

## **DISEÑO Y ENSAYOS PRELIMINARES DE UN PROTOTIPO DE FOTOGONIÓMETRO PARA LÁMPARAS DE BAJA POTENCIA<sup>#</sup>**

Ricardo Echazú y Carlos Cadena  
INENCO – Instituto UNSa. – CONICET  
Universidad Nacional de Salta  
Av. Bolivia 5150 – A4408FVY Salta, República Argentina  
FAX 54 387 4255489 – e-mail: ricardo.echazu@gmail.com

*Recibido 11/08/16, aceptado 07/10/16*

**RESUMEN:** Se presenta el diseño, la construcción y puesta a punto de un equipo de laboratorio destinado a la medida del flujo luminoso hemisférico de lámparas de baja potencia. El instrumento construido totalmente en el INENCO de Salta, cuenta con un sensor que se desplaza sobre una trayectoria circular con centro en la lámpara en estudio, la que a su vez rota sobre un eje vertical. La combinación de los dos movimientos permite tomar medidas sobre la hemiesfera, en puntos de coordenadas preestablecidas, para el trazado de curvas de distribución luminosa. Tanto la lectura y registro de las mediciones, como el control del movimiento sobre los dos ejes, se realizan por medio de una microcomputadora, a fin de automatizar el proceso de medición. Se midieron 6 lámparas de bajo consumo de 9 a 20 W de potencia, se obtuvieron las curvas características y se comprobó el funcionamiento del equipo.

**Palabras clave:** Fotogoniómetro, lámparas, flujo luminoso, celda, LDR

### **INTRODUCCIÓN**

La expansión del mercado de lámparas tiene en este momento una gran importancia comercial y también produce seguridad, y confort ciudadano. Ese es el punto más favorable del desarrollo de la luminotecnia. Sin embargo, en las últimas décadas tal expansión ha generado un problema de contaminación lumínica nocturna, que en algunas ciudades ha llegado a límites inadmisibles. La contaminación luminosa es costosa; significa más energía eléctrica consumida de manera inútil, y por tanto está en contra del desarrollo sostenible. Este tipo de contaminación es producto, ante todo, de un diseño no optimizado de las luminarias. Aunque de trascendencia menor, también existe el problema de la iluminación del cielo de las ciudades por luz que muchos modelos de luminarias arrojan hacia el hemisferio superior. En particular, ésta ocurre con modelos decorativos de luminarias y faroles poco desarrollados. Esta luz se pierde como energía radiada y representa un sobre costo de las instalaciones que el usuario paga innecesariamente (Alexander Arias-Cuellar, 2007).

Para clasificar, caracterizar y diseñar luminarias es necesario realizar ciertas pruebas de laboratorio relacionadas con la fotometría, que permitan determinar la forma de la distribución lumínica de la fuente, así como el valor de la intensidad luminosa en cada punto alrededor de la fuente bajo prueba (Apian & von der Hardt, 1998; Alcaldía-Bogotá, 2004). Para lograrlo es necesario un fotogoniómetro o goniofotómetro. Existen diferentes alternativas para recolectar los datos de la matriz de intensidades

<sup>#</sup>Parcialmente financiado por el Consejo de Investigación de la Universidad Nacional de Salta

en toda la periferia o direcciones del espacio en las que una fuente emite luz y se conocen como los montajes tipo A, B y C. (Rea, 1993; Marx, 1997).

Las recomendaciones de la Comisión Internacional de Alumbrado (CIE) para la fotometría de luminarias de iluminación vial establecen una secuencia de ángulos acimutales y verticales de intervalos variables, con pasos de hasta quince grados. Esta secuencia resulta adecuada -y sobre todo reduce la tediosa tarea del cálculo manual- cuando se emplean fuentes y luminarias con una distribución de intensidades luminosas (DIL) de forma aproximadamente difusora, típicamente artefactos con lámparas de mercurio con recubrimiento difusor. Sin embargo, cuando la DIL se aleja del comportamiento difusor, como ocurre por ejemplo en luminarias con vidrio refractor y lámparas claras, se pueden cometer errores significativos al calcular con la secuencia de ángulos propuesta por la CIE.

Posteriormente, es posible determinar la calidad del reflector y refractores utilizados en la luminaria, las pérdidas con respecto a la potencia de la fuente utilizada, como también estimar la calidad de la iluminación sobre un área especificada al utilizar una luminaria determinada. Cabe anotar que la matriz de intensidades es el elemento de caracterización más importante que puede tener una fuente luminosa hoy en día. Además, permite obtener cualquier tipo de cálculo lumínico: bien sea punto a punto o bien sea de promedios; tanto de luminancia como de iluminancia y permite igualmente calcular deslumbramiento y uniformidades como elementos evaluadores de la calidad de la iluminación en el alumbrado público. En la luminotecnia moderna, es llamada la huella digital de las luminarias (Apian & Von der Hardt, 1998).

