



Ingeniería y Competitividad
ISSN: 0123-3033
inycompe@gmail.com
Universidad del Valle
Colombia

Arias-Cuellar, Alexander; Ealo-Cuello, Joao L.; Caicedo, Eduardo
Diseño, construcción y calibración de un fotogoniómetro para la empresa colombiana de luminarias
Roy Alpha S.A.
Ingeniería y Competitividad, vol. 9, núm. 1, 2007, pp. 45-56
Universidad del Valle
Cali, Colombia

Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=291323498004>

- ▶ Cómo citar el artículo
- ▶ Número completo
- ▶ Más información del artículo
- ▶ Página de la revista en redalyc.org

Diseño, construcción y calibración de un fotogoniómetro para la empresa colombiana de luminarias Roy Alpha S.A.

Alexander Arias-Cuellar*, Joao L. Ealo-Cuello**,§, Eduardo Caicedo***

* Departamento de Diseño y Desarrollo de Productos Nuevos, Multipartes S.A., Cali, Colombia

** Escuela de Ingeniería Mecánica, Universidad del Valle, Cali, Colombia

*** Escuela de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Universidad del Valle, Cali, Colombia

§ e-mail: joaoealo@univalle.edu.co

(Recibido: Septiembre 14 de 2006 - Aceptado: Marzo 30 de 2007)

Resumen

En este trabajo se describe el diseño, construcción y calibración mecánica de un fotogoniómetro para el laboratorio de fotometrías de la empresa colombiana de luminarias *Roy Alpha S.A.* Este desarrollo fue realizado en el marco de un proyecto universidad-empresa entre *Roy Alpha S.A.* y la Universidad del Valle. Se presenta primero un breve resumen de los diferentes tipos posibles de fotogoniómetros, su modo de funcionamiento y su importancia para el diseño de luminarias. Igualmente, se hace una descripción resumida del diseño concebido y construido. Finalmente, se expone la metodología de calibración implementada, la cual permitió establecer, antes de realizar medidas fotométricas, que la calidad del diseño mecánico del fotogoniómetro era la adecuada para la realización de medidas fotométricas en laboratorio. La comparación entre las fotometrías obtenidas con el fotogoniómetro construido y calibrado y las que se realizaron en un laboratorio de mayor infraestructura tecnológica, mostró diferencias no mayores al 3%. La inversión realizada por *Roy Alpha S.A.* fue de aproximadamente el 25 % del costo que implicaría adquirir un sistema de fotogoniómetro importado.

Palabras clave: Fotogoniómetro, Goniófotómetro, Luminaria, Fotometría, Matriz de intensidades, Calibración, Diseño mecánico.

Design, assembling, and calibration of a photogoniometer for the Colombian luminaries manufacturer Roy Alpha, Inc.

Abstract

This project, carried out as a collaborative effort between Universidad del Valle and the Colombian luminaries manufacturer *Roy Alpha, Inc.*, describes the design and calibration of a photogoniometer for the company's photometry lab. A brief summary is given regarding the different types of photogoniometers, their operation, and the important role they play in the luminary design process. Also, a description is given of the design that has been conceived and constructed. Lastly, the methodology of calibration is explained, a methodology which made it possible to assure that the system's assembly was adequate before making any photometric measurements in the laboratory. A comparison made between the photometries obtained with this photogoniometer and those carried out in a certified laboratory showed differences no greater than 3%. The total investment of *Roy Alpha, Inc.*, in this project was approximately 25 % of the purchase price of an imported photogoniometer system.

Keywords: Photogoniometer, Goniophotometer, Luminaries, Photometry, Intensity matrix, Calibration, Mechanical design.

1. Introducción

La expansión del alumbrado público produce grandes ventajas en seguridad vial y ciudadana. 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 lumínosa 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.

Con aún menos trascendencia en Colombia (por la falta de conciencia sobre el costo), resulta 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 sobrecosto de las instalaciones que el usuario paga innecesariamente (Alcaldía-Bogotá, 2004).

De lo anterior, surge la necesidad por parte de las empresas fabricantes de luminarias de contar con la tecnología que permita diseñar y optimizar sus productos, de modo que la energía lumínosa sea bien aprovechada en cada aplicación específica (Rea, 1993). Para esto, es necesario considerar las características propias de cada aplicación y concebir fuentes luminosas que atiendan a requerimientos como buena visibilidad, satisfacción visual, bajos costos de instalación y funcionamiento, direccionalidad del patrón de emisión, durabilidad en condiciones de operación, etc.

Para clasificar, caracterizar y diseñar luminarias es necesario realizar pruebas de laboratorio llamadas fotometrías, las cuales permiten determinar la forma de la distribución lumínica de la fuente, así como el valor de las intensidades luminosas 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 en toda la periferia o direcciones del espacio a las que una fuente emite luz y se conocen como los montajes tipo A, B y C, los cuales se describen en este trabajo (Rea, 1993; Marx, 1997).

Roy Alpha S.A. (www.royalpha.com.co) es una organización colombiana dedicada a la fabricación y comercialización de luminarias y balastos de sodio, mercurio y haluros metálicos, para iluminación de vías, áreas industriales y comerciales, escenarios deportivos y áreas exteriores en general.

