

## Medición del flujo luminoso y de parámetros colorimétricos de lámparas usadas en sistemas fotovoltaicos

José Rabanal P.<sup>1</sup>, Julio Rabanal R.<sup>2</sup>, Fernando Quijandría D., Miguel Ramos V. y Manfred Horn M.<sup>3</sup>

Laboratorio de Fotometría, Facultad de Ciencias,  
Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú ;  
<sup>1</sup>jrabanalp@uni.pe, <sup>2</sup>jarr40@hotmail.com, <sup>3</sup>mhorn@uni.edu.pe

### RESUMEN

La generación de luz representa el principal uso de la electricidad obtenida con Sistemas Fotovoltaicos Domiciliarios (SFD). Para optimizar este uso es esencial usar lámparas de alta eficiencia.

En este contexto el presente trabajo hace una descripción de las nuevas facilidades, únicas en el Perú, que ofrece el Laboratorio de Fotometría de la UNI, en particular para evaluar la eficiencia luminosa de lámparas fluorescentes compactas usadas en SFD. Estas facilidades incluyen, entre otras, una esfera integradora de 1m de diámetro y un espectrofotómetro, y permiten medir el flujo luminoso total de lámparas (medido en lumen) con una incertidumbre menor de 4,7 % (mayormente correspondiendo a la incertidumbre de 3,1% de la lámpara patrón). También permite medir parámetros colorimétricos, como la temperatura de color y el coeficiente de rendimiento de color. Adicionalmente se dispone de un goniófotómetro que permite medir la distribución espacial de la luz.

Como ejemplo se presentan los resultados de las mediciones realizadas con lámparas fluorescentes compactas de 12 V DC y de 7, 11 y 15 W nominales: la dependencia de la potencia eléctrica y del flujo luminoso de la tensión en el rango de 11 – 15 V, de la temperatura ambiente en el rango de 20 – 25 °C y de la posición de la lámpara (parada o colgada). Las eficiencias luminosas de estas lámparas están en el rango de 40 – 67,5 lumen/watt. Estas mediciones fueron comparadas con las medidas, de las mismas lámparas, en los laboratorios de la USP de Brasil y del CIEMAT de España, obteniendo valores similares y dentro del rango de incertidumbre indicado.

### 1. Introducción

El flujo luminoso de una lámpara puede medirse con un fotogoniómetro: con un luxímetro (que mide la irradiancia fotópica, en lux) se mide a una cierta distancia de la lámpara la irradiancia para todas las direcciones. Por otro lado, si no interesa la distribución espacial de la radiación sino solamente el flujo fotópico total de la lámpara (medido en lumen), es conveniente usar una esfera integradora y comparar el flujo luminoso de una lámpara con el flujo luminoso de una lámpara estándar de flujo luminoso conocido. La técnica de sustitución consiste en colocar sucesivamente la lámpara ensayada y la lámpara estándar en la misma posición dentro de la esfera integradora. Luego se mide la iluminación indirecta sobre la superficie interior de la esfera. Esta medida es proporcional al flujo luminoso. Ambos métodos están implementados en el Laboratorio de Fotometría de la UNI.

### 2. Características técnicas del equipo de fotometría de la UNI

El equipo principal fue adquirida de la empresa Labsphere e incluye una esfera integradora, lámpara estándar, lámpara auxiliar para corregir la autoabsorción por la misma lámpara, un espectrofotómetro, fuentes de poder, software e instrumentos de medición eléctrica. Las principales características están indicadas a continuación.

## 2.1 Esfera integradora

Las principales características técnicas de la esfera integradora Labsphere, modelo LMS-400, de 1 m de diámetro y de las lámparas que se pueden medir, son :



Fig.1 Esfera integradora

Rango espectral efectivo	300-2400 nm
Reflectancia del recubrimiento	96-98 % a 600 nm
Tipo de socket (con soportes)	E27, E10, pins, otros*
Longitud máxima de la lámpara	61cm
Potencia máxima de la lámpara	1500W
Flujo luminoso mínima	0,5 lm
Flujo luminoso máximo	30 000 lm

\*Posibilidad de montar otro tipo de socket y soporte.

**Tabla 1.** Características de las lámparas que se pueden medir

## 2.2 Fuentes de alimentación

- ❖ Para las lámparas patrón y auxiliar se tienen las fuentes Labsphere LPS-100 y LPS-150, cuyas características se muestran a continuación.