## DESCRIPCIÓN DEL PROTOTIPO

El principio de funcionamiento de un fotogoniómetro, también llamado goniofotómetro, es un montaje de laboratorio en el cual se realizan pruebas normalizadas a todo tipo de luminarias como las utilizadas en alumbrado público, de interiores, ornamentales, etc. El objetivo de las pruebas, conocido con el nombre de fotometrías, es el de conocer forma de la distribución lumínica y la medida de las intensidades luminosas alrededor de la fuente bajo prueba. Con esta información es posible obtener diagramas como el isolux, así como también la matriz de distribución de intensidades luminosas y en general, diagramas polares de intensidad en diferentes planos. En la figura 1 se muestra un esquema de las partes constitutivas del prototipo desarrollado.

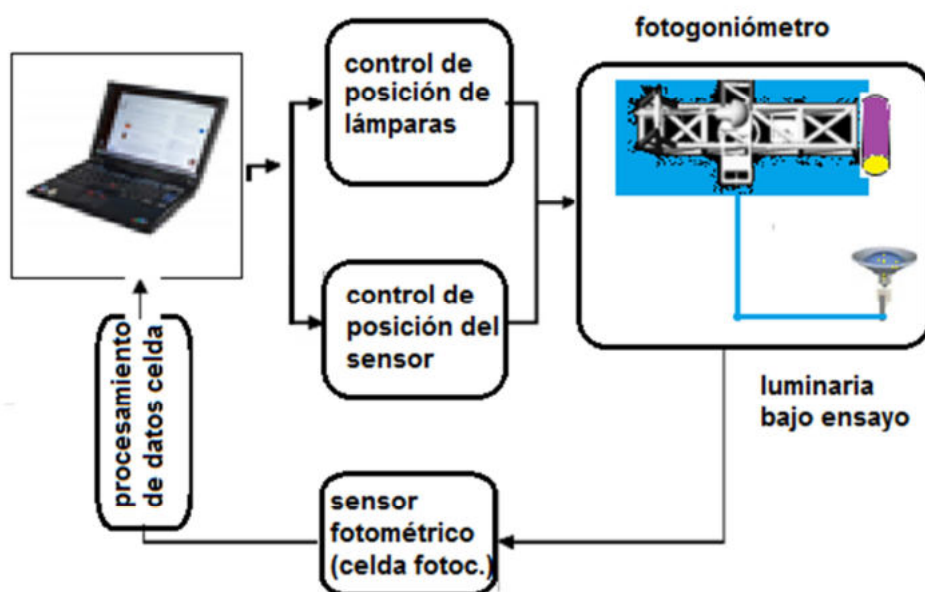


Figura 1: esquema del prototipo

Consta básicamente de las siguientes partes:

-una celda LDR (Light – Dependent Resistor) de buena calidad que se emplea como fotómetro,

- montada sobre un brazo metálico que permite variar su posición a través de un motor paso a paso entre  $0$  y  $90^\circ$  (ángulo  $\Theta$ )
- sistema de montaje de lámparas pequeñas con rotación controlada con motor paso a paso para los  $360^\circ$  (azimut  $\phi$ )
- una microcomputadora que controla ambos movimientos
- una interface para transformar la señal de la celda
- software libre y de diseño de los autores

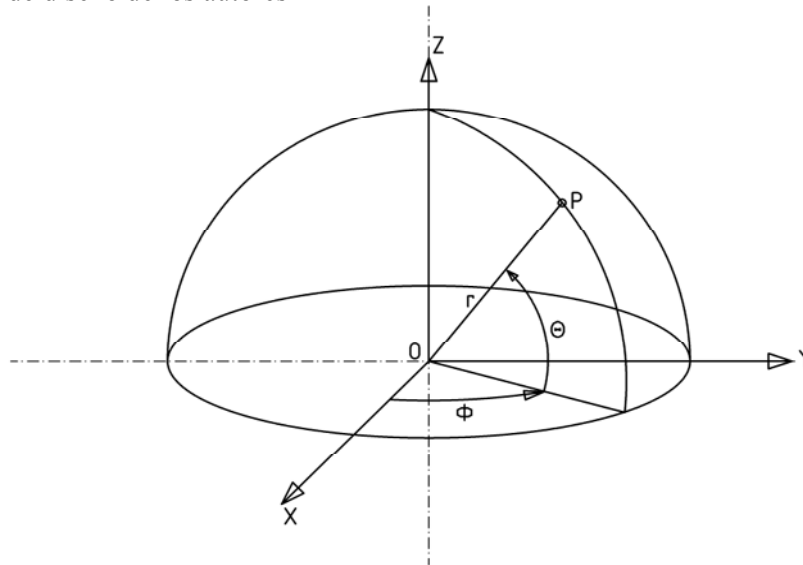


Figura 2: Sistema de coordenadas polares.