Este artículo es resultado del proyecto realizado entre esta empresa y la Universidad del Valle, el cual consistió en la actualización del laboratorio de fotometrías y comprendió el diseño, construcción y puesta a punto de un montaje mecánico tipo fotogoniómetro y la optimización del *software* de control ya existente. Este trabajo está centrado principalmente en la primera parte del proyecto, es decir, en la descripción del sistema mecánico que constituye el fotogoniómetro construido. Los requisitos expuestos por *Roy Alpha S.A.* para el montaje incluyeron además, el diseño de dos soportes que resultaran funcionales para la variedad de luminarias producidas por la empresa, los cuales no se describen en este trabajo. De igual forma, por cuestiones de confidencialidad, la información referente al diseño estructural ha sido omitida.

Aunque el diseño y construcción de fotogoniómetros es bien conocido y aplicado (Villuendas, 1999; IAR; Holophane), son escasos los proyectos, desarrollados en América Latina, similares al que se presenta en este trabajo. Cabe mencionar el proyecto *Control del fotogoniómetro del laboratorio de fotometría*, realizado en 1997 en la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Chile. En Colombia, únicamente es posible citar el trabajo realizado por la Facultad de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Tecnológica de Pereira, proyecto que sólo involucró la automatización del proceso de obtención de curvas fotométricas (Orozco & Holguín, 1999). Por tanto, el proyecto que aquí se reporta, es pionero en la industria de la iluminación en Colombia.

1.1 Principio de funcionamiento del fotogoniómetro

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, llamadas fotometrías, es conocer la 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 *isocandela* e *isolux*, así como también la matriz de distribución de intensidades luminosas y en general, diagramas polares de intensidad en diferentes planos. 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).

Existen varios tipos o sistemas de montajes que cumplen el propósito de un fotogoniómetro y se describen a continuación.

1.1.1 Sistema de eje horizontal fijo: fotogoniómetro tipo A

Con este sistema, mostrado en la Figura 1a, se tiene una rotación de la luminaria alrededor del eje horizontal fijo **Y** generando una circunferencia. A su vez, se tiene la posibilidad de girar la luminaria alrededor de un eje vertical **X** completando así la esfera sobre la cual se toman los datos (Figura 1b).

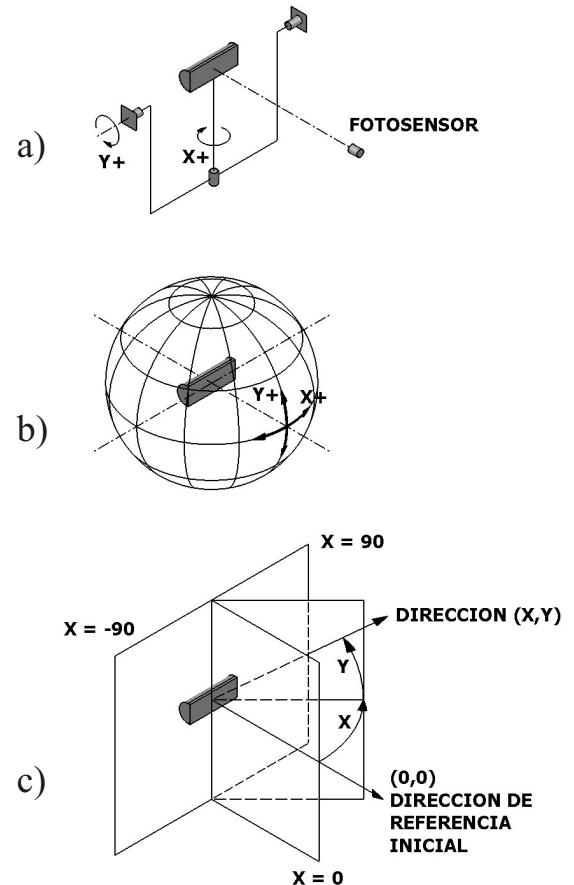


Figura 1. Fotogoniómetro tipo A. a) principio de funcionamiento. b) esfera de medición. c) sistema de coordenadas. (Adaptado de IES Lighting Handbook, 1987, Illuminating Engineering Society of North America).

En el sistema de coordenadas, los ángulos entre planos son denominados **X** y los ángulos medidos en un plano son denominados **Y** (Figura 1c).

1.1.2 Sistema de eje vertical fijo: fotogoniómetro tipo B

Con este sistema, mostrado en la Figura 2a, se genera la esfera sobre la cual se toman los datos (Figura 2b) pero el eje fijo es el vertical. En el sistema de coordenadas, los ángulos entre planos