	LPS-100-0307	LPS-150-0268
Potencia nominal suministrada	40W	75W
Corriente DC regulada	3,07 A	2,68 A
Exactitud (corriente)	± 0,1 %	± 0,1 %
Estabilidad (corriente)	± 0,1 %	± 0,1 %

**Tabla 2.** Especificaciones técnicas de las fuentes para lámparas tipo patrón y auxiliar.

- ❖ Para lámparas de prueba se cuenta con fuentes de poder con esas características:

	Gwinstek GPR 1810HD (Con selector de corriente o voltaje constante)
Rango de voltaje	0 – 24 V
Rango de corriente	0 – 4 A
Estabilidad (evaluada experimentalmente)	± 20 mV

**Tabla 3.** Características técnicas del tipo de fuentes Gwinstek para lámparas de prueba.

Las medidas de voltaje y corriente se realizan usando:

- Multímetro Fluke, modelo 45, con dualdisplay de 5 dígitos, para medir la corriente y voltaje de las lámparas a evaluar, Incertidumbre ± 0,003% (con certificación).
- Shunt: Bader 100 mΩ ± 0,1%

## 2.3 Condiciones ambientales

El Laboratorio de Fotometría cuenta con aire acondicionado, con un rango de 18°C a 30°C y ± 0.5°C, y un deshumecedor que evita altos valores de humedad relativa. Éste se mantiene en niveles menores a 65%.



Fig.2 Instrumentos del fotómetro

## 2.4 Lámpara patrón (modelo SCL-1400)

El modelo SCL-1400 es una lámpara halógena de tungsten calibrada espectralmente. Su certificado de calibración verifica su trazabilidad hasta el NIST e indica que tiene un flujo luminoso de 1638 lm +/- 3,1%, con una certeza del 95%.

### 2.5.1 Espectrómetro – Labsphere modelo CDS 1100

A continuación se listan sus características técnicas principales.

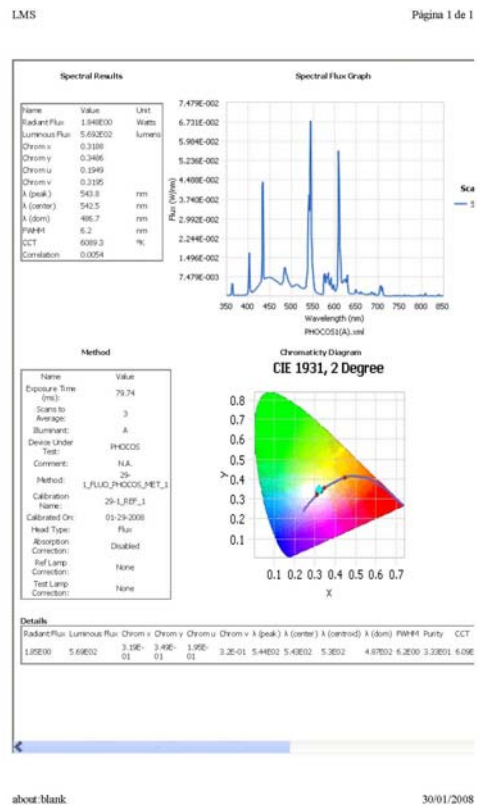
Detector	TE cooled 1044x64 CCD (back thinned)
Rango espectral	350 - 850 nm
Resolución espectral	≤2nm
Tiempo de integración	10 ms – 60 s
Rango sensible radiométrico	$2 \times 10^{-7}$ - $20 \text{ W/m}^2 \cdot \text{nm}$ a 600 nm
Sensibilidad en 1seg de tiempo de integración	$4 \times 10^{-6} \text{ W/m}^2 \cdot \text{nm}$ a 600 nm
Exactitud espectroradiométrica	± 5 %
Exactitud de cromaticidad (x,y)	< ± 0,001

**Tabla 4.** Especificaciones técnicas del espectrómetro CDS 1100

## 2.6. Propiedades de lámparas que se puede medir

Con el equipo descrito se puede obtener la siguiente información de una lámpara ( a la derecha se presenta un ejemplo de resultados):

- Flujo radiante (en Watt)
- Flujo luminoso (en lumen)
- Coordenadas de cromaticidad (x,y)
- Coordenadas de cromaticidad (u,v)
- Información de longitudes de onda: pico, media, centroide y dominante.
- Full Width at Half Maximum-FWHM (Ancho a media altura)
- Pureza espectral
- Correlated Color Temperature-CCT (Temperatura de Color)
- Color-rendering index (Indices de Rendimiento de Color)
- Valor promedio de los ocho primeros (CRI)
- Gráfica que muestra el flujo radiante espectral
- Diagrama de Cromaticidad de CIE (Y vs X) con la medida.