En la figura 2 se indica el sistema de coordenadas polares al que se hará referencia en adelante. El punto **O** es el centro, donde se ubica la lámpara, mientras que en **P** está el sensor. Las coordenadas del sensor son el azimut  $\phi$ , la latitud  $\Theta$  y el radio  $r$ .

El desplazamiento del sensor puede cubrir latitudes entre  $0^\circ$  y  $90^\circ$ , desde el horizonte hasta el cenit, con pasos predefinidos. Para hacer posible este movimiento, se lo montó sobre un brazo que rota junto con un contrapeso para equilibrar el conjunto.

El portalámparas con la lámpara en estudio rota alrededor de eje **Z** para repetir la medida con diferentes valores de azimut, también con intervalos preestablecidos.

El sensor luminoso es un CL-705 de Clairex, cuya señal, acondicionada mediante un amplificador operacional y un puente de resistencias se muestra en la figura 3. Se consideró que para esta etapa preliminar, no era preciso calibrarlo, ya que viene precalibrado de fábrica y estaba sin uso.

Se puede apreciar la existencia de una familia de curvas correspondientes a diversos sensores con prestaciones similares. El que se empleó, se encuentra casi al centro del conjunto. Tiene un pico de respuesta espectral en aproximadamente los  $550\text{ nm}$ . y para la calidad del producto un costo moderado (un poco menos de 30 euros).

La señal ingresa a la microcomputadora por medio de un conversor analógico digital de 10 bits MCP3008 con conexión SPI Heartville, (2015). El error de cuantificación que se comete es moderado, y podría disminuirse en una versión definitiva.

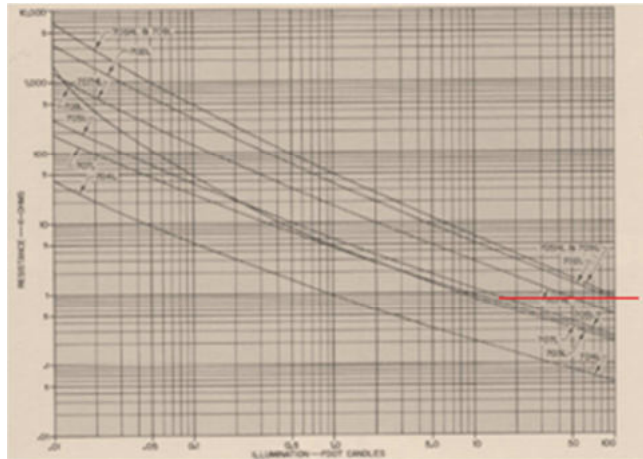


Figura 3: Características optoelectrónicas del sensor.  
(gentileza de Clairex, Photoconductive cell application design handbook)

Para el movimiento sobre los dos ejes se instalaron dos motores paso a paso unipolares con mecanismos de transmisión que funcionan así: una correa dentada para el movimiento del brazo metálico que sostiene el sensor, (con su correspondiente contrapeso para mejorar la eficiencia del motor impulsor) y un tren de engranajes ubicado en un plano a 90° del anterior, para la rotación de la lámpara, como se aprecia en la figura 4. La configuración de los mecanismos permite establecer el número de pasos para el barrido, con un máximo de 96 pasos para recorrer los 360 grados del azimut y 92 pasos para los 90 grados correspondientes a un cuadrante de latitud. En estos rangos se configura por software la disposición para cada medición.