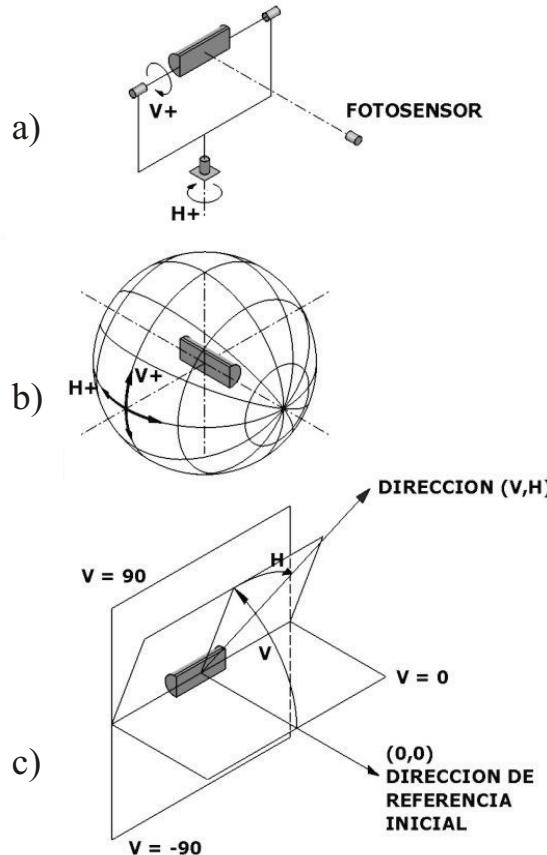
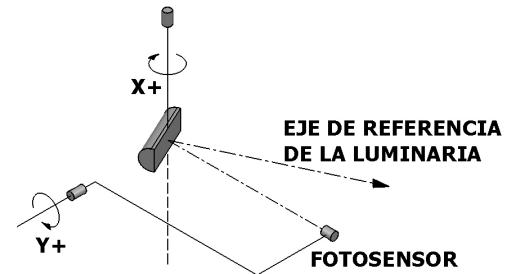


Figura 2. Fotogoniómetro tipo B. a) principio de funcionamiento. b) esfera de medición. c) sistema de coordenadas. (Adaptado de IES Lighting Handbook, 1987, Illuminating Engineering Society of North America).

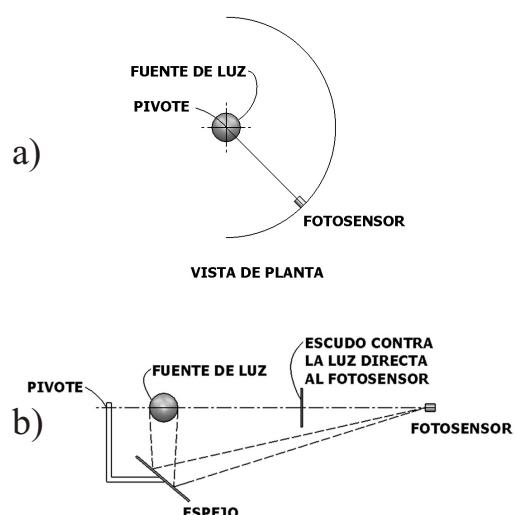
son denominados **V** y los ángulos medidos en un plano son denominados **H** (Figura 2c).

1.1.3 Sistema de fotosensor o espejo móvil: fotogoniómetro tipo C

Este sistema presenta un fotosensor, encargado de la toma de datos, o un espejo móvil alrededor de un eje horizontal como se muestra en la Figura 3. Se caracteriza por tener la luminaria suspendida en una orientación fija en el espacio, pudiéndose mover sólo alrededor de un eje vertical. El fotosensor o espejo gira alrededor de la luminaria en un plano vertical.



Existen dos estilos de fotogoniómetro tipo C: el que presenta un fotosensor móvil montado sobre una guía en forma de medialuna con centro en el “centro fotométrico” de la luminaria (Figura 4a), y el que posee un espejo que orbita alrededor de la luminaria (Figura 4b). En este último los rayos de luz provenientes de la fuente luminosa son recogidos por el espejo que los refleja hacia el fotosensor. La fuente luminosa bajo prueba puede girar 360° alrededor de su propio eje vertical. La inclinación de los rayos de luz (ángulos verticales sobre cada plano), se simula mediante el giro vertical del espejo entre 0° y 180° alrededor de la fuente. Para evitar la incidencia directa de la luz



emitida sobre el fotosensor, se utiliza una barrera física, de modo que toda la radiación medida es de tipo reflejado.

De esta manera, se logra que la distancia entre fuente y fotosensor sea mayor a 5 veces el diámetro mayor de la luminaria bajo prueba, por lo que ésta puede ser considerada como una fuente puntual, facilitando la estimación de las cantidades fotométricas.

Dadas las restricciones del espacio del laboratorio y con la intención de lograr la mayor distancia posible entre fuente y fotosensor, el fotogoniómetro tipo C con espejo fue seleccionado como alternativa de diseño.

2. Metodología

2.1 Diseño del fotogoniómetro

El fotogoniómetro como sistema aparece representado en la Figura 5. Como se aprecia, está constituido por un montaje mecánico, un sistema de control que busca garantizar el posicionamiento preciso y óptimo de dicho montaje y un sistema de adquisición de la información, tanto la proveniente de los sensores instalados sobre el fotogoniómetro como de la cabeza fotosensora o radiómetro. La Figura 6 muestra un esquema general del montaje mecánico y su orientación respecto al fotosensor.

