



Diseño y construcción de un fotogoniómetro para el laboratorio de iluminación de la Universidad Distrital, Sede tecnológica

Design and construction of a goniophotometer for the lighting laboratory at District University, faculty of technology

José David Cortés Torres*, Wilson Fernando Rodríguez Rodríguez**,
Hugo Armando Cárdenas Franco***

Citation / Para citar este artículo: Cortés Torres, J. D., Rodríguez Rodríguez, W. F., & Cárdenas Franco, H. A. (2014). Diseño y construcción de un fotogoniómetro para el laboratorio de iluminación de la Universidad Distrital, Sede Tecnológica. Revista Tecnura, Edición especial, 173-187.

Fecha de recepción: 4 de febrero de 2014 / **Fecha de aceptación:** 16 de mayo de 2014

RESUMEN

En este artículo se presentan los resultados del diseño y construcción de un fotogoniómetro para un laboratorio de iluminación. El dispositivo cuenta con la instrumentación y mecánica necesarias para efectuar fotometrías de tipo C sobre luminarias de alumbrado público. En particular, pueden realizarse las pruebas conocidas como matriz de intensidad, curvas polares y curvas isolux. El equipo trabajó con luminarias no superiores a 10 kg de peso y 1.27 m de longitud. El proceso de diseño incluyó la instrumentación de dos sensores fotométricos, los cuales enlazados con un procesador PSoC Cypress hacen que la adquisición y tratamiento se hagan en tiempos inferiores a los requeridos por equipos convencionales. En el futuro cercano, se realizarán ajustes con el fin de implementar fotometrías de tipo B.

Palabras clave: curva fotométrica, fotogoniómetro, PSoC, sensor fotométrico.

ABSTRACT

This paper presents the design and construction of a goniophotometer for a general purpose lighting laboratory. The construction process required the tuning of instruments as well as building mechanical components to perform type C goniophotometries of street lighting. In particular, the device allows carrying out tests such as intensity matrix, and polar and isolux curves. The mechanism capacity allows luminaries under 10 kg weight and 1.27 m length. The design process included the tuning of two photometric sensors, which in conjunction with a PSoC Cypress processor allow acquiring and processing signals faster than conventional devices. In the near future, minor adjustments in the device will permit type B goniophotometries.

Key words: Goniophotometer, photometric curve, photometric sensor, PSoC.

* Ingeniero eléctrico, estudiante de maestría en ingeniería eléctrica, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia, jose.cortes@correo.uis.edu.co

** Ingeniero eléctrico, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, Colombia. wfrodriguezr@correo.udistrital.edu.co

*** Ingeniero electricista, especialista en cartografía digital, diplomado en iluminación y alumbrado público; docente Universidad Distrital Francisco José de Caldas. hacardenasf@udistrital.edu.co

INTRODUCCIÓN

Un instrumento llamado fotogoniómetro es un elemento que permite caracterizar la distribución espacial regular e irregular del flujo luminoso de las luminarias que son puestas a prueba, por medio de la variable de iluminancia. En este proyecto se diseña y se construye un instrumento para la medición de estas características en luminarias de alumbrado público y luminarias pequeñas, con la debida integración de elementos de tecnologías de punta, como tarjetas de desarrollo (PSoC), interfaz gráfica Labview y comunicación USB. El núcleo central del proyecto consiste en el control general del sistema y se basa en la tarjeta de desarrollo PSoC 3/5 (tecnología de desarrollo Cypress CY8C-KIT030); se usan dos motores paso a paso con caja reductora para cada uno de los ejes de movimiento al igual que el acople individual de codificadores (encoder) incrementales/absolutos de resolución de 11 bits (expandibles a 4 x 11 bits mediante software). La conexión entre los periféricos y la tarjeta de control principal se hizo mediante cable UTP de categoría 6 debido a las conexiones físicas de calidad superior para la alimentación, control y lectura de los diferentes dispositivos. Adicionalmente la interface máquina-humano, HMI (Human Machine Interface) y el control del fotogoniómetro fueron desarrollados en Labview, mediante una aplicación que permite controlar y registrar las diferentes mediciones que se desee realizar. Todos estos elementos serán instalados en el laboratorio de iluminación destinado para dicho propósito.

Para hacer el diseño del fotogoniómetro se tuvieron en cuenta tres aspectos básicos. El diseño mecánico, el diseño fotométrico y el diseño óptico, según consideraciones generales de las normas CIE 84 (Commission Internationale de L'éclairage, 1989), CIE 121 (CIE Commission Internationale de L'éclairage, 1996), CIE 70 (CIE Commission Internationale de L'éclairage, 1987), CIE 69 (CIE Commission Internationale de L'éclairage, 1987), CIE 102 (CIE Commission Internationale de L'éclairage,

1993), LM-75 (IESNA Illuminating Engineering Society of North America, 2001), LM-63 (IESNA Illuminating Engineering Society of North America, 2002) e LM-69 (IESNA Illuminating Engineering Society of North America, 2002).

METODOLOGÍA DE DESARROLLO

Para el diseño y construcción del fotogoniómetro se tuvieron en cuenta aspectos propios en el desarrollo del prototipo, como diseño mecánico, óptico, fotométrico, eléctrico y la interfaz de usuario.

Diseño mecánico

El diseño mecánico está constituido básicamente por una estructura empotrada al suelo con tuercas de sujeción, como se puede observar en la figura 1. La estructura principal posee un riel con un sistema de corredera sobre el cual se soporta un mecanismo o columna, soportando uno de los motores paso a paso para la rotación sobre el eje horizontal; este es el encargado de dar rotación al plano C para obtener una fotometría de tipo C. A su vez, este riel está soportado sobre un rodamiento axial de otra base, la cual tiene otro motor paso a paso para la rotación del plano y para el mismo tipo de fotometría. Los motores que están acoplados a este sistema son del tipo paso a paso, puesto que garantizan la exactitud en los desplazamientos angulares que se desea conseguir para las pruebas; además de ser mucho más económicos que los servomotores actuales, tienen las características mecánicas y eléctricas suficientes para la aplicación. Las figuras 2 y 3 muestran las razones mecánicas de diseño por las que el fotogoniómetro se estableció de esta manera. En la gráfica se aprecia la relación entre la máquina y la referencia de los tipos de fotometría C y B, respectivamente.