El giro de los motores es controlado mediante las conexiones GPIO de la micro computadora, mediante un programa adaptado para tal fin, mientras que con amplificadores de potencia del tipo ULM3008, se realiza el interfaseado de potencia

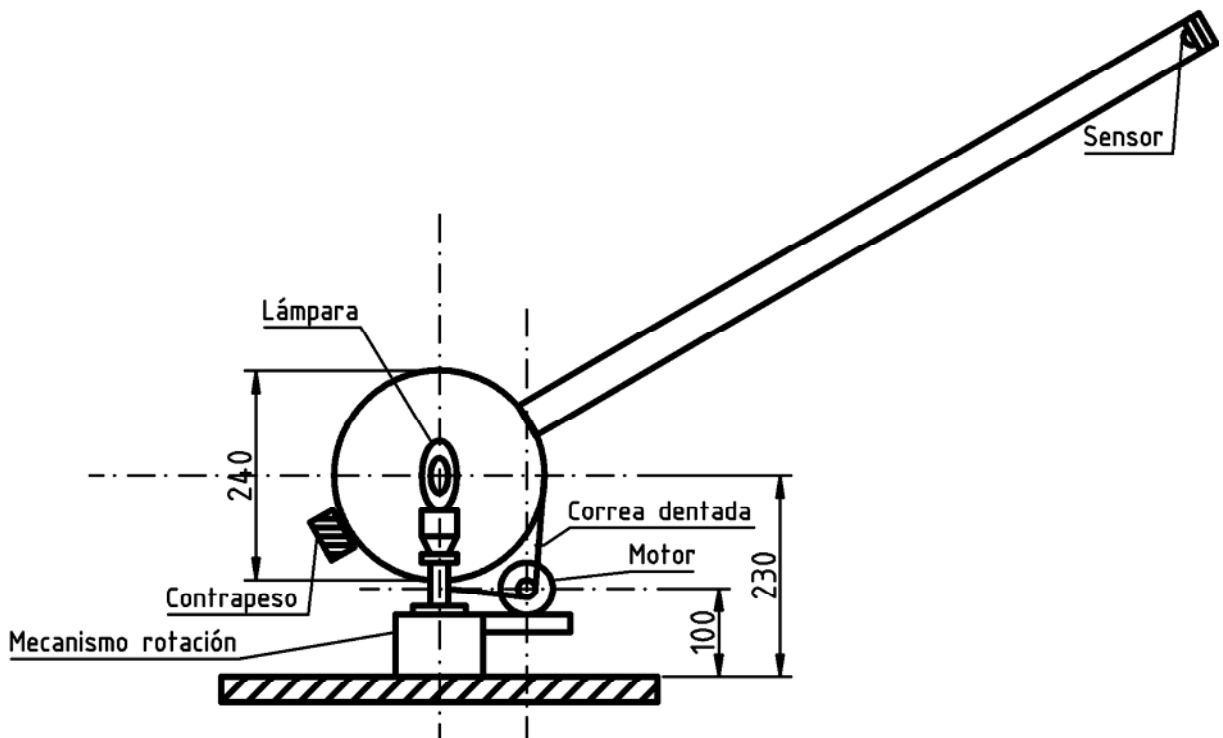


Figura 4: Vista lateral del equipo.

En la figura 5 se observan algunas de las partes constitutivas del equipo:

1. Lámpara bajo estudio

2. Contrapeso de equilibrio del brazo
3. Motor impulsor del rotador de la lámpara con su engranaje horizontal
4. Motor impulsor del movimiento del brazo
5. Parte inferior del brazo
6. Correa dentada de acoplamiento

La figura 6 muestra parcialmente el hardware del sistema empleado, su microcomputador Raspberry, Raspberry Pi Foundation, (2014), interfases y fuente de alimentación.

## SOFTWARE

La microcomputadora Raspberry pi, se comunica por wifi con la PC del laboratorio. Allí se instaló el sistema Raspbian Lite y mediante un único programa en Python 3, Python, (2015), se controla el movimiento del sensor sobre los dos ejes, se mide la iluminación y se guardan los resultados en un pendrive. Echazú R. et al, (2015)

El programa emplea las librerías siguientes:

- time y OS para el control del reloj.
- spidev para la comunicación en serie con el conversor A/D.
- RPi.GPIO para el control de los motores paso a paso.

Los archivos de medida tienen formato de tabla con cuatro columnas: en la primera aparece el tiempo en segundos desde el inicio de la medida, luego las coordenadas  $\varphi$ ,  $\Theta$  y en la última la iluminación correspondiente en lx.



*Figura 5: Fotografía del mecanismo de movimiento del sensor.*



Figura 6: Sistema de medida y control basado en Raspberry pi.

## RECUBRIMIENTO DEL ENTORNO DE MEDICIÓN

El equipo está montado en un sector del laboratorio, recubierto con papel crepé negro mate, de modo de minimizar la luz reflejada sobre el sensor. Previamente se compararon distintos materiales, midiendo su reflectancia espectral con espectrorradiómetro Li-1800 y esfera integradora de la misma marca. La figura 6 muestra los resultados con el eje de ordenadas muy expandido para mostrar las pequeñas diferencias entre un material y otro.