**Fig. 3** Ficha de mediciones

Con el goniofotómetro se puede medir adicionalmente:

- Distribución espacial de la iluminación de lámparas de socket E27.

### 3. Resultados de medición

Se indica aquí, como ejemplo, resultados de mediciones que se han realizado.

#### 3.1 Lámparas usadas

Las lámparas que se midieron fueron:

Marca	Modelo	Características referenciales	Socket	Código LF_UNI	Código de trabajo LF
SDC-M 7W	6400K	12Vcc 7W	E27	REF6691313-1	Ciemat-1
Pocos	CL1207C-2	12Vcc 11W	E27	REF6691313-2	Ciemat-2
Pocos	CL1215C-2	12Vcc 15W	E27	REF6691313-3	Ciemat-3
Pocos	CL1211C	12Vcc 11W	E27	USP 01	USP#01
Pocos	CL1215C	12Vcc 15W	E27	USP 02	USP#02

Tabla 5. Especificaciones de las lámparas usadas en los ensayos.



Fig. 4 Fotos de las lámparas usadas en los ensayos e intercambios. De izquierda a derecha: Ciemat-1, Ciemat-2, Ciemat-3, USP#01 y USP#2.

#### 3.2. Ensayos

##### 3.2.1 Variación del flujo, potencia y eficiencia con el voltaje

Se evaluó la dependencia de la corriente, potencia, flujo luminoso y eficiencia de cinco lámparas fluorescentes compactas (diferentes modelos) del voltaje a temperatura constante. Los resultados se muestran a continuación.

Como es de esperarse, para cada modelo de lámpara se encuentra una variación de la corriente con el voltaje diferente ya que esta depende de los circuitos electrónicos de cada una de ellas.

En el caso de la potencia (fig. 5), para todas las lámparas encontramos que esta varía aproximadamente de manera lineal con el voltaje siendo la lámpara USP02 la que muestra un comportamiento lineal más fuerte.

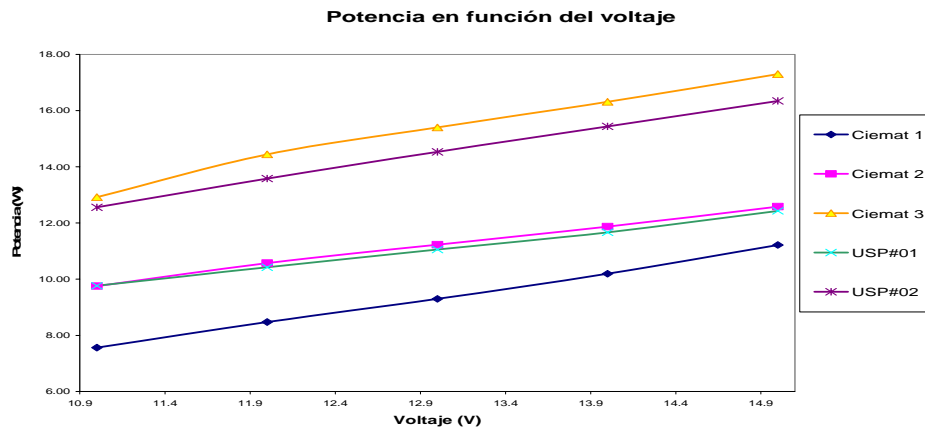
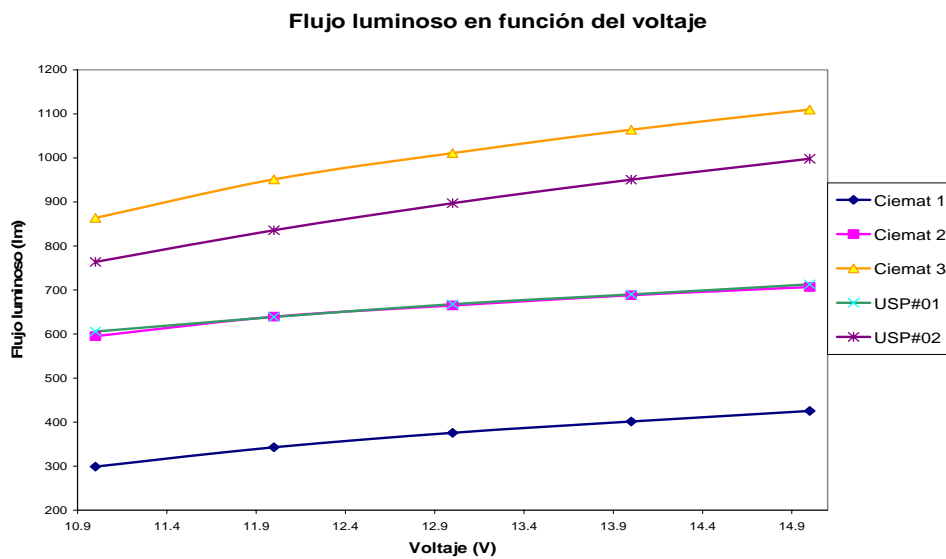