El eje horizontal puede girar libremente ya que posee un sistema sencillo de escobillas que evitan el cable de energización de la luminaria.

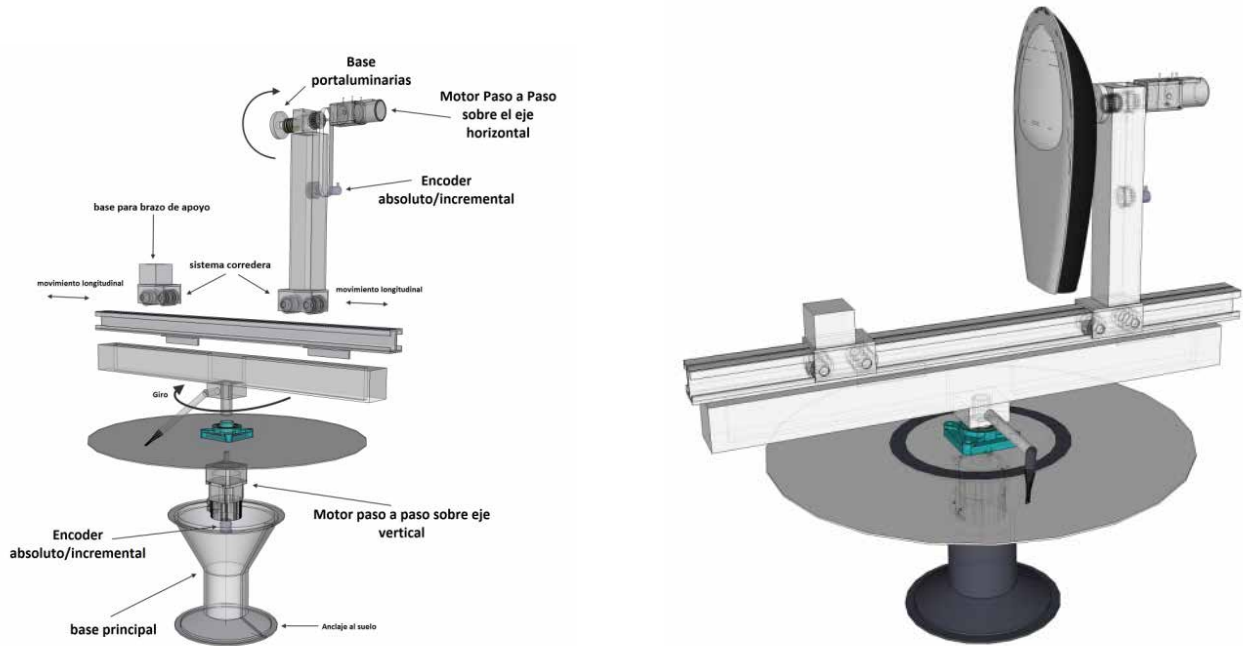


Figura 1. Fotogoniómetro automático computarizado: a) Vista isométrica en explosión; b) Sistema ensamblado en el laboratorio.

Fuente: Elaboración propia.

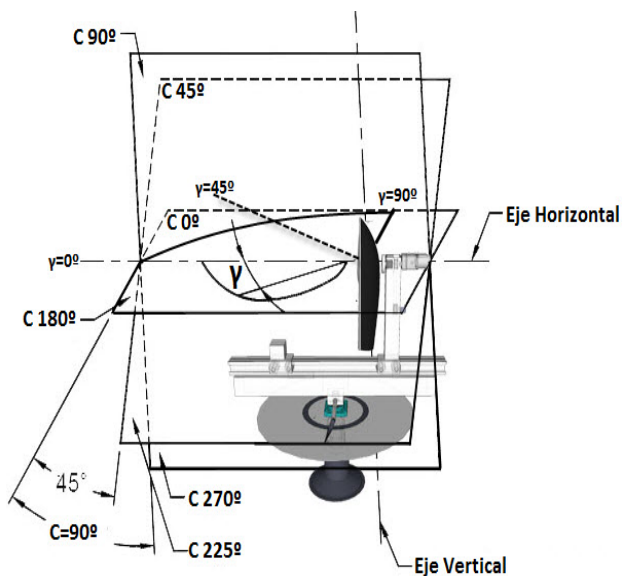


Figura 2. Sistema de coordenadas y montaje luminaria AP para fotometría de tipo C.

Fuente: Elaboración propia.

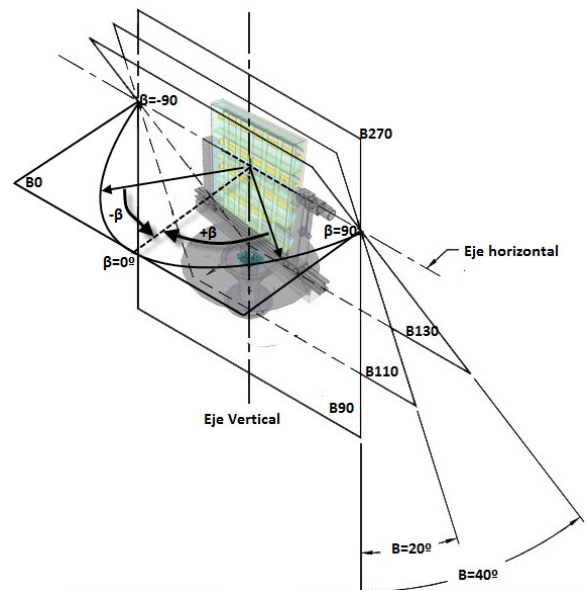


Figura 3. Sistema de coordenadas y montaje luminaria interior para fotometría de tipo B.

Fuente: Elaboración propia.

Es posible realizar la conversión entre los diferentes tipos de fotometrías, ya que para luminarias de tamaño superior a 30 cm se debe hacer una fotometría de tipo B (NTC Instituto de Normas Técnicas Colombianas, 2002) y convertirla a la requerida mediante las fórmulas consignadas en la tabla 1; sin embargo, el prototipo diseñado contempla la fotometría de tipo C. El procedimiento para la conversión entre fotometría está consignado en la Norma Técnica Colombiana (NTC Instituto de Normas Técnicas Colombianas, 2002).