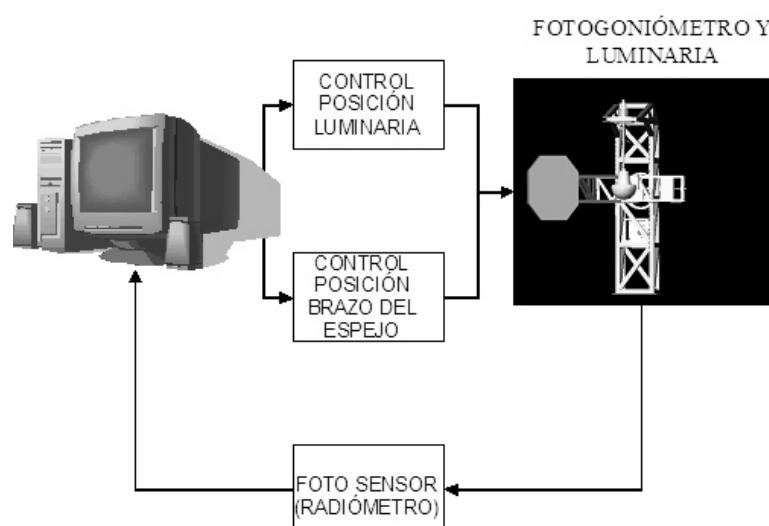


Figura 5. El fotogoniómetro como sistema con sus partes constitutivas.

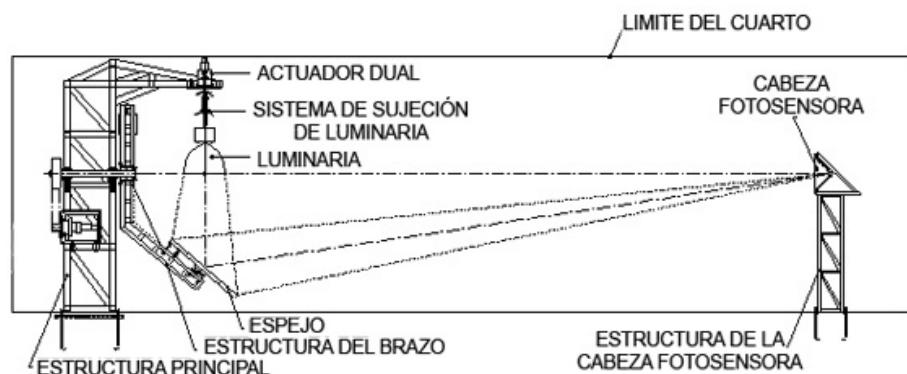


Figura 6. Descripción general del fotogoniómetro tipo C diseñado y construido en este proyecto.

El montaje mecánico del fotogoniómetro está constituido básicamente por una estructura empotrada al suelo por medio de anclajes con tuercas de sujeción y tornillos de nivelación como se puede observar en la Figura 1. Esta estructura principal posee un tramo en cantilever de donde se soporta el mecanismo de sujeción/rotación de la luminaria; este es el encargado de abrazar el acople del cual pende la lámpara, además tiene la característica de moverse verticalmente por medio de un actuador lineal para nivelar el centro fotométrico de la luminaria a la altura del fotosensor al que son enviados los rayos de luz por medio del espejo reflector. Todo el sistema de sujeción puede rotar conjuntamente con la luminaria respecto a su eje vertical, gracias a un motor paso a paso.

Sobre la estructura principal está también sujeto el eje al cual se apoya el brazo que soporta el espejo reflector. Este brazo tiene la posibilidad de girar 180° , gracias a un sistema de transmisión de correa y poleas dentadas accionado por un

servomotor. El fotosensor se encuentra colocado enfrente del montaje, sobre una pequeña estructura y alineado precisamente con el eje de rotación del brazo que soporta el espejo.

El problema principal de diseño del fotogoniómetro consistió fundamentalmente en: 1) garantizar la verticalidad del eje soporte de la luminaria bajo prueba y 2) minimizar la deflexión del brazo giratorio que soporta al espejo a lo largo de sus 180° de recorrido. En el primer caso, se realizó el cálculo dimensional de las piezas teniendo en cuenta la peor condición de carga posible, es decir, al utilizar la luminaria de mayor peso y cuyo centro de masa estuviese más alejado del centro de rotación. Las deformaciones en el extremo en cantilever de la estructura no excedieron 0.5 mm. En cuanto a las deflexiones del brazo, éstas se deben a esfuerzos combinados de flexión y torsión. Aunque dichos esfuerzos no resulten elevados, si la deflexión del brazo no es mantenida dentro de límites estrechos, la dirección real del flujo de luz sufre una desviación que resulta inaceptable (ver Figura 7).

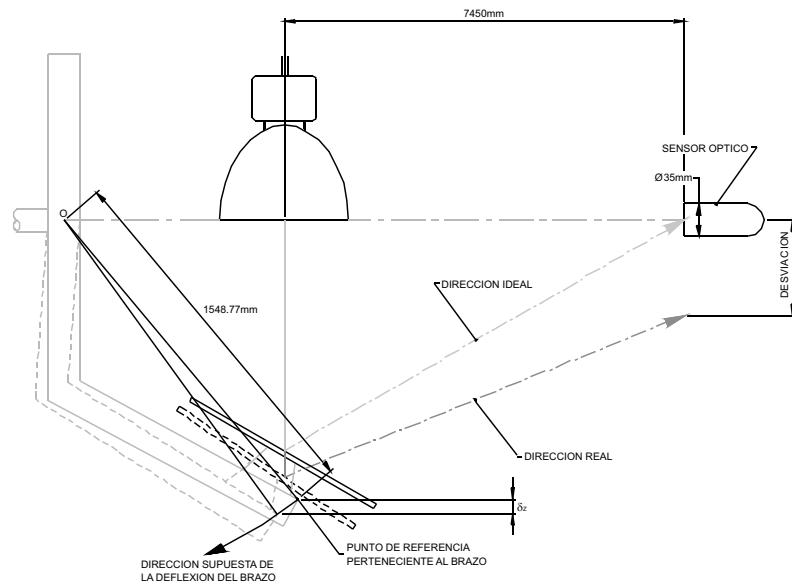


Figura 7. Efecto de la deflexión del brazo sobre la dirección del haz ideal reflejado.