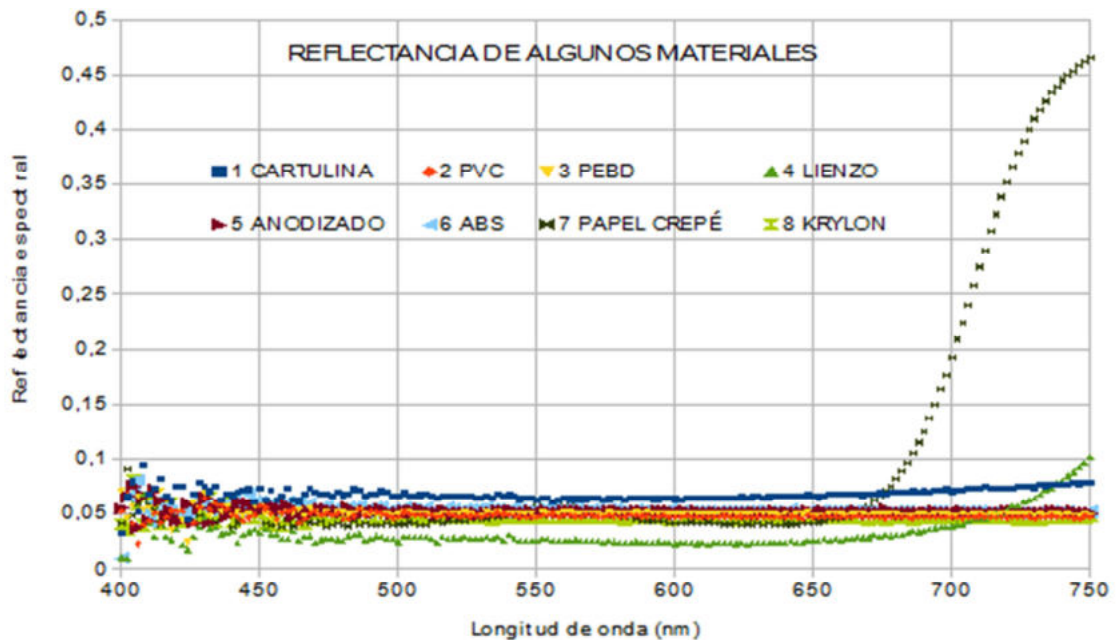


Figura 7: Reflectancia espectral de algunos materiales.

Se observa que la reflectancia espectral de los materiales ensayados tiene tres zonas bien diferenciadas:

Hasta los valores  $<450$  nm (aproximadamente) donde, si bien es baja, existe alguna dispersión de los parámetros.

Hasta los valores  $<670$  nm, donde la reflectancia se mantiene más o menos constante, pero siempre inferior a los 0,07 para todos los materiales estudiados.

Para valores  $>670$  nm, donde algunos materiales la mantienen constante, otro como el papel “crepé” se incrementa notoriamente. La cartulina, y el lienzo ensayado comienzan a mostrar una tendencia en alza, aunque fuera del rango de emisión de las lámparas estudiadas.

Una publicación anterior (Echazú R., Cadena C., 2012), presenta medidas en laboratorio de la emitancia espectral de lámparas del mismo tipo, mostrando los picos característicos en el rango visible. En el mismo trabajo, se midió la reflectancia espectral de una pintura negra en aerosol, de buena calidad y del recubrimiento interior del equipo de calibración Li-Cor, con resultados muy similares a los obtenidos al presente.

Puesto que las diferencias en el rango de interés para el objeto del estudio son muy pequeñas, como se aprecia en el gráfico, se decidió emplear papel crepé, por su bajo costo y por resultar cómodo su laboreo.

## **RESULTADOS PRELIMINARES**

Para mantener condiciones estables de temperatura, se ajustó el acondicionador “frio/calor” del laboratorio en  $24^{\circ}$  C y se encendió la lámpara 10 minutos antes de iniciar cada serie de medidas.

En esta primera serie de mediciones, las lámparas se alimentaron directamente con tensión de la red. Para las próximas, está previsto incorporar una fuente estabilizada, además de medir tensión, corriente y temperatura, con el mismo equipo adquisidor de datos.

A los efectos de probar el equipo, se realizaron medidas con 6 lámparas de potencias entre 9 y 20 W. De los ensayos realizados, se consideraron más ilustrativos los correspondientes a tres lámparas fluorescentes compactas de diferente geometría: La primera, tipo globo, con una cubierta difusiva esférica, se usó como referencia para comparar las restantes.