Para el dimensionamiento de los requerimientos mecánicos del dispositivo fue necesario tener

en cuenta el peso de las luminarias (máximo 10 kg). Este determina cuánto torque deben tener los motores en cada uno de los ejes para que al girar, estos sean capaces de vencer la inercia y cargas de masa adicionales (usando el teorema de ejes paralelos), (Hibbeler, 2004) a la que son sometidos debido al movimiento. Se decide usar motores paso a paso con cajas reductoras puesto que la precisión de posicionamiento angular es uno de los factores clave para que las mediciones sean coherentes. La tabla 2 muestra las especificaciones técnicas de los motores que se usaron en desarrollo del proyecto.

Tabla 1. Ecuaciones de conversión para sistemas de planos.

Dirección		Ángulo de inclinación del plano	Ángulo en el plano
Dada	Deseada		
A, a	B, b	$\tan B = \tan a / \cos A$	$\sin b = \sin A / \sin a$
A, a	C, g	$\tan C = \tan a / \sin A$	$\cos g = \cos A / \cos a$
B, b	A, a	$\tan A = \tan b / \cos B$	$\sin a = \sin B / \cos b$
B, b	C, g	$\tan C = \sin a / \tan b$	$\cos g = \cos B / \cos b$
C, g	A, a	$\tan A = \cos C \tan g$	$\sin a = \sin C / \sin g$
C, g	B	$\tan B = \sin C \tan g$	$\sin g = \cos C / \sin g$

Fuente: (NTC Instituto de Normas Técnicas Colombianas, 2002).

Tabla 2. Características técnicas de los motores paso a paso.

	Motor horizontal	Motor vertical
Referencia	A4249-9215HG-A1 Oriental Motor	UPK596BA-PG36 Oriental Motor
Resolución en grados half step	0.036	0,01
Torque generado	18,4 N.m	37 N.m
Palanca máxima permitida	8 kg a 0.4 m	37 kg a 1 m
Frecuencia máxima de pulsos Arranque con carga	2,5 kHz	3,5 kHz
Número de pasos por vuelta	1000	500
Inercia del rotor	1,09 oz/in ²	7,65 oz/in ²
Torque de retención	18.4 N.m	37 N.m
Corriente	1,4A	1,4 A

Fuente: (Oriental Motors, 1996).

Cada motor paso a paso tiene un encoder de tipo incremental con Index (esto lo convierte en absoluto) para referenciar el cero de cada uno de los ejes y la resolución puede ser aumentada por software mediante PsoC Creator. La tabla 3 muestra las especificaciones técnicas del encoder.

Tabla 3. Características técnicas de ambos encoders.

Encoder TAMAGAWA TS5643 N110	
Resolución	11 bits o 2048 cuentas por vuelta
Voltaje	5 V
Corriente	150 mA
Protocolo de comunicación salida al driver	26C31 ANSI TIA/EIA 422-B/423-B
Máxima respuesta en frecuencia	170 kHz
Momento de inercia	1×10^{-6} kg.m ²

Fuente: (Tamagawa Seiki Co, s.f.)

Diseño fotométrico

Previamente se eligió un sensor de luz cuyo ajuste es acorde con la curva fotópica estandarizada por la CIE 121 (CIE Commission Internationale de L'éclairage, 1996); este sensor de luz fabricado por la empresa OSRAM SFH 5711 (Osram, 2006), cumple con este objetivo, dando una responsividad luminosa de 3% según el fabricante, respecto a la curva fotópica (Molina & Bermúdez, 2006), cualquier tipo de longitud de onda visible. Esto garantiza que no se requiere filtro de corrección de respuesta con relación a otros tipos de sensores de luz fabricados en silicio. El sensor de luz fue sometido a una serie de pruebas con el objetivo de determinar su comportamiento. Para hacer esta comparación se usó un luxómetro Extech HD450 (Extech, 2013), con el fin de observar cómo se comporta ante fuentes de luz estándar como son las incandescentes, fluorescentes, LED, sodio de alta presión, luz solar, entre otras, y mediante estas pruebas se desea comparar qué tan acertadas son las lecturas de iluminancia capturadas por el sensor con respecto al luxómetro, determinando un coeficiente

de correlación, el cual se ajuste con el mínimo permitido. En el sensor fotométrico se usó una tarjeta con un PsoC 3 que incorpora una ADC de 20 bits, LCD y comunicación USB HID en modo interrupción. La resolución obtenida es de 0,095 lux en un rango de 1 a 100.000 lux. El instrumento tiene auto-calibración cada vez que se conecta al computador, ajuste de ganancia, offset y errores propios de este tipo de dispositivos (Cypress, 2014). Para iluminancias menores que 1 lux se usa el sensor BH1620FVC con una resolución de 0,0005 lux en una escala de 0,05 a 500 lux. (Ver la figura 4).

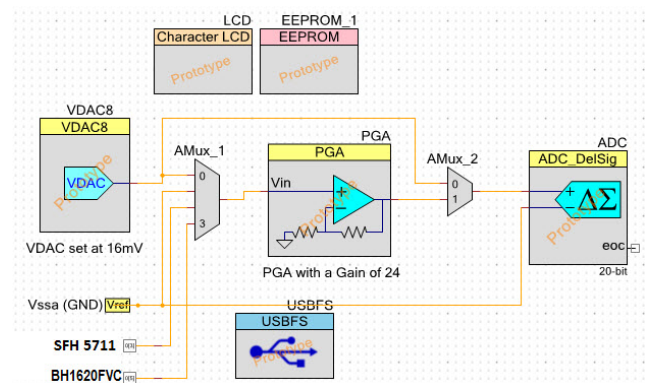


Figura 4. Diagrama implementación del sensor fotométrico.

Fuente: (Cypress, 2014).

Diseño óptico

El espacio en el cual se instaló este prototipo es demasiado pequeño para realizar una distribución luminosa simétrica, lo cual se solucionó con el uso de espejos que permitirán trasladar la energía radiante de la luminaria hasta la cabeza fotométrica. La distribución de la luz se extenderá al menos hasta 10 veces la longitud máxima de la luminaria (Mark, 2000; Marcos, 2007). Los dos espejos se dispusieron de tal forma que la distancia efectiva sea de 10 metros aproximadamente, tal como se ve en la figura 5. Esto significa que para poder garantizar que la energía radiante de la luminaria sea capturada por el sensor a la distancia a la cual se

situó, los espejos deben tener una medida mínima. La figura 6 muestra la distribución de la energía radiante desde el punto en donde está la luminaria hasta el punto en donde está la cabeza fotométrica. La distancia total está definida por la suma de $2D+d$, la cual en este caso es 10 m.