Por medio del análisis por elementos finitos del brazo en diferentes posiciones angulares, fue posible concebir un diseño del brazo con una buena relación peso-rigidez, con deflexiones verticales inferiores a 0.6 mm (ver Tabla 1 y Figura 8).

Las deflexiones horizontales estimadas resultaron del orden de 10^{-2} mm, por lo que no se muestran. Cabe anotar que los cálculos realizados consideran que el brazo está balanceado y en equilibrio, suposición que resulta válida puesto que el movimiento de rotación del brazo es discreto a pasos angulares según la norma. Además, el control de la velocidad de rotación del brazo evita las posibles deflexiones provocadas por la inercia.

Tabla 1. Deflexiones verticales máximas medidas en la base del espejo para diferentes posiciones angulares del brazo.

Posición del brazo (°)	Deformación vertical (mm)
0.0	0.58
22.5	0.26
45.0	0.49
67.5	0.26
90.0	0.51
112.5	0.26
135.0	0.51
157.5	0.26
180.0	0.58

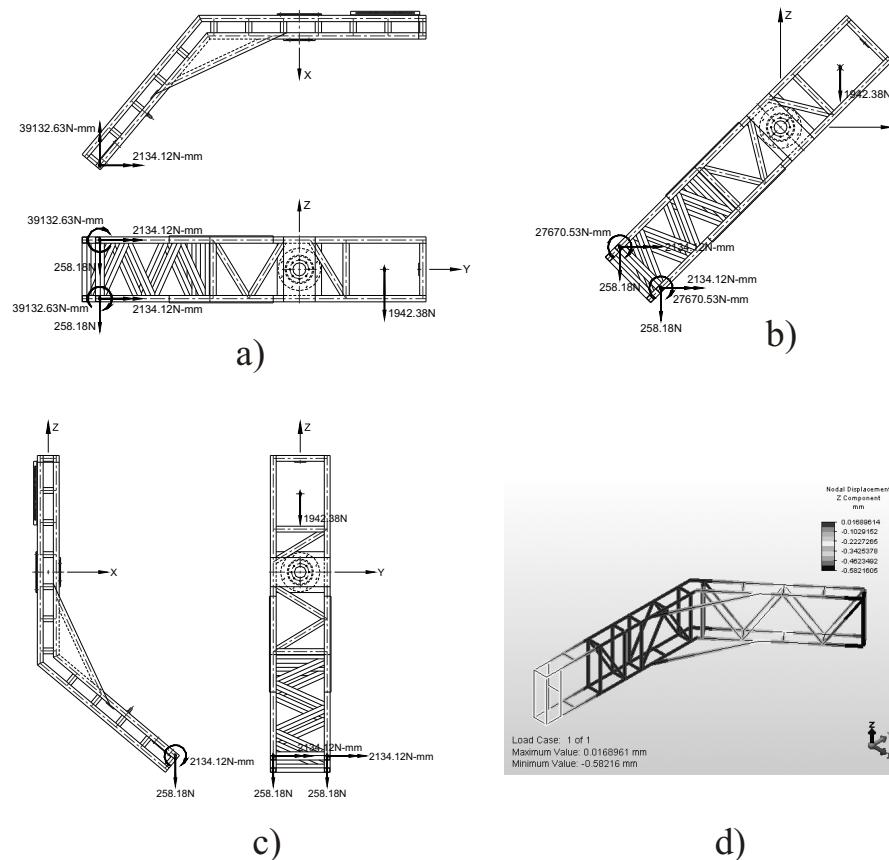


Figura 8. a), b) y c) estados de carga para las posiciones angulares 0°, 45° y 90°. d) modelo FEM del brazo posicionado a 0° grados con respecto a la horizontal.

De otra parte, se incluyeron en el montaje y calibración, puntos de verificación de nivel, paralelismo y perpendicularidad, así como sistemas seguros de inclinación y elevación de la estructura principal. La Figura 9 muestra una fotografía del fotogoniómetro construido con una luminaria bajo prueba.



Figura 9. Fotogoniómetro construido y calibrado en el laboratorio de fotometrías de Roy Alpha S.A. con luminaria bajo prueba.

3. Resultados

3.1 Procedimiento de calibración

Para determinar la calidad del montaje mecánico construido, se desarrolló una metodología de calibración utilizando apuntadores láser, de manera que ésta fuese repetible en labores de mantenimiento y sin requerir de equipamiento sofisticado.