Con pasos de  $45^{\circ}$  en el barrido del azimut y de  $15^{\circ}$  en latitud, cubriendo un cuadrante, se midieron 56 puntos para cada lámpara. Se eligieron estos pocos valores, por tratarse en la ocasión, de una prueba del equipo. Con la resolución máxima que permite el mecanismo podrían medirse 8832 puntos por cada lámpara, lo que resultaría excesivo desde todo punto de vista.

Puesto que para estos primeros ensayos, la elección de la referencia es arbitraria, no se presentan los valores absolutos, sino la relación con el valor de referencia. En los dos casos, se representó en el gráfico el cociente  $L/L_0$ , siendo  $L$  la iluminación medida y  $L_0$  la de la referencia, para las mismas coordenadas.

En los gráficos de las figuras 7 y 8 se muestran los resultados obtenidos para dos lámparas de igual potencia, una de tipo espiral y la otra recta.



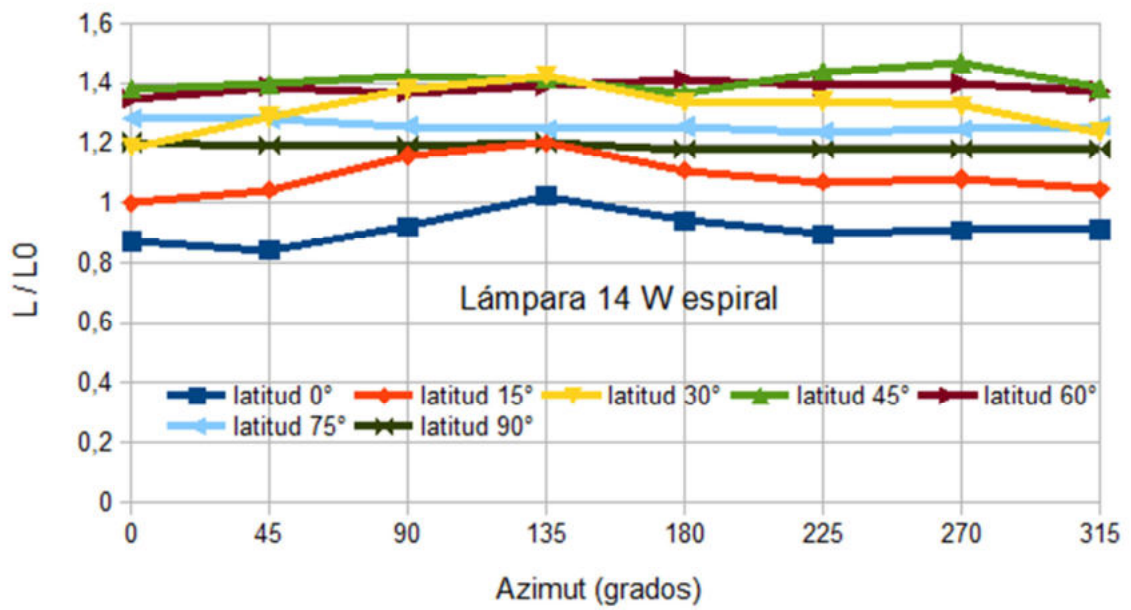


Figura 8: Iluminación en función del azimut, para distintas latitudes. Lámpara tipo espiral.