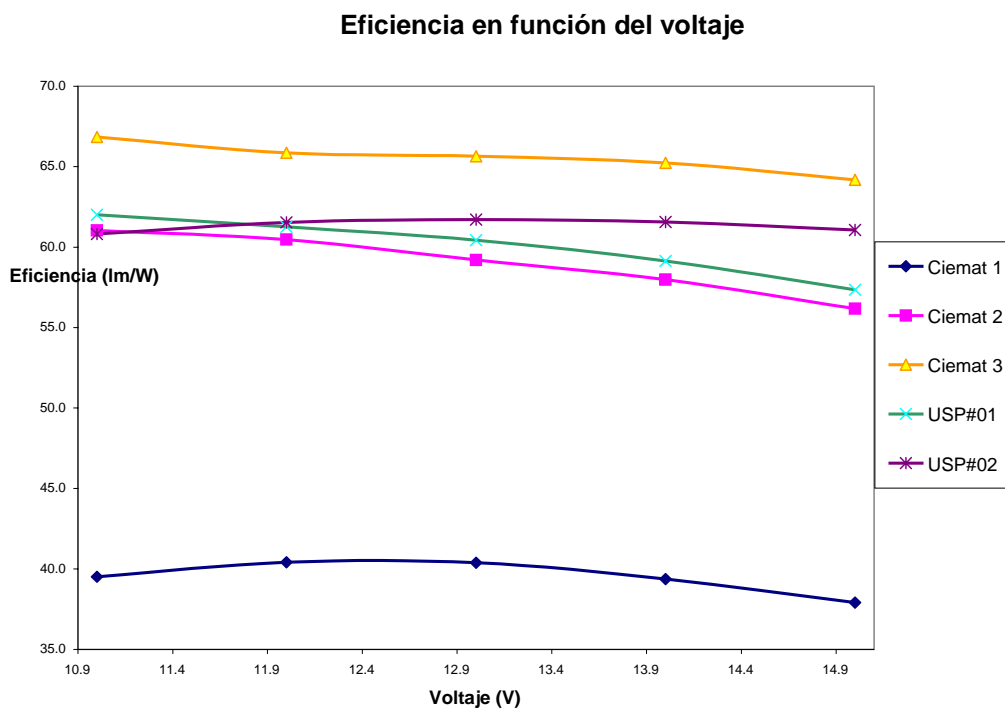
Fig. 5 Gráfico de la variación de la potencia para las cinco lámparas de prueba respecto al voltaje aplicado.

En el caso del flujo luminoso (fig.6), este se incrementa con el voltaje para todas las lámparas sin embargo los mayores incrementos se registran para las lámparas REF6691313-1 y USP02 que corresponden aproximadamente al 42% y 31% de los valores iniciales respectivamente.



**Fig. 6** Gráfico de la variación del flujo luminoso para las cinco lámparas de prueba respecto al voltaje aplicado.

Finalmente para la variación de la eficiencia (fig. 7) con el voltaje tenemos dos tendencias marcadas. La primera es una disminución con el voltaje mientras que la otra es el aumento hasta cierto valor para luego disminuir. En el caso de la primera tendencia la mayor caída la registran las lámparas USP01 y REF6691313-2 cuya eficiencia disminuye en un 8% entre 11 v y 15 V. Para la segunda tendencia, la lámpara USP02 oscila dentro de aproximadamente 1,5% mientras que la lámpara REF6691313-1 lo hace dentro de 3%.



**Fig. 7** Gráfico de la variación de la eficiencia para las cinco lámparas de prueba respecto al voltaje aplicado.

Si se quisiera escoger cual es la “mejor” lámpara entre las cinco medidas deberíamos considerar aquella cuya eficiencia así como su flujo luminoso sean las más altas y varíen menos con el voltaje. Desde un punto de vista económico la mejor lámpara sería la CIEMAT 3 pues su eficiencia es la más alta.