El procedimiento de calibración consiste en utilizar, en lugar de la luminaria real, un apuntador láser calibrado, y garantizar que el haz, emitido y reflejado en el espejo en las posiciones 0°, 90° y 180° respecto a la horizontal (medidas en sentido horario por un observador ubicado en el enfocado hacia el fotogoniómetro), esté dirigido de modo que indique dentro del fotosensor. Para esto, se requiere ubicar precisamente dos apuntadores, uno concéntrico con el eje de rotación de la luminaria en dirección hacia abajo y otro colocado sobre una superficie rígida a la altura del

eje de rotación del brazo, orientado perpendicularmente a éste y apuntando hacia el espejo en la posición angular de 180°. Esto es posible utilizando un teodolito de precisión.

Adicionalmente, un tercer apuntador láser es ubicado precisamente sobre el eje de rotación del brazo para garantizar que este sea colineal con el centro del fotosensor (ver Figura 10). Cabe anotar que cuando el brazo está en posición vertical (Figura 10a), el apuntador 1 es rotado 360° sobre su eje de manera que para todas las posiciones angulares de la prueba, el haz reflejado indique en el fotosensor. Es importante mencionar que dentro del diseño mecánico fueron considerados los dispositivos que permitieron de manera adecuada ajustar las posiciones y orientaciones de la estructura principal, el espejo y el eje de rotación de la luminaria, así como el fotosensor, para lograr una puesta a punto óptima y eficiente. La Figura 10 b muestra también la verificación a 180° de rotación del espejo.

El proceso de calibración se inició garantizando la horizontalidad del eje de rotación del brazo y su colinealidad con el centro del fotosensor. Posteriormente el espejo es colocado a 90° y con el apuntador vertical se determinó el ángulo de espejo adecuado. Una vez asegurado el espejo, se verificó que el haz reflejado con el espejo a 0° y 180° incidía sobre el fotosensor, utilizando los apuntadores ubicados precisamente en las paredes de los costados. Esta metodología permitió constatar experimentalmente la calidad del diseño mecánico construido, ya que para lograrlo es necesario mantener la magnitud de las deflexiones del brazo en niveles adecuados. El efecto de la luminaria sobre la sección en cantilever de la estructura principal fue despreciable y fue constatada colocando un nivel antes y después de colocar la luminaria. Es de resaltar que la calidad de las fotometrías no está solamente determinada por el sistema mecánico del fotogoniómetro, sino también por la calibración del radiómetro que compone el fotosensor (fabricado en el extranjero), las condiciones del laboratorio en cuanto a reflectividad de las paredes, humedad y temperatura, la calidad del espejo reflector y los sistemas de control de alimentación de las luminarias y de movimiento del brazo.

