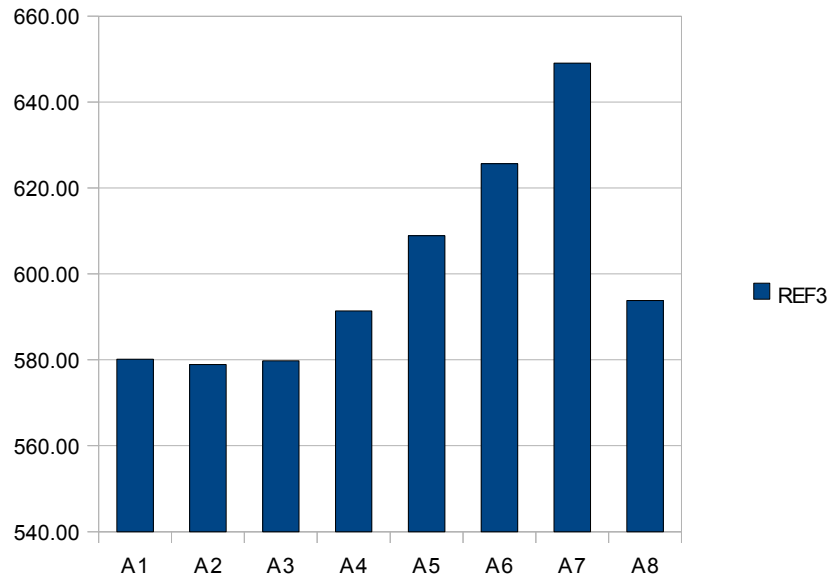


Figura-14 Fluxes of Ref3 calculated by each mask.

La Fig.14 muestra que los resultados de Ref3 que más relación guardan con el valor real (valor medido de Ref3 según procedimiento ordinario $573\text{lm} \pm 4,5\%$) son las medidas con máscaras A1 a la A4, cuyos flujos están entre 105-282 lm como se observan en la Tab.3 y que nos permite sacar un valor promedio calculado de 582lm que está en dentro del error de medición de la esfera.

Vale recalcar, que no se puede hacer mediciones ordinarias de la lámpara de halogenuro metálico con quemador de cuarzo de 250W, por la sobresaturación del espectrómetro, procedemos a medir su flujo haciendo uso de las máscaras, y calculamos el flujo según la propuesta anterior.

Tabla-4. Cálculo del flujo luminoso de HM250W usando como referencia los flujos de Eiko1 con las diversas máscaras.

máscara	Flujo medido ($\text{lm} \pm 4,5\%$)		flujo calculado
	Eiko1	HM250W	$1421 \times \text{Ref3} / \text{Eiko1}$
A0	1421		
A1	690.7	13100	26951.06
A2	490.2	6380	18494.45
A3	376.7	4395	16578.96
A4	253.5	2414	13531.73
A5	124.5	1206	13764.87
A6	78.9	760.7	13700.31
A7	53.66	543.9	14403.32
A8	27.76	272.6	13954.06

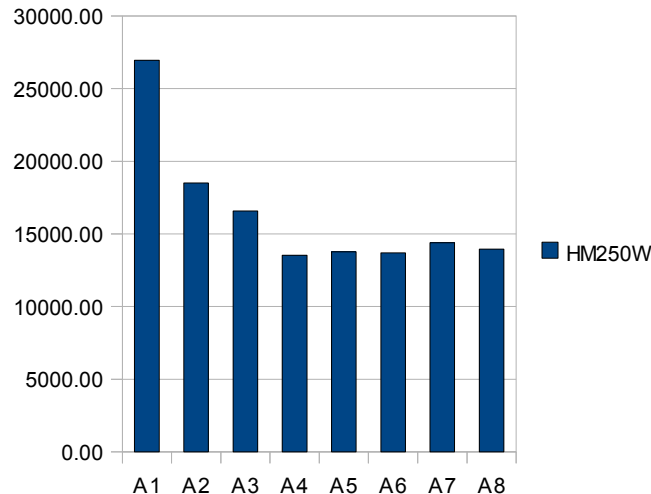


Figura-15 Flujos de HM250W calculado por cada máscara.

La Fig.15 muestra que las medidas de mayor coherencia en sus resultados son desde la máscara A4 hasta A8 cuyos flujos medidos son desde 272-2414 lm según Tab. 4, y obteniendo un flujo luminoso promedio de 13872 lm.

Se puede concluir además que para flujos mayores a los 2500lm (para máscaras A3, A2, A1 y A0) y espectros muy discontinuos que contengan picos pronunciado el equipo genera errores considerables. Entonces si deseamos medir lámparas muy potentes la máscara a usar debe permitir reducir el área de exposición hasta obtener flujos que estén entre los 100 a 2000 lm , ya que es menos probable incurrir en errores al medir flujos de estas intensidades, ya sea porque se sature el equipo o el tiempo de exposición, (el tiempo de exposición es determinado automáticamente por el espectrómetro, dependiendo de la intensidad de la lámpara) sea muy largo por la baja intensidad.

Estos resultados nos permiten, por el momento, concluir que la relación de la variación del área respecto a la señal tiene una tendencia lineal y si deseamos medir flujos luminosos muy elevados, hay que reducir la exposición a valores tales que el equipo mida entre 100lm y 2500lm, pudiendo aplicar la aproximación sugerida.

Agradecimientos

Al Dr. Manfred Horn por su constante asesoramiento y al Ing. Alejandro Lengua por el constante apoyo.

REFERENCIAS

- CIE 84, 1989. The Measurement of Luminous Flux, Technical Report.
 Emilio Gómez Gonzáles, 2006. Guía Básica de Radiometría y Fotometría, ESI Universidad de Sevilla.
 Laboratorio de energía solar Facultad de Ciencias y Centro de Energías Renovables de la Universidad Nacional de Ingeniería, 2008. Procedimiento de Evaluación del flujo luminoso de luminarias compactas-Curto informe final para el Ministerio de Energía y Minas
 Coaton Mariden, 1997. Lamps and Lighting, New York.

ADAPTATION OF A INTEGRATING SPHERE SPECTROPHOTOMETER TO HIGH LIGHT FLOWS

Abstract *The extensive use of discharge lamps generates the need for the analysis of the calorimetric and light quality of them. This paper analyzes the unique features of these lamps that keep us from making direct measurements mostly of higher power lamps to 150W metal halide. The photometry's laboratory at the UNI has an advanced metering equipment with a integrating sphere and a spectrometer, producing excellent results for light sources of a continuous spectrum up to 300W and dimensions lesser than 40 cm, but not for higher power light sources above 150W and with discontinuous spectrum (with spectral peaks) and / or sources of dimensions greater than 40cm. To reach satisfactory measurement, a sequential reduction of luminous flux is made, reducing the area of exposure to the spectrometer to generate a trend curve of the measured signal from the exhibition area. In this way, we can measure the photometric properties of high power discharge lamps.*

Key words: *Photometry, integrating sphere, metal halide lamp.*