La figura 6 muestra cuáles son las distancias efectivas que la energía en forma de radiación de la luminaria recorrerá desde la fuente luminosa

hasta la cabeza fotométrica. Están representadas por $D1$, $D2$ y $D3$.

Para calcular el tamaño mínimo que deben tener los espejos se utiliza la trigonometría, asumiendo que el área efectiva del sensor se comporta como un punto en el espacio a la distancia en la cual se situó.

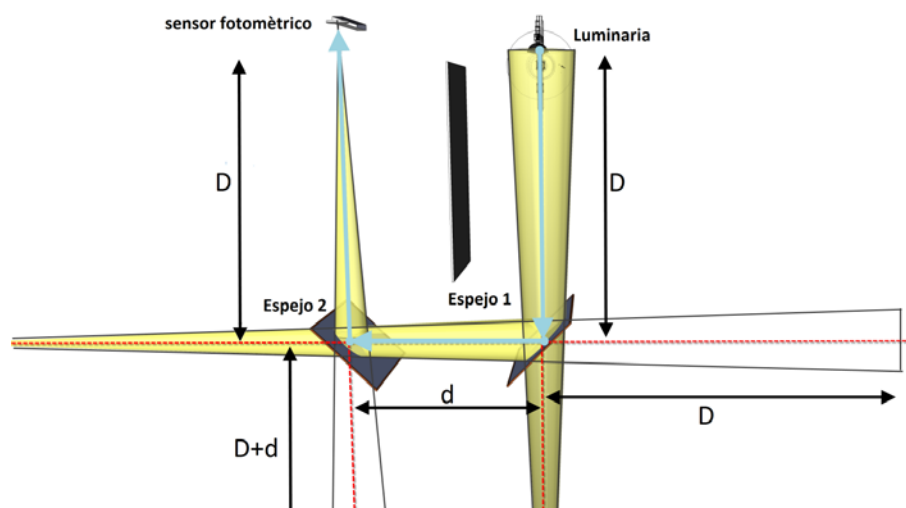


Figura 5. Distribución espacial de los espejos en el sitio de pruebas.

Fuente: Elaboración propia.

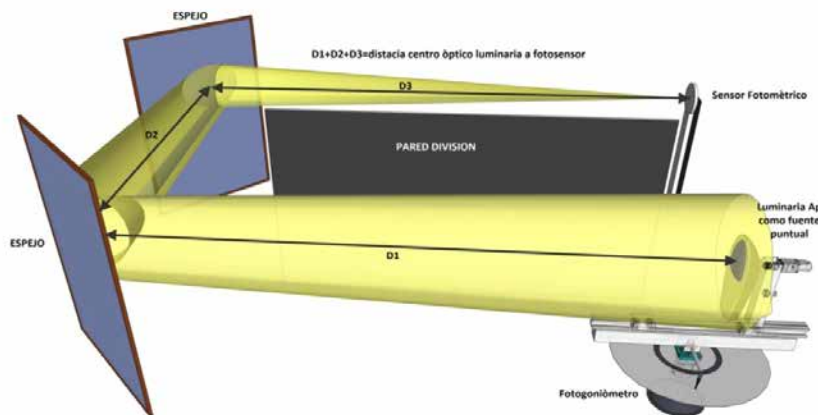


Figura 6. Distribución óptica de los espejos para trasladar la energía radiante de la luminaria como fuente puntual a la cabeza fotométrica.

Fuente: Elaboración propia.

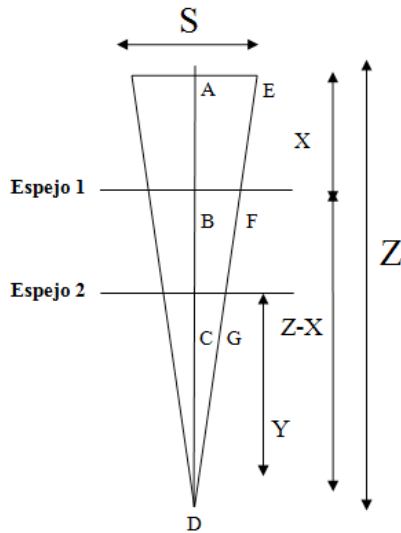


Figura 7. Cálculo de los espejos del fotogoniómetro.

Fuente: Elaboración propia.

Se tiene la distancia S que representa el tamaño máximo que ocupa la luminaria en el eje horizontal de la máquina, X representa la distancia del centro de la máquina o centro óptico de la luminaria al centro geométrico del primer espejo en el eje vertical y horizontal, Y representa la distancia entre el centro geométrico del primer espejo al segundo espejo y Z representa la distancia entre el centro de la máquina y el centro de la cabeza fotométrica. En la figura 7 se muestra cuáles son las mediciones que se mencionan.

Por semejanza de triángulos se llega a la conclusión de que $\triangle ADE \cong \triangle BFD$. Esta relación da como resultado la ecuación (1):

$$\frac{Z}{S} = \frac{Z - X}{\frac{S}{2}} \quad (1)$$

Donde \overline{BF} es el lado de interés para calcular la longitud horizontal del espejo 1. De manera análoga se efectúan los cálculos para hallar la altura mínima que deben tener los espejos. Los resultados se muestran en la tabla 4.

Tabla 4. Medidas mínimas de los espejos.

	ALTURA [m]	ANCHO [m]
ESPEJO 1	1,24	1,24
ESPEJO 2	0,77	0,77

Fuente: Elaboración propia.

Diseño electrónico

La adquisición de datos, control del sistema mecánico y el sistema fotométrico se hicieron mediante una tarjeta de desarrollo CY8CKIT030 PsoC 3, el cual se encarga de la lectura de los codificadores incrementales/absolutos que dan la referencia y posicionamiento de cada uno de los giros de ejes del fotogoniómetro, como también el control de los perfiles de velocidad en cada uno de los motores paso a paso. En el algoritmo del procesador estará integrada la rutina para ejecutar una prueba fotométrica de tipo C o B, de acuerdo con la normatividad. La figura 8 muestra un esquema de control y lectura de los dispositivos asociados como son los encoders y drivers Super Vexta UDX5114N de los motores paso a paso. La comunicación de los primeros se hace mediante protocolo serial diferencial ANSI TIA/EIA-422-B, TIA/EIA-423-B propios del dispositivo y los segundos mediante comunicación serial sin protocolo de comunicación.