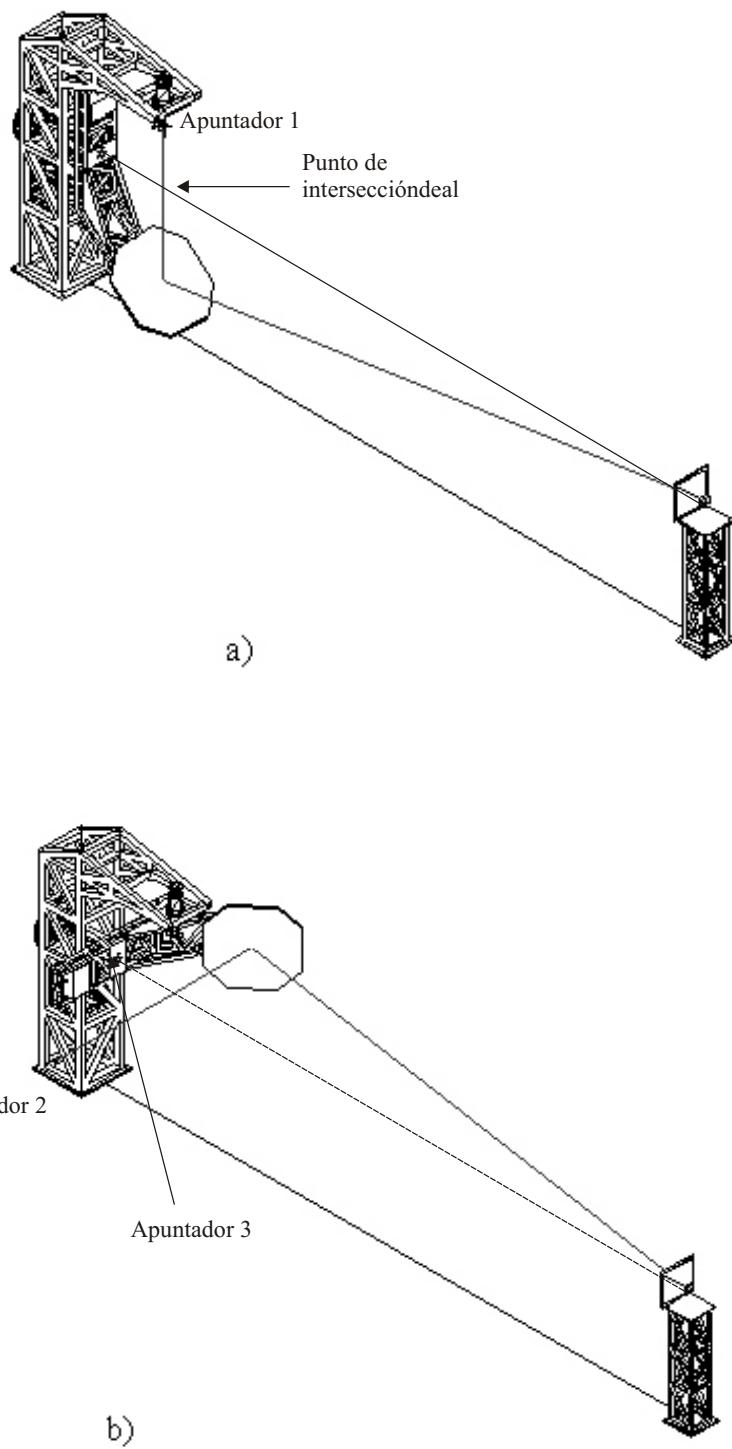
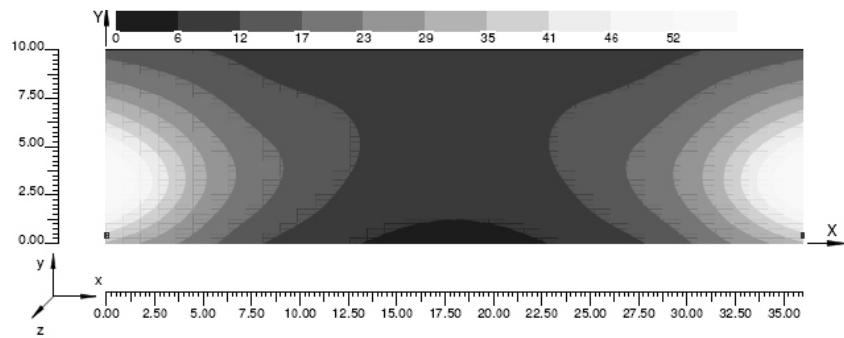
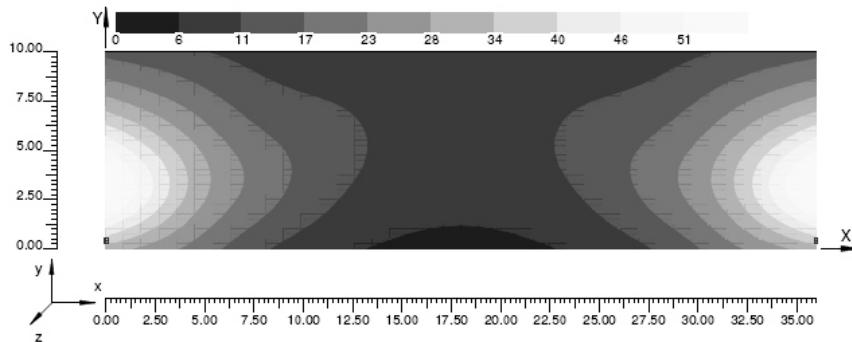
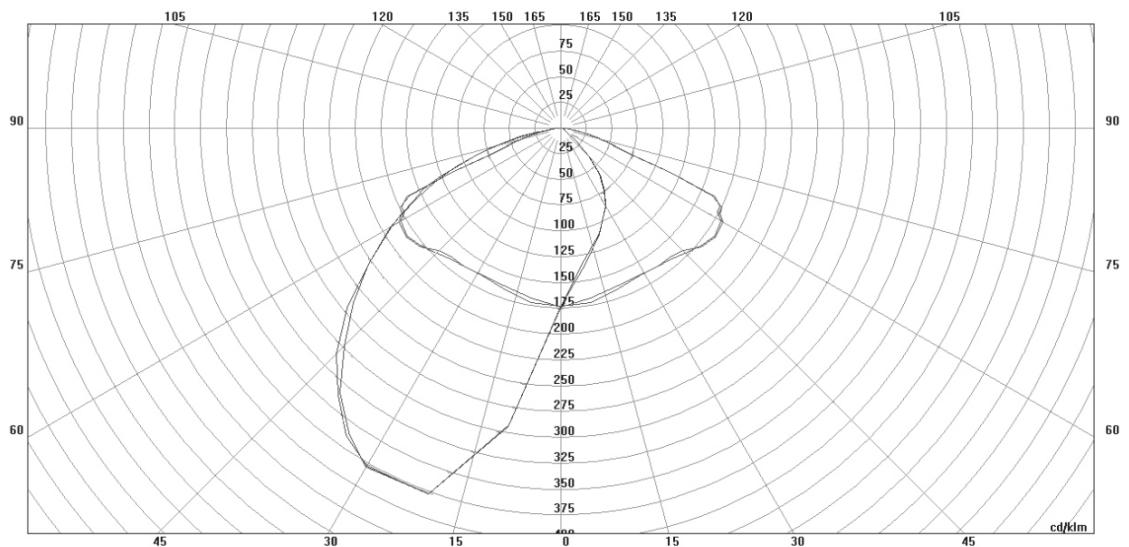


Figura 10. Representación de la metodología de calibración y verificación realizada utilizando apuntadores láser. a) brazo colocado a 90° , b) brazo colocado a 180° .



a

Nombre ensayo : AMAZONASII 150w Na
Código ensayo : AMAZONASII 217- 216



b

Figura 11. Repetibilidad. a) Valores de iluminancia horizontal (luxes) sobre una calzada de 10m x 36 m, obtenidos en dos mediciones consecutivas utilizando el fotogoniómetro construido en este proyecto. Vista superior. Luminarias a escala 1:250 ubicadas en las esquinas inferiores. b) diagramas polares (cd/klm) de luminarias (referencia Amazonas), obtenidos en 2 mediciones consecutivas y utilizando el fotogoniómetro construido en este proyecto.