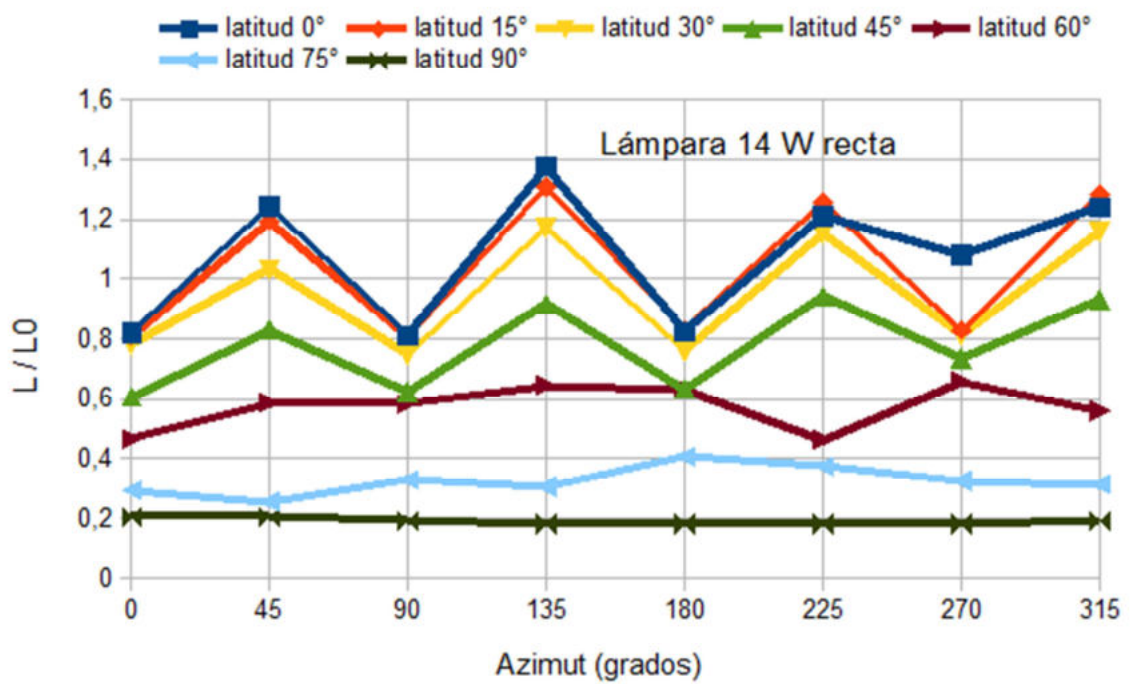
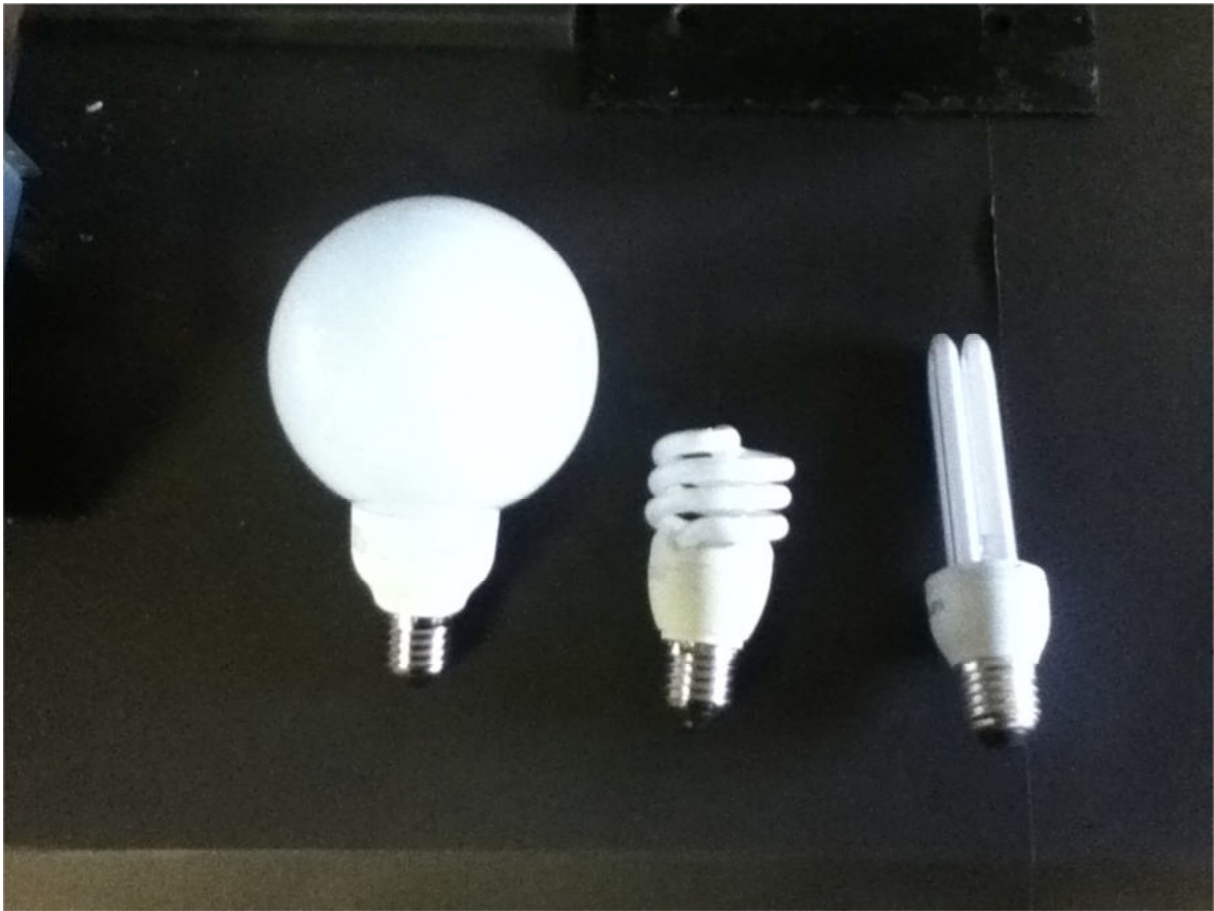


Figura 9: Iluminación en función del azimut, para distintas latitudes. Lámpara recta.





*Figura 10: Tres tipos de lámpara: globo, espiral y recta..*

## **CONCLUSIONES**

Se diseñó y construyó un equipo que permite caracterizar cierto tipo de lámparas de baja potencia. Si bien queda mucho trabajo por hacer, se puede decir que un futuro cercano se podrá contar con un equipo que permita determinar el flujo total de lámparas de baja potencia. Corresponde decir que hay que corregir algunos aspectos como el hecho que el paso de las roscas de las lámparas E27, puede provocar un desalineado entre los ejes del detector y de la lámpara, lo que se aprecia más en las lámpara con geometría lineal que en las espiraladas. Se propone como solución un montaje flotante, lo que permite ajustar cada lámpara de acuerdo a su tamaño. Se observa también que la elección del paso de  $45^\circ$  para la rotación de las lámparas es insuficiente, ya que en la figura 8, se observa una marcada discontinuidad en los datos. Habrá que ajustar detalles de geometría óptimos entre la posición de la lámpara y el sensor. La disposición actual está acotada por el tamaño del recinto, y también el material y color de la superficies negras. También habrá que resolver cómo se evalúa la medida de los valores de iluminancia para ángulos por debajo de los cero grados (o sea por debajo de la horizontal), entre

## **REFERENCIAS**

- Alexander Arias-Cuellar, Joao L. Ealo-Cuello, Eduardo Caicedo, (2007). Diseño, construcción y calibración de un fotogoniómetro para la empresa colombiana de luminarias Roy Alpha S.A Ingeniería y Competitividad, Volumen 9.
- Apian-Bennewitz, P., & von der Hardt, J. (1998). Enhancing and calibrating a goniophotometer. Solar Energy Materials and Solar Cells 54 (1/4), 309-322.
- Echazú R., Cadena C., (2012), Medida en Laboratorio de la Emisión UV Emitida por Lámparas Fluorescentes Compactas, AVERMA, Vol. 16, ISSN 0329-5184.
- Echazú R. et al, (2015), Sistema de Medición de Radiación Solar, Almacenamiento y Publicación Web, Acta de la XXXVIII Reunión de Trabajo de ASADES, Vol. 3, ISBN 978-987-29873-0

Heartville, (2015), [www.hertaville.com/interfacing-an-spi-adc-mcp3008-chip-to-the-raspberry-pi](http://www.hertaville.com/interfacing-an-spi-adc-mcp3008-chip-to-the-raspberry-pi)  
Marx, P. (1997). New goniophotometers for lighting-engineering laboratories. *Light & Engineering* 5 (4), 32-36. <http://www.mx-electronic.com/pdf/Drehspiegelengl.PDF>  
Python, (2015), <https://www.python.org/>  
Raitelli, Roberto Mario, 2014. *Revista Luminotecnia UNT*. Departamento de Luz y Visión de la Universidad Nacional de Tucumán.  
Raspberry Pi Foundation, (2014), [www.raspberrypi.org/help/what-is-a-raspberry-pi](http://www.raspberrypi.org/help/what-is-a-raspberry-pi)  
Rea, M. S. (editor). (1993). *Lighting Handbook, Reference & Application*. Illuminating th Engineering Society of North America, 8 edition.

## **ABSTRACT**

design, construction and commissioning of laboratory equipment intended for measurement of hemispherical luminous flux of lamps low power is presented. The instrument built entirely in the INENCO of Salta, has a sensor that moves on a circular lamp centered on the study path, which in turn rotates on a vertical axis. The combination of the two movements can take action on the hemispherical points. Reset coordinates for plotting curves of light distribution. Both reading and recording measurements, as control of movement on the two axes, are performed by a microcomputer in order to automate the measuring process. Six energy-saving lamps of 9-20 W of power were measured. Characteristic curves were obtained and operation of the equipment was checked.

**Keywords:** Photogoniometer , lamps, luminous flux , light dependent resistor