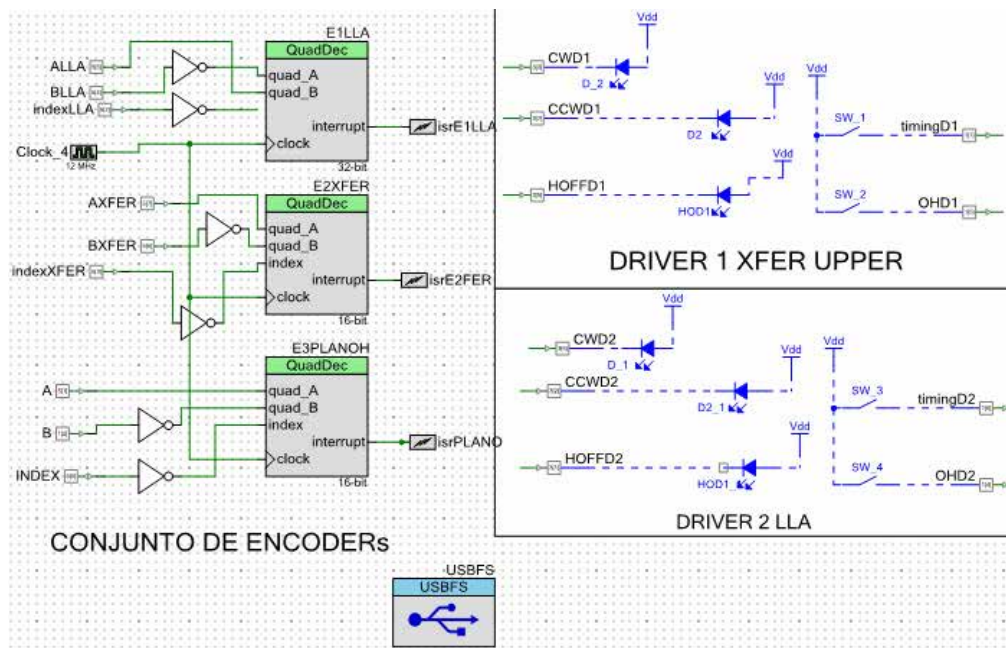


Figura 8. Esquema de configuración de la tarjeta de desarrollo PSoc 3.
Fuente: Elaboración propia.



Figura 9. Funcionamiento básico del motor.
Fuente: Elaboración propia.

El funcionamiento básico del motor y su driver se observa en la figura 9, en la cual por cada pulso enviado al driver el motor avanza un paso. En general, es el controlador principal quien determina cuántos pasos debe girar un motor de acuerdo con la cantidad de grados que debe moverse el fotogoniómetro en el eje que se especifique.

Perfiles de movimiento

Cada luminaria tiene características (Atmel, 2006) importantes que deben tenerse en cuenta a la hora de hacer un control. Sin embargo, una de las características que desempeñan un papel importante a la hora de dimensionar los motores que desplazarán

angularmente en los planos C y Gamma ($B-\beta$), es el torque al iniciar el giro (Hibbeler, 2004). El peso de la luminaria genera una inercia, que el motor debe vencer. Si un motor no tiene suficiente fuerza para generar el torque adecuado podría perder sincronización con los pulsos de giro, o en el peor de los casos podría no ser capaz de realizar el movimiento que se desea. El torque requerido para hacer girar una masa depende de la aceleración angular a la cual se quiere hacer girar y la propia inercia del sistema, lo cual significa que se puede disminuir notablemente si se arranca a una baja velocidad y luego se acelera, se llega a una velocidad máxima de desplazamiento y al finalizar el recorrido se desacelera nuevamente hasta llegar al reposo. Estos cambios de velocidad en virtud del movimiento que se hace para desplazar la masa una cantidad angular definida se denominan perfil de movimiento. El perfil de movimiento depende básicamente de 3 variables importantes: la velocidad máxima, el factor de aceleración o desaceleración y la cantidad de pasos que representa el desplazamiento angular de la masa (Hibbeler, 2004). En la figura 10 se muestra gráficamente el movimiento que debe seguir el perfil para mover una masa un determinado número de pasos. Esto garantiza que la inercia de la luminaria se traslade en forma suave y adecuada a lo largo del desplazamiento angular.

Subrutinas de programación tarjeta de desarrollo

La primera rutina consta de la calibración del ADC (Conversor Análogo Digital), en el cual se hace la adquisición de señal de fotocorriente que entrega el sensor y que posteriormente lo convierte en señales discretizadas digitales de 20 bits. La segunda rutina aporta la interconexión de los datos con la interfaz gráfica en Labview. Envía los datos que brinda información de los periféricos de manera instantánea y también recibe, de manera simultánea, las órdenes de control que el usuario desee hacer sobre la máquina. La tercera rutina ejecuta los perfiles de movimiento, dependiente de la cantidad de grados de giro que se desee en los planos C y Gamma, de la velocidad y de la aceleración de los ejes de rotación de la luminaria. La cuarta rutina envía los pulsos, su número y frecuencia a los drivers de los motores con los datos obtenidos en el cálculo del perfil de movimiento en los motores paso a paso de cada uno de los ejes. Dentro de la rutina de perfiles de movimiento existen 4 estados que son importantes para el desplazamiento de los motores en cada uno de los ejes. En la figura 11 se muestran los estados de aceleración, velocidad constante, desaceleración y parada.

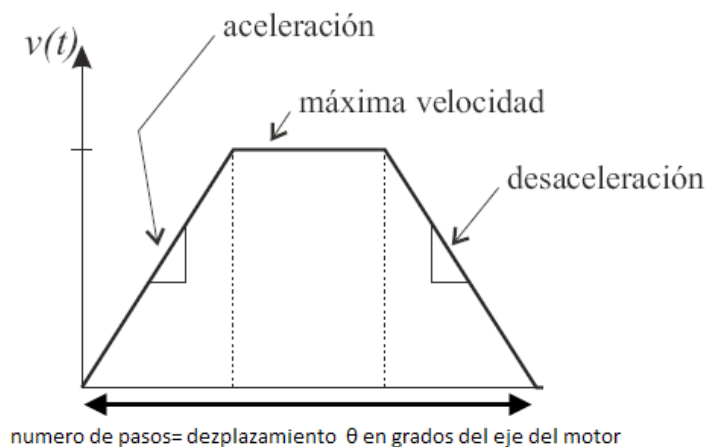


Figura 10. Perfil de velocidad para una cantidad de pasos establecida.