3.2 Resultados fotométricos

Una vez lograda la puesta a punto del montaje mecánico, fue realizada una prueba fotométrica a una luminaria que se utilizó de referencia. Esta misma luminaria fue llevada a un laboratorio de mayor infraestructura tecnológica (*Indalux Iluminación Técnica S.L.*, en España) con el fin de realizar una fotometría que corroborara los resultados obtenidos. De acuerdo con la información proporcionada a los autores por *Roy Alpha S.A.* las matrices de intensidad presentaron diferencias no superiores al 3% en sus valores.

De otra parte, con el objeto de mostrar la repetibilidad de las fotometrías, en la Figura 11a se pueden observar los valores de iluminancia horizontal calculados sobre una acera de 10 m de ancho por 36 m de largo, a partir de los resultados fotométricos obtenidos de una luminaria real (referencia *Amazonas*), utilizando el fotogoniómetro construido en este proyecto.

Igualmente, en la Figura 11b se muestran diagramas polares de la distribución de la intensidad luminosa de la mencionada luminaria en dos planos diferentes y dos repeticiones de medida. Como puede apreciarse en las Figuras 11a y 11b, la variación en los patrones no excede el 2%.

Resultados adicionales referentes al acondicionamiento del terreno del laboratorio, basamento, funcionamiento, mantenimiento y diseño tanto del brazo como de la estructura y todos sus componentes mecánicos no especificados en este artículo (materiales, actuadores, sistemas de anclaje, sujeción y elevación, diversos soportes de luminaria, etc), así como el sistema de transmisión de movimiento y su control, han sido omitidos por considerarse de carácter confidencial por parte de la empresa *Roy Alpha S.A.*

4. Conclusiones

En Colombia no existen referencias de proyectos Universidad-Empresa o totalmente privados que involucren como objetivo el diseño y la construcción de un montaje tipo fotogoniómetro

tales como los que se han presentado en este trabajo.

Construir y poner a punto un fotogoniómetro es una tarea que las empresas nacionales y latinoamericanas suelen resolver con proyectos del tipo *llave en mano*, con equipamiento y diseño casi totalmente extranjero.

Iniciativas como la descrita en este artículo, desarrollada gracias al trabajo conjunto entre las Escuelas de Ingeniería Mecánica y Eléctrica y Electrónica de la Universidad del Valle, ponen de manifiesto que es posible lograr resultados de calidad y a un costo considerablemente menor, a la medida de las necesidades particulares de cada empresa. Este proyecto se logró llevar a cabo con una inversión por parte de la empresa *Roy Alpha S.A.* de aproximadamente una cuarta parte del costo en el comercio de un dispositivo de este tipo, sin tener en cuenta los costos de importación.

5. Agradecimientos

A los ingenieros de *Roy Alpha S.A.* por su colaboración y empeño en este proyecto: Hensley Palacios, Gerente de Aseguramiento de la Calidad, Mauricio Mosquera, Gerente de I+D, Wilson Giraldo, Director de Iluminación, James Torres, Ingeniero de Laboratorio y Fernando Gutiérrez, Jefe de Mantenimiento.

Igualmente al Ing. Jaiber Villa, quien trabajó en el desarrollo del *software* de control del fotogoniómetro construido en este proyecto.

6. Referencias bibliográficas

Alcaldía-Bogotá (2004) *Manual único de alumbrado público*. Unidad Ejecutiva de Servicios Públicos, Alcaldía Mayor de Bogotá, D.C.

http://www.uesp.gov.co/paginas.aspx?cat_id=33&pub_id=17&pag=3

Apian-Bennewitz, P., & von der Hardt, J. (1998). Enhancing and calibrating a goniophotometer. *Solar Energy Materials and Solar Cells* 54 (1/4), 309-322.

Holophane (Líder en soluciones de iluminación).
<http://www.holophane.com.mx/investigacion.htm>

IAR (Instituto Andaluz de Automática Avanzada y Robótica). <http://www.irma.uma.es/>

Marx, P. (1997). New goniophotometers for lighting-engineering laboratories. *Light & Engineering* 5 (4), 32-36.
<http://www.mx-electronic.com/pdf/Drehspiegelengl.PDF>

Orozco A., & Holguín, G. (1999). *Fotogoniómetro virtual*. Facultad de Ingeniería Eléctrica, Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira, Colombia.
<http://www.esi.com.co/solucionesacad.html>

Rea, M. S. (editor). (1993). *Lighting Handbook, Reference & Application*. Illuminating Engineering Society of North America, 8th edition.

Sauter, G. (1995). Goniophotometry: new calibration method and instrument design. *Metrologia*, 32 (6), 685-688.

Villuendas, F. (1999). *Diseño y desarrollo de un fotogoniómetro, esfera integradora y espectrofotómetro para medida de magnitudes fotométricas y colorimétricas*. Instituto de Investigación en Ingeniería de Aragón, Universidad de Zaragoza, España.
http://i3a.unizar.es/ficha_proyecto.php?ver=1249