

Diseño de Reflectores de Luminarias para Alumbrado Público

Alvaro Gómez, Andrés Alcarraz, Mario Vignolo, Diego Alvarez, Gonzalo Casaravilla
Instituto de Ingeniería Eléctrica, Facultad de Ingeniería, UDELAR

Resumen—Se presenta el desarrollo de un software de simulación y diseño de luminarias que, a partir de una descripción en formato CAD dibujada por un diseñador gráfico, permite realizar una edición manual de forma de obtener la mejor iluminación a nivel de piso. El software produce una nueva descripción CAD optimizada con la cual se puede realimentar el proceso de diseño o proceder a fabricar la matriz del reflector.

Para validar el software de simulación se han realizado comparaciones contra ensayos fotométricos con luminarias reales. Si bien la simulación utiliza un modelo simplificado de reflexión se ha obtenido buena correlación de la simulación con los cálculos de los ensayos.

Palabras clave—Diseño de luminarias, Fotometría de luminarias, alumbrado público.

I. INTRODUCCIÓN

El presente trabajo se enmarca en un convenio de colaboración para analizar la factibilidad de fabricación en el Uruguay de una luminaria de alumbrado público. El convenio incluye a la Intendencia Municipal de Montevideo (IMM), la Facultad de Ingeniería (FING), el Instituto Cuesta Duarte (ICD) de la central de trabajadores PIT-CNT y la Unión Nacional de Trabajadores Metalúrgicos y Ramas Afines (UNTMRA). Se contó con la colaboración de la ONG Ciencia Viva.

Este convenio tiene como tarea específica para la FING generar las herramientas necesarias para el diseño y la construcción del reflector de la luminaria. Es necesario para este fin predecir el funcionamiento de una determinada superficie reflectora y simular distintos reflectores antes de su construcción así como generar una descripción final del reflector para su posterior matrizado.

Con este propósito se ha desarrollado en FING un software de simulación y diseño de luminarias que, a partir de una descripción en formato CAD dibujada por un diseñador gráfico, permite realizar una edición manual de forma de obtener la mejor iluminación a nivel de piso. El software produce una nueva descripción CAD optimizada con la cual

se puede realimentar el proceso de diseño.

La simulación utiliza un modelo simplificado del grupo óptico de una luminaria. En este modelo la lámpara se aproxima por un segmento de recta que coincide con el eje del tubo cerámico¹. El reflector se considera como una superficie facetada aproximadamente especular y se desprecian los efectos de un refractor plano.

El software de simulación y diseño consta de tres módulos:

- El primer módulo permite, a partir de una descripción CAD de la luminaria, calcular la trayectoria de los rayos que parten de la lámpara y salen de la luminaria directamente o luego de rebotar en el reflector. La cantidad de rayos generados depende de la granularidad con la que se desee representar la lámpara a utilizar.
- El segundo módulo toma los datos de rayos generados por el primer módulo, permite editar el reflector manualmente y visualizar los cambios de iluminación que esto provoca a nivel de piso.
- El tercer módulo permite, a partir de la salida del segundo módulo, generar las especificaciones para la fabricación de la matriz del reflector.

Para validar el software de simulación se han realizado comparaciones contra ensayos fotométricos con luminarias reales. Si bien la simulación utiliza un modelo simplificado de reflexión se ha obtenido buena correlación de la simulación con los cálculos de los ensayos.

La organización de este artículo es la siguiente: La sección II presenta las consideraciones realizadas en el modelado del grupo óptico de una luminaria. La sección III muestra los aspectos del diseño gráfico del reflector de una luminaria. La sección IV presenta el software de simulación desarrollado. En la sección V se muestran algunas pruebas de validación y los resultados del simulador en comparaciones realizadas con ensayos fotométricos de luminarias reales. En la sección VI se presenta un ejemplo de diseño. Finalmente en la sección VII se presentan algunas conclusiones y líneas de trabajo futuro.