### 3.2.2 Dependencia del flujo luminoso en función de la temperatura ambiente

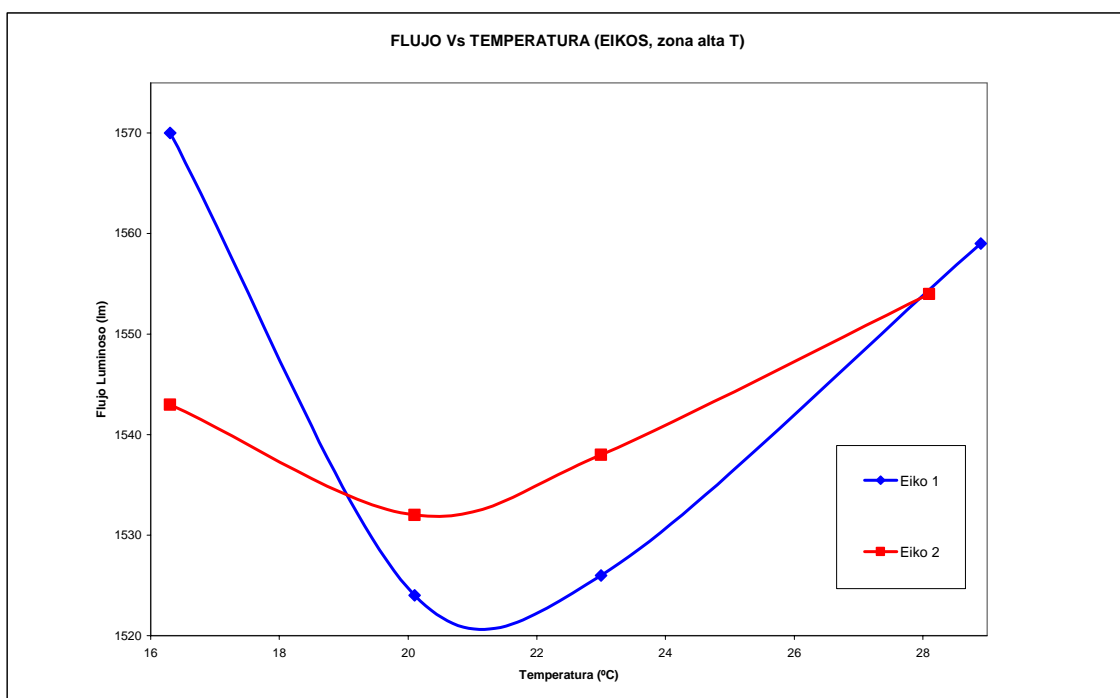
Este ensayo se realizó mediante dos procedimientos, el primero cambiando la temperatura de todo el laboratorio mediante el sistema de aire acondicionado con lo que obtuvimos un rango de medidas de 16°C a 26°C; y el segundo mediante un pequeño sistema de refrigeración arreglado para una única lámpara con el que se obtuvieron medidas en un rango más amplio, de 6.5°C a 26°C.

Hay que hacer notar que la misma temperatura y alimentación para una misma lámpara en los dos métodos no necesariamente resulta en una medida idéntica; esto presenta un error sistemático de medición ya que en el método del sistema de aire acondicionado la lámpara está dentro de la esfera integradora y ésta no recibe directamente ninguna corriente de aire acondicionado; en cambio, en el método del sistema de refrigeración pequeño la lámpara está directamente enfriada con una corriente de aire frío.