Fuente: (Atmel, 2006).

Esquema general de periféricos del fotogoniómetro

La tarjeta de desarrollo es básicamente el procesador central de cada uno de los subprocesos que debe llevar a cabo una prueba fotométrica. En la figura 11 se muestra el esquema general, compuesto por los periféricos que tiene el fotogoniómetro y que forman parte fundamental del diseño.

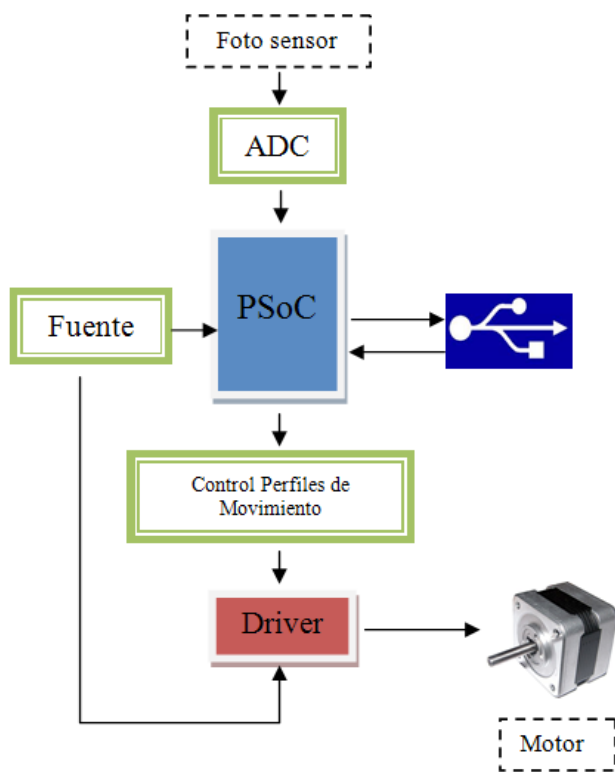


Figura 11. Diagrama de bloques para procesos.

Fuente: Elaboración propia.

CALIBRACIONES

Cabeza fotométrica

Como se mencionó antes, las pruebas para comprobar la respuesta del sensor SFH5711, en comparación con las mediciones del luxómetro HD450, arrojaron los siguientes comportamientos: la figura 12 muestra

las curvas de variación de iluminancia de la fuente luminosa y la respuesta del luxómetro y del sensor SFH 5711 ante una fuente incandescente, de fabricante Sylvania, de 100 W a una distancia de 1 m.

Los resultados de las pruebas arrojan que la cabeza fotométrica diseñada tiene un coeficiente de correlación de 0.990 con respecto al instrumento referencia, lo cual permite tener confiabilidad en las mediciones que se realizarán y tendrán al menos 90% de confiabilidad.

Reflectancia de los espejos

La reflectancia de los espejos es una medida que se requiere para ajustar la magnitud de las iluminancias obtenidas, puesto que al desviar la energía radiante en forma de luz hacia la cabeza fotométrica ocurren pérdidas por absorbanza y transmitancia (Olsen, 1990) propias del material. (Hongn, Flores, Altamirano, & L. Saravia, 2011).

Existen pruebas técnicas y experimentos que sirven para determinar las características de reflectividad de estos materiales, de los cuales la opción más adecuada se encuentra en el espejo de 2 mm de espesor, pues su reflectancia ponderada es 0,79 en el espectro electromagnético de la luz visible (Olsen, 1990) (Hongn, Flores, Altamirano, & L. Saravia, 2011). Adicionalmente, debido a las fabricaciones propias de cada marca de espejos se llevó a cabo un experimento similar en donde se observa la reflectancia en virtud del ángulo de incidencia del rayo. La figura 13 muestra las pruebas que se hicieron a los diferentes espesores de espejos como función del ángulo de incidencia de la luz.

RESULTADOS EXPERIMENTALES

Una de las pruebas que se hacen a un dispositivo con el cual se desea efectuar mediciones de variables físicas es la intercomparación con un patrón que esté certificado. Cuando se hizo dicha comparación entre la matriz que facilita el fabricante con la matriz que se obtuvo del fotogoniómetro construido, se obtuvo que el coeficiente de correlación

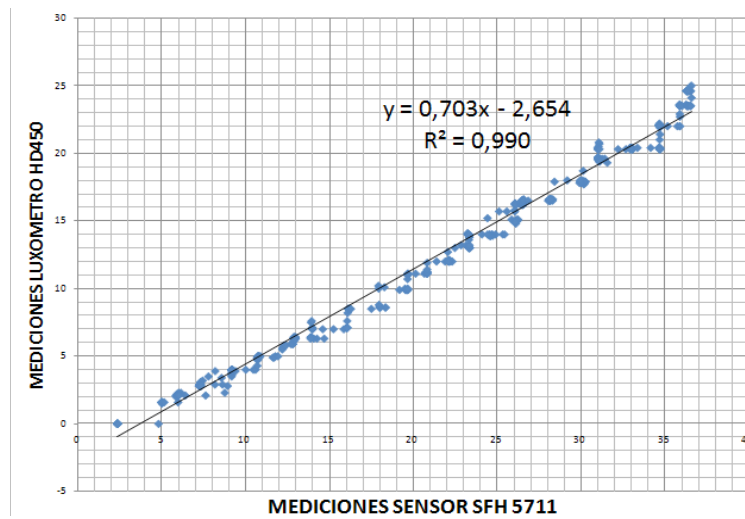


Figura 12. Resultados de prueba de intercomparación SFH5711 vs. Exttech en la bombilla incandescente de 100 W.

Fuente: Elaboración propia.