Este proyecto ha sido financiado por la Unidad Técnica de Alumbrado Público de la IMM.

A. Gómez, A. Alcarraz, M. Vignolo, D. Alvarez y G. Casaravilla son docentes del Instituto de Ingeniería Eléctrica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de la República.

e-mail: (agomez,alcarraz, jesus, dalvarez, gcp) @fing.edu.uy

¹ Se consideran lámparas de vapor de sodio

II. MODELADO DEL GRUPO OPTICO DE UNA LUMINARIA

A. Modelado de la lámpara

Una primera aproximación desde el punto de vista fotométrico a una lámpara de vapor de sodio a alta presión tubular, consiste en aproximar la parte del tubo de cerámica donde se produce la descarga (y se emite la luz) por un segmento de recta que coincida con el eje del tubo de cerámica. En la Fig. 1 se muestra un ejemplo correspondiente a una lámpara Philips SON-T Pro y su correspondiente esquema.

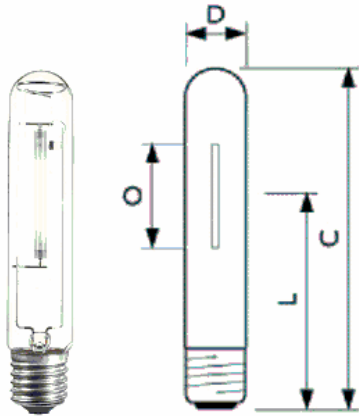


Fig. 1. Lámpara de sodio

Representando el tubo como un segmento de recta de longitud O , cada elemento dl del tubo emite un flujo luminoso total Φ/O , siendo Φ el flujo total de la lámpara.

La distribución de intensidad luminosa de cada elemento dl tiene geometría de revolución con respecto al eje del segmento, y está dada por:

$$dI = I_0 \sin(\theta) dl$$



Fig. 2. Representación del tubo como un conjunto de elementos dl . La distribución de intensidad luminosa del elemento dl depende de el seno del ángulo θ .

siendo θ el ángulo entre la dirección de la luz emitida y el segmento de recta, y donde

$$I_0 = \frac{\Phi}{\pi^2 O}$$

B. Modelado del reflector

El reflector puede modelarse en primera aproximación como una superficie especular con absorción, esto es, la luz es parcialmente reflejada y esta reflexión se da con el ángulo de reflexión igual al de incidencia (ángulo entre la normal a la superficie y la luz incidente).

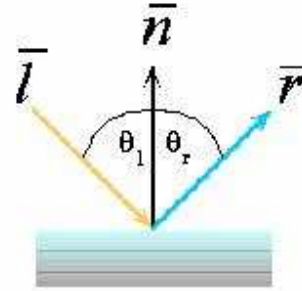


Fig. 3. Reflexión especular. Los rayos de luz se reflejan con un ángulo igual al de incidencia.

Otros modelos más sofisticados de reflexión consideran las características difusivas de la superficie. Un ejemplo es el modelo de Phong donde la luz se refleja no solamente en la dirección especular sino en un lóbulo en torno de esta dirección (ver Fig. 4).

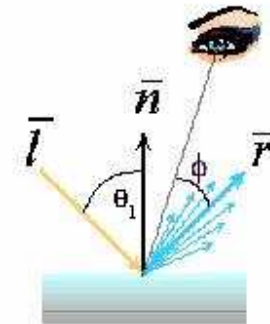


Fig. 4. Modelo de reflexión de Phong. La luz se refleja en un lóbulo concentrado entorno de la dirección especular.

C. Modelado del refractor

Una primera aproximación de un refractor que sea un vidrio plano, consiste en suponer que el mismo no interfiere, esto es, que no refleja ni absorbe luz, y que además no cambia la dirección de la luz que pasa a través del mismo.

III. DISEÑO GRÁFICO DE REFLECTORES

Los reflectores de las luminarias son usualmente superficies facetadas generadas por deformación a partir de un casquete. La forma y orientación de las facetas tiene como finalidad distribuir la luz de la forma más eficiente y uniforme posible.