#### 3.2.2.1 Medidas usando el sistema de aire acondicionado

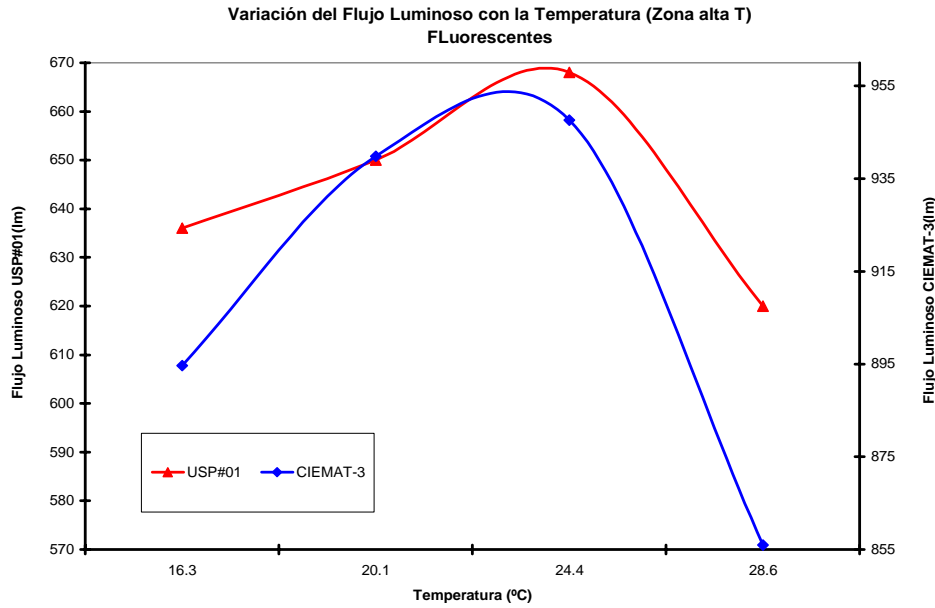
En las figuras mostradas se tiene el comportamiento del flujo luminoso respecto a la temperatura para lámparas idénticas a nuestra lámpara patrón (halógenas de 75W) y para dos fluorescentes.

Para las lámparas halógenas se puede observar que, figura 8, la dependencia del flujo luminoso con la temperatura no es proporcional: en el rango de 16 a 22°C se obtiene una disminución del flujo a medida que aumenta T, pero el flujo aumenta de nuevo en el rango de 22°C a 26°C. Las variaciones de flujo, de sus medidas mínimas y máximas, son, para la Eiko-1 de alrededor de 50lm y para la eiko-2 de 20lm.



**Fig. 8** Variación del flujo con la temperatura para lámparas halógenas similares a la lámpara patrón de medida. Variación de la temperatura mediante el sistema de aire acondicionado del laboratorio.

En cambio, para las lámparas fluorescentes probadas (Fig.9) se observa que hay un rango de temperaturas para el óptimo desempeño y eficiencia de las lámparas y resulta estar alrededor de 24,5°C. A temperaturas menores a ésta, las lámparas presentan una disminución en su flujo, a temperaturas mayores a ésta se presenta la misma situación.

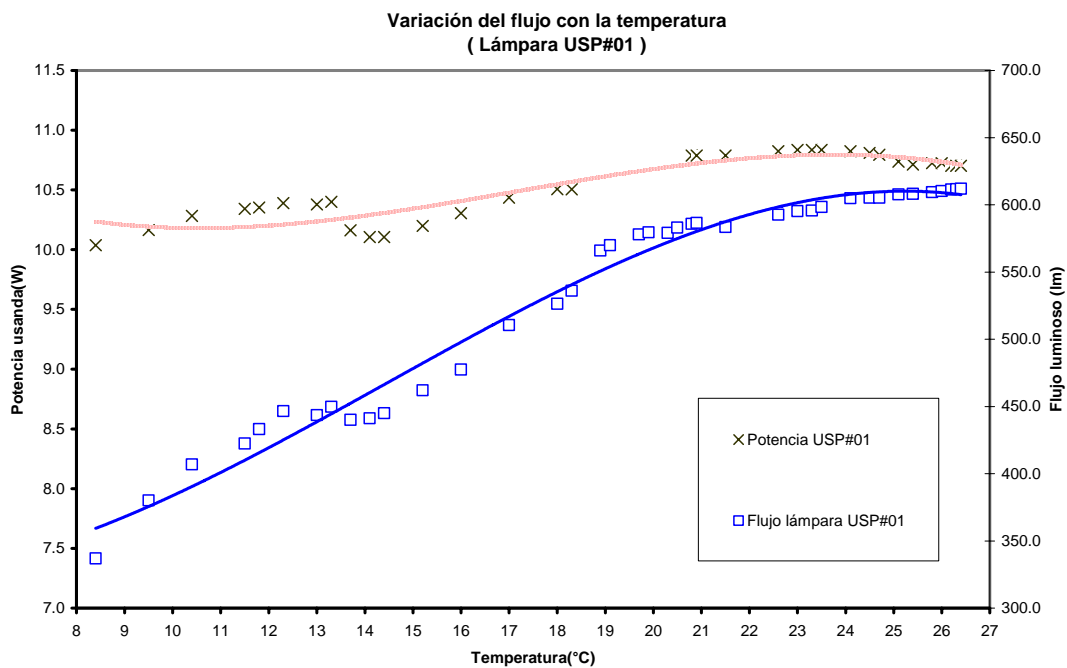


**Fig. 9** Variación del flujo con la temperatura para lámparas fluorescentes compactas, en este ensayo la USP#01 y Ciemat-3. Variación de la temperatura mediante el sistema de aire acondicionado del laboratorio.

### 3.2.2.2 Medidas usando el sistema de refrigeración pequeño

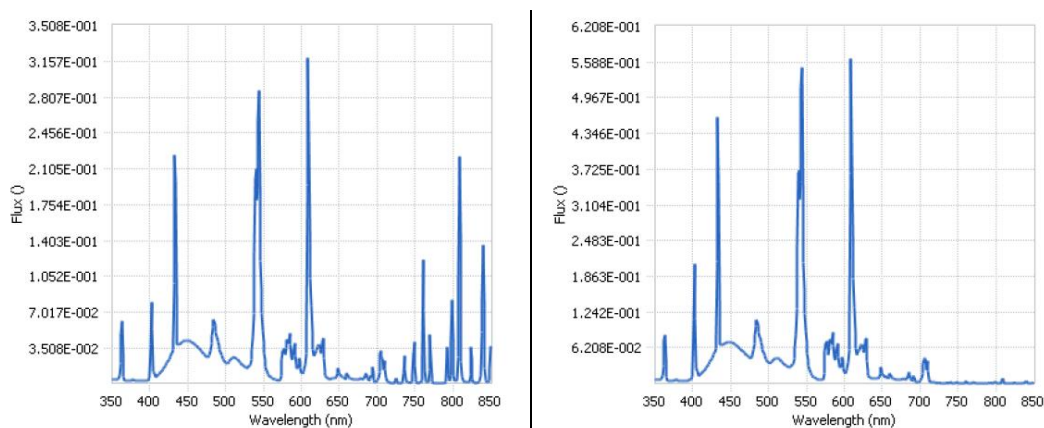
Se ha montado un sistema de refrigeración con ayuda de un Cooler Phocos, que recrea un ambiente de hasta 6,5°C en el que se ha puesto la lámpara. Se ha usado una única lámpara en el ensayo y es la USP#01 y se ha medido en el rango de 8°C a 26°C.

En la gráfica 10 se muestra, a modo de resumen, los resultados obtenidos en los que se observa claramente que el flujo varía proporcionalmente con la temperatura en rangos bajos (8-20°C) pero ésta se normaliza para temperaturas más elevadas (22-26,5°C). Así mismo, la potencia presenta una relación bastante cercana con el flujo, esto se hace notorio en la forma de la curva; pero su variación es de 0,8W respecto a su mínimo valor de 10W a 8,5°C, y el máximo, 10,8W, alrededor de 23,4°C.



**Fig. 10** Gráfico que muestra la variación del flujo luminoso y la potencia con la temperatura usando el sistema de refrigeración cooler Phocos.

También se ha podido medir la variación del espectro de la lámpara respecto a la temperatura. Para ello, en la figura 11 se muestran dos gráficos de los espectros de la lámpara a dos temperaturas extremas. La de la izquierda muestra el espectro a la temperatura de 8,4 °C en donde se observan picos marcados en el rango de 700 a 860nm, los cuales desaparecen a condiciones normales de temperatura (a 19,1 °C los picos son apenas distinguibles) de modo que a 26,4 °C se obtiene el espectro de la derecha. Así es que a baja temperatura se obtiene una temperatura de color de 6111°K y a 26,4°C se obtiene 6037°K. Es decir, para la respuesta del ojo, se obtiene un tono más frío a baja temperatura.



**Fig. 11** Comparación de espectros de la lámpara USP#01 a temperaturas de 8,4°C, izquierda, y a 26,4°C, derecha.

### 3.3. Comparación de resultados con laboratorios USP y Ciemat

Para comparar nuestras medidas de flujo luminoso de lámparas fluorescentes compactas de 12 V DC se envió varias lámparas a laboratorios de fotometría de CIEMAT, en Madrid y de la Universidad de Sao Paulo, en Sao Paulo. Estas medidas se realizaron todos a 12,000 V DC y a una temperatura entre los 23-25 °C. (La medida del voltaje se hace en los terminales del socket, para evitar la caída de la tensión del cable). A continuación se muestran las tablas de las medidas como resumen.