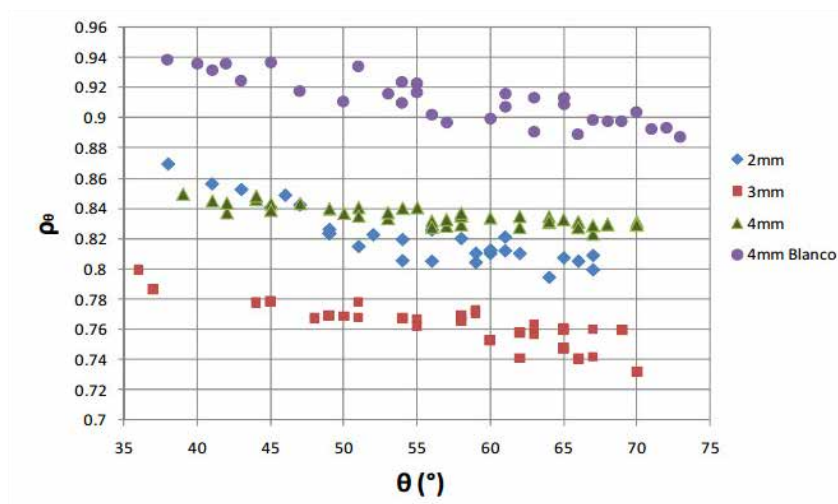


Figura 13. Experimento para determinar la reflectancia de los espejos usados.

Fuente: (Hongn, Flores, Altamirano, & L. Saravia, 2011).

entre los dos es de 90% para la CALIMA I de 150 W, 95% para la CALIMA I de 70 W y 93% para la NANO de Schröder, todas de sodio de alta presión. La luminaria de prueba es la NANO 1 de Schreder, cuya bombilla de prueba fue una Sylvania de sodio de alta presión de 70 W. Se hicieron mediciones en los planos representativos de la luminaria, como son el plano 0,90, 180 y 270. En las tablas

se muestran los datos de cada plano que se desea analizar y los datos del ángulo gamma entre 0 y 90 grados, la intensidad del fabricante, la intensidad medida del fotogoniómetro, el ajuste de los datos medidos a la curva de correlación, el error relativo entre los datos corregidos y los datos del patrón, y el error medio cuadrático en cada uno de los planos observados.

La figura 14 muestra la gráfica de correlación de los puntos para los planos C = 0, C = 90, C = 180 y C = 270 y las ecuaciones de correlación.

La tabla 5 muestra las mediciones efectuadas en los planos C = 0, C = 90, C = 180 y C = 270 para el ángulo gamma comprendido entre 0 y 90.

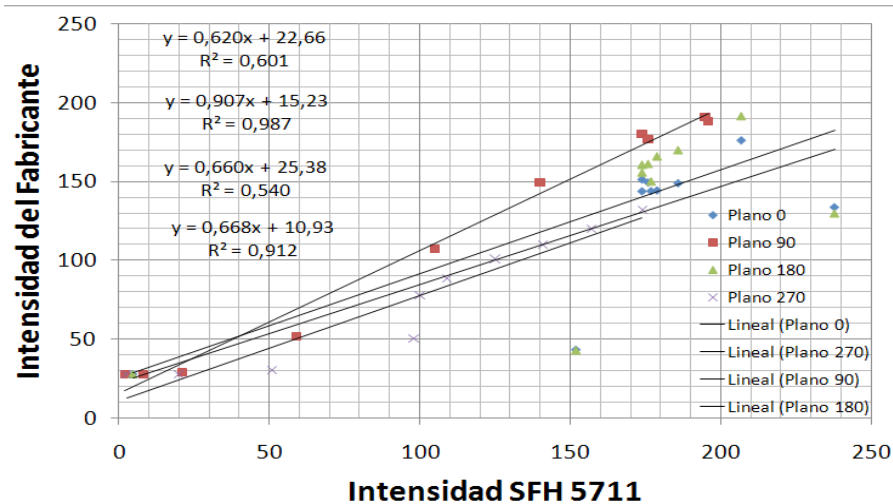


Figura 14. Gráfica de intensidades, plano C = 0; C = 90; C = 180 y C = 270.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 5. Valores medidos por el sensor y valores dados por el fabricante.

Gamma / C	Intensidad fabricante				Intensidad SFH5711			
	0	90	180	270	0	90	180	270
0	174	174	174	174	143,677	180,017	155,716	131,669
10	176	196	176	157	149,304	188,403	161,197	119,529
20	174	195	174	141	151,17	190,955	160,621	109,907
30	177	176	177	125	143,84	177,126	150,08	100,695
40	179	140	179	109	144,251	149,624	165,99	88,4852
50	186	105	186	100	148,78	107,118	169,947	77,5685
60	207	59	207	98	176,021	51,4874	191,513	50,2877
70	238	21	238	51	133,574	28,9759	129,76	29,977
80	152	7,83	152	20	43,0783	27,5127	42,68	27,5147
90	4,52	1,96	4,52	2,56	27,5127	27,5126	27,5144	27,5149

Fuente: Elaboración propia.

En la tabla 6 se muestra el cálculo de los ajustes de los valores medidos por el sensor con la recta de ajuste calculada.

En la tabla 7 se muestra el cálculo de los errores en cada uno de los planos de observación y sus respectivos errores cuadráticos.

Tabla 6. Corrección de valores a la recta de ajuste.

Gamma / C	Corrección a la recta de ajuste			
	0	90	180	270
0	130,54	178,50573	183,23533	174,80089
10	131,78	186,11119	187,71935	158,09609
20	130,54	188,42632	187,24821	144,85571
30	132,4	175,88334	178,62543	132,17969
40	133,64	150,939	191,64015	115,37957
50	137,98	112,3864	194,8766	100,35823
60	151	61,929064	212,51759	62,819872
70	170,22	41,511135	162,0036	34,872312
80	116,9	40,183982	90,772215	31,484209
90	25,4624	40,183935	78,366804	31,484481

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 7. Errores absolutos y errores cuadráticos de cada plano.

Gamma / C	Error relativo				E ²			
	0	90	180	270	0	90	180	270
0	0,333	0,03	-0,05	0	1,20118	0,00064	0,00254	0,00002
10	0,336	-0,05	-0,06	-0,01	2,05691	0,00282	0,00390	0,00005
20	0,333	-0,03	-0,07	-0,03	2,81531	0,00122	0,00501	0,00071
30	0,337	0	-0,01	-0,05	0,90986	0,00000	0,00008	0,00295
40	0,339	0,07	-0,07	-0,06	0,78050	0,00525	0,00435	0,00306
50	0,348	0,07	-0,05	0	0,78398	0,00432	0,00207	0,00001
60	0,371	0,05	-0,03	0,56	3,55678	0,00224	0,00067	0,31362
70	0,398	0,49	0,47	0,46	10,05404	0,24415	0,22006	0,21389
80	0,3	0,81	0,67	-0,36	126,50545	0,64826	0,45498	0,13305
90	-0,82	0,95	-0,94	-0,92	0,15280	0,90483	0,88797	0,84399

Fuente: Elaboración propia.

En la tabla 8 se observa el resumen de los errores medios y los coeficientes de correlación en cada uno de los planos de observación.

Tabla 8. Errores absolutos y errores cuadráticos de cada plano.

	Error medio	Coefficiente de correlación
0	3,86	0,601358391
90	0,42588	0,987176234
180	0,39769765	0,54044595
270	0,38876007	0,91261434
Error medio cuadrático general		1,9604

Fuente: Elaboración propia.

Después de observar los resultados, los errores medios cuadráticos en cada uno de los planos $C = 0$ y $C = 180$ son considerables puesto que su coeficiente de correlación es muy bajo. En los planos $C = 90$ y $C = 270$, son mucho mejores puesto que el coeficiente de correlación es mucho más representativo. Sin embargo, las mediciones tienen márgenes de error considerables debido a ciertas interferencias en el mismo proceso.

CONCLUSIONES

Se desarrolló un dispositivo que cumple con las especificaciones requeridas para el laboratorio y funciona para caracterizar luminarias de alumbrado público de sodio de alta presión.

Se logró implementar una tecnología novedosa y muy flexible en el control del fotogoniómetro y la cabeza fotométrica, como lo es la tarjeta de desarrollo PSoC 3, permitiendo así darle un instrumento al laboratorio de Iluminación de la Facultad Tecnológica, que permita construir curvas fotométricas y efectuar prácticas de laboratorio referentes a la luminotecnía.

Según la norma CIE121-1996, el tipo de fotogoniómetro apropiado para la disposición de espacio con que cuenta el laboratorio de Iluminación de la

Facultad Tecnológica es del tipo B, que está en capacidad de construir fotometrías de tipo C.

Se implementó un sensor de luz adecuado y que se aproxima con una exactitud de 98% a la curva fotópica del ojo humano, información dada por el fabricante, el cual brinda medidas de iluminación con un porcentaje de 90% de confiabilidad respecto al luxómetro HD450 Extech debidamente patronado y calibrado. propiedad del laboratorio de Tecnología en Electricidad de la Universidad Distrital.

Se desarrolló una aplicación basada en LAB View, que permite hacer el control del fotogoniómetro por medio de un computador en conexión USB.

Las mediciones no se aproximan a lo esperado debido a ciertas interferencias propias a causa de la limitación en el presupuesto del prototipo. Realizar el ajuste en cero para todos los ejes es una tarea que puede generar errores en las mediciones. No se diseñó un dispositivo que cumpliera con esa labor. También la fuente de alimentación eléctrica para las luminarias no cumple con lo pedido por la norma. Es necesario calcular la reflectancia de los espejos para la longitud de onda espectral en cada una de las luminarias de prueba.

FINANCIAMIENTO

Este proyecto de investigación fue financiado por la Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

REFERENCIAS

- Atmel (06 de 2006). *Atmel AVR446*. Recuperado el 02 de 2013, de: <http://www.atmel.com>
- CIE Commission Internationale de L'éclairage (1996). CIE 121. *Technical Report. The photometry and Goniphotometer of Luminaries*.
- CIE Commission Internationale de L'éclairage (1987). CIE 69. *Methods of characterizing Illuminance meters and Luminance meters*.
- CIE Commission Internationale de L'éclairage (1987). CIE 70. *The measurements of absolute luminous intensity distributions*.

- CIE Commission Internationale de L'éclairage (1993). CIE 102. *Recommended file format for electronic transfer of Luminarie*.
- Commission Internationale de L'éclairage (1989). CIE 84. *Measurement of Luminous Flux*.
- Cypress (13 de 02 de 2014). *Cypress*. Recuperado el 12 de 04 de 2013, de: <http://www.cypress.com/?rID=50320>
- Extech (07 de 2013). *Extech Instruments*. Recuperado el 12 de 04 de 2013, de: http://www.extech.com/instruments/resources/manuals/HD450_UMsp.pdf
- Hibbeler, R. (2004). *Mecánica Vectorial para Ingenieros* (vol. 1). México: Pearson.
- Hongn, M.; Flores, L. S.; Altamirano, M., & L. Saravia, M. G. (2011). Estudio de reflectancia de espejos para un concentrador solar Fresnel lineal. *ASADES*, 197.
- IESNA Illuminating Engineering Society of North America (2002). LM-69 IESNA. *Approved guide for interpretation of roadway luminaire photometric*. North America.
- IESNA Illuminating Engineering Society of North America (2002). LM-63 IESNA. *Standart file format for the electronic transfer of photometric data and related information*. North America.
- IESNA Illuminating Engineering Society of North America (2001). LM-75 IESNA. *Goniophotometer tyoes and photometric coordinates*. North America: Illuminating Engineering Society of North America.
- Marcos, A. M. (2007). *Apuntes de Fotometría*.
- Mark, R. S. (2000). *The IESNA, Lighting Handbook- Reference and Application* (vol. 1). New York: IESNA.
- Molina, J. C., & Bermúdez, J. C. (2006). Calibración de responsividad absoluta de detectores fotométricos para la realización de la candela, p. 5. Carretera a los cués, El marqués.
- NTC Instituto de Normas Técnicas Colombianas (2002). NTC 5109. *Medición de flujo luminoso*. Colombia.
- Olsen, E. D. (1990). *Métodos Ópticos de Análisis* (vol. 1). New York: Reverté.
- Oriental Motors (1996). *Oriental Motors Catalog*. Obtenido de: <http://www.orientalmotor.com/products/CatalogPdf.htm>
- Osram (18 de 08 de 2006). Recuperado el 01 de 07 de 2013, de: http://www.osram.com/osram_com/
- Tamagawa Seiki Co. (s.f.) Recuperado el 15 de 01 de 2013, de: <http://www.tamagawa.com.tw>