En este trabajo, el diseño gráfico de los reflectores se realiza en una herramienta CAD especificando múltiples facetas planas definidas por cuatro puntos. Las facetas se definen reflectivas, opacas o neutras de acuerdo a la capa en que se ubiquen en el dibujo. Las facetas opacas constituyen las partes del reflector en las que no se refleja la luz (por ejemplo la tapa del portalámpara) y las neutras no intervienen en el cálculo pero pueden ser necesarias para el diseñador para visualizar la luminaria que está dibujando.

Para el intercambio entre módulos se optó por el formato abierto DXF [1] en su versión ASCII. DXF (Drawing Exchange Format) es un formato desarrollado por Autodesk como una solución para el intercambio de datos entre su software AutoCAD y otras herramientas CAD.

La Fig. 5 muestra un ejemplo de reflector diseñado con múltiples facetas. En este caso las facetas están agrupadas en mallas 6x6.

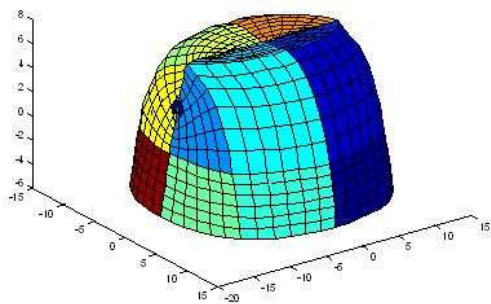


Fig. 5. La superficie de un reflector diseñada como un conjunto de facetas agrupadas en mallas.

IV. SOFTWARE DE SIMULACIÓN Y DISEÑO

El conjunto de herramientas de diseño desarrolladas consiste de tres módulos. El esquema de diseño se puede resumir en el diagrama de la Fig. 6.

A partir de un casco básico realizado por un diseñador gráfico:

- se calcula por simulación la iluminación a nivel de piso
- se modifica el casco reflector de forma de optimizar la iluminación y cumplir con las especificaciones objetivo
- se realiza la especificación para generar la matriz del reflector.

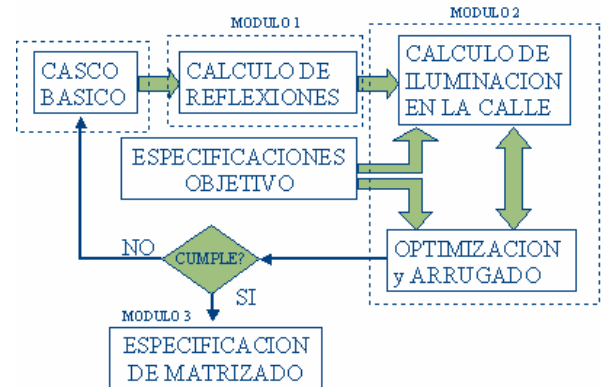


Fig. 6. Diagrama de flujo de la simulación de una luminaria

A. Módulo I: Cálculo de reflexiones

El primer módulo permite, a partir de una descripción CAD del casco básico de la luminaria y la ubicación espacial de la lámpara, calcular la trayectoria de los rayos que parten de la lámpara y se reflejan en el reflector.

Para modelar la luminaria se utilizan las consideraciones presentadas en la sección II.

- La fuente de luz (lámpara de sodio de alta presión) emite rayos (un rayo de luz representa básicamente la potencia lumínica que se emite en un ángulo sólido) en las diferentes direcciones. La cantidad de rayos generados depende de la descomposición discreta con la que se desee representar la lámpara: el segmento de recta que representa el tubo de descarga se divide en N tramos y para cada tramo se consideran rayos distribuidos en la esfera que lo rodea discretizando las coordenadas esféricas (azimut y elevación) en A y E intervalos respectivamente. El total de rayos emitidos por la lámpara es entonces $N_x A_x E$.
- El reflector se ha considerado aproximadamente especular. Cada rayo que incide sobre el reflector, genera un rayo reflejado en la dirección especular pero parte de la energía se pierde. La fracción de energía perdida en cada rebote se ajustó en forma experimental para que el rendimiento simulado de la luminaria coincidiera con el rendimiento determinado mediante ensayos fotométricos sobre luminarias reales.