Lámpara	Tensión (V cc)	Corriente (A cc)	Flujo Luminoso (lm)	Incertidumbre del flujo luminoso (%)	Temperatura de Color (°K)	Coefficiente de Rendimiento de Color
REF6691313-1	12,000	0,70631	343	4,7	6024	82,9
REF6691313-2	12,000	0,88083	639	4,7	2720	81,7
REF6691313-3	12,000	1,2033	951	4,7	6026	80,1
USP #01	12,000	0,8686	639	4,7	6138	81,0
USP #02	12,004	1,1318	836	4,7	5827	82,8

**Tabla 6.** Medidas de las lámparas en el laboratorio de fotometría UNI.

Lámpara	CIEMAT	USP	UNI
REF 6691313-1	0,7009 A; <b>346 lm</b> ; 41,1 lm/W	0,704 A; <b>334 lm</b> ; 39,5 lm/W	0.70631A; <b>343 lm</b> ; 40,5 lm/W
REF 6691313-2	0,8780 A; <b>639 lm</b> ; 60,6 lm/W	0,886 A; <b>633 lm</b> ; 59,5 lm/W	0.88083A; <b>639 lm</b> ; 60,5 lm/W
REF 6691313-3	1,177 A; <b>954 lm</b> ; 67,5 lm/W	1,160 A; <b>870 lm</b> ; 62,5 lm/W	1.2033A; <b>951 lm</b> ; 65,9 lm/W
USP-01		0.838 A; <b>619 lm</b> ; 61,5 lm/W	0.8686A; <b>639 lm</b> ; 61,2 lm/W
USP-02		1,103 A; <b>734 lm</b> ; 55,5 lm/W	1.1318A; <b>836 lm</b> ; 61,6 lm/W

**Tabla 7.** Tabla de Comparación CIEMAT-USP-UNI



De estos resultados se puede concluir:

- En las lámparas REF 6691313-1 y REF 6691313-1, la diferencia de las medidas del flujo luminoso entre los laboratorios no excede el 3,6 % y la eficiencia en 4,1%, los que se encuentran dentro del margen de error que ofrece el laboratorio.
- En la lámpara REF 6691313-3 la diferencia entre el CIEMAT y la UNI es de unos 0,31% en flujo luminoso y de 2,4% en eficiencia y en la comparación USP con la UNI es de 8.51% en flujo luminoso y de 5,1% en eficiencia.
- Las medidas de USP son más lejanas en las tres lámparas pero es considerable en la lámpara de mayor potencia (REF-6691313-3).

Las medidas de USP1 y USP2 sólo se pueden comparar con el laboratorio USP.

- Para USP1 la diferencia en flujo luminoso es de 3,1% y en eficiencia es de 0,5%.
- Para USP2 la diferencia en flujo luminoso es de 12,2% y en eficiencia es de 9,9%.

La diferencia con el laboratorio USP para la lámpara de mayor potencia es significativa, mientras que la medida de menor potencia entra en el error que ofrece el laboratorio de la UNI.

#### **4. Conclusiones**

Las medidas realizadas muestran que las eficiencias de las lámparas fluorescentes están en el rango de 40-67,5 lm/W siendo las más eficientes la Ciemat-3 (15W) con 67,5lm/W y la USP#02 (15W) con 61,7lm/W y la menos eficiente la Ciemat-1(7W) con 40,4 lm/W; mientras que las lámparas Ciemat-2 y USP#01 están en el rango de 56-62 lm/W.

Las medidas respecto al cambio de temperatura muestran que el flujo de las lámparas varía fuertemente con la temperatura ambiente.

Las medidas realizadas en el laboratorio, tienen una gran similitud con los datos del USP y más aun con los del CIEMAT, ya que están dentro de nuestro error de medida. Esto reafirma que la técnica de medición es confiable. Además las eficiencias de las lámparas entre 23°C-25°C son muy cercanas a sus valores nominales, salvo en el caso de la lámpara de 15W, que aun no se ha determinado satisfactoriamente.

#### **5. Referencias**

- [1] Laboratorio de Fotometría UNI, '*Procedimiento de Evaluación del flujo Luminoso de Luminarias Compactas*', informes 3 y 4; Lima, UNI, 2008.
- [2] Commission Internationale de L'Éclairage, '*The measurement of luminous flux*', CIE 84, 1989.
- [3] Commission Internationale de L'Éclairage, '*The basis of physical photometry*', CIE 18.2, 2<sup>nd</sup> edition 1983.
- [4] Commission Internationale de L'Éclairage, '*The photometry and goniophotometry of luminaires*', CIE 121, 1996,
- [5] Allen Stimson, '*Photometry and Radiometry for engineers*', Wiley Interscience Publication, 1974.
- [6] Manuales y software de Labsphere