Como resultado de este módulo se obtienen los rayos que salen de la luminaria directamente desde la lámpara y los que salen luego de incidir en el reflector. Para cada rayo se conoce la trayectoria completa dentro de la luminaria.

Este módulo ha sido implementado en el lenguaje de programación C++ de buena performance en cuanto a tiempos de ejecución lo que permite conjugar un diseño orientado a objetos y eficiencia en el gran volumen de cálculos que se deben realizar. El diseño orientado a objetos permitirá el futuro ensayo de otros modelos de reflexión más sofisticados, incorporando fácilmente otros tipos de superficie.

Para dar una idea del volumen de cálculo se puede mencionar que para un reflector de 712 facetas y considerando que la lámpara emite 518.400 rayos (con una granularidad correspondiente a $N=2$, $A=720$ y $E=360$), el programa demora 35 minutos sobre una máquina con un procesador Pentium IV de 2.2GHz y 512Mb de memoria. Mayores cantidades de rayos dan resultados más exactos pero se aumenta casi linealmente el tiempo de ejecución. Otro parámetro que influye en el volumen de cálculo es la cantidad de facetas, ya que para cada rayo hay que encontrar la faceta en la cual incidirá para calcular el rayo reflejado.

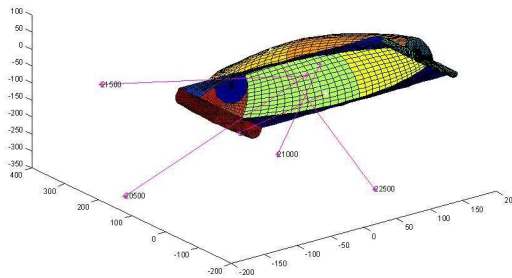


Fig. 7. Módulo I: Cálculo de reflexiones. Se calculan las trayectorias de todos los rayos.

B. Módulo II: Cálculo de iluminación en el piso / Optimización y “arrugado” del reflector

Este módulo toma los datos de los rayos salientes de la luminaria generados por el primer módulo, calcula la iluminación a nivel de piso y permite rotar manualmente las diferentes facetas del reflector y visualizar los cambios de iluminación.

La iluminación en el piso se calcula en una grilla normalizada para la configuración establecida por alumbrado (por ejemplo postación unilateral cada 27 metros, altura de la luminaria a 6.9m y a 61cm de la vereda, calzada de 7m, veredas de 4m y factor de mantenimiento de 80%).

La modificación o “arrugado” del reflector se realiza mediante una aplicación con interfaz gráfica de usuario como se muestra en la Fig. 8.

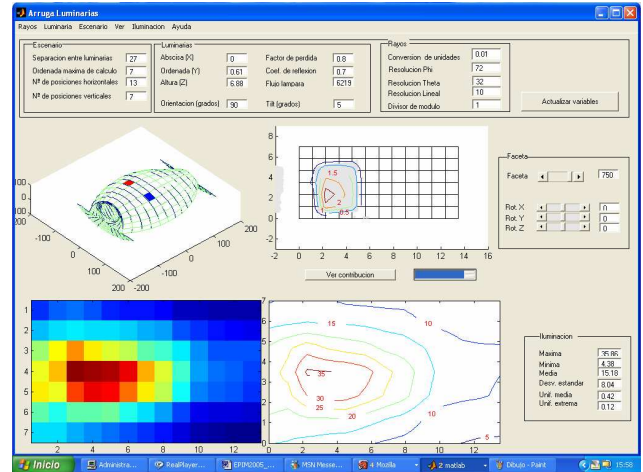


Fig. 8. Interfaz gráfica de usuario del módulo II

Este módulo se ha desarrollado en Matlab, una herramienta de programación de menores prestaciones (pero suficientes) en cuanto a velocidad de cálculo, pero de mayor facilidad en el manejo de datos y el desarrollo de la interfaz gráfica de usuario. Produce una salida en formato CAD que puede ser utilizada de realimentación hacia el primer módulo I o puede usarse por el módulo III para especificar la matriz de construcción del reflector.

Entre otras funcionalidades, el módulo permite ver la contribución de una faceta a nivel del piso así como apreciar cuáles facetas del reflector contribuyen en una determinada zona del piso.

En la Fig. 8 se puede ver la contribución en el piso de la faceta 750 (en rojo) y su simétrica (en azul) con respecto al eje longitudinal “Y”. En la Fig. 9 se aprecia el cambio de la contribución en el piso al girar las facetas en torno al eje Y (la faceta complementaria gira en el sentido contrario de forma de mantener la simetría del reflector).

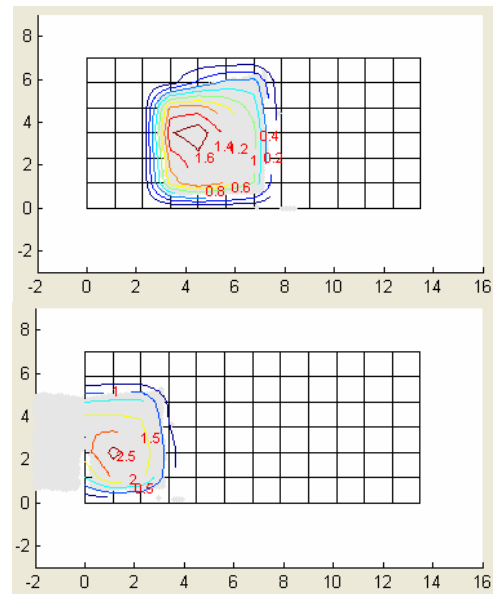


Fig. 9. Cambio de la contribución en el piso de las facetas señaladas en la Fig. 8 al realizar un giro (+5° y -5°) de las mismas en torno al eje Y.

En la Fig. 10 se muestra cuáles son las facetas que contribuyen en una determinada zona del piso. Los colores de las facetas indican el grado de contribución.

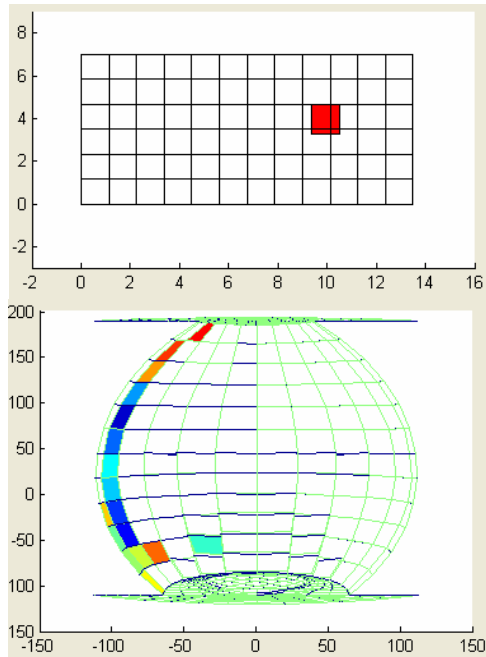


Fig. 10. Facetas que contribuyen en la zona del piso en torno de $x=10m$, $y=4m$. Los colores de las facetas indican el grado de contribución.

C. Módulo III: Especificación para el matrizado

El tercer módulo genera, a partir de la salida CAD del módulo de arrugado, las especificaciones para la fabricación de la matriz del reflector. Las especificaciones se presentan en forma de cortes de una función que da en forma continua el valor de la superficie en función de las coordenadas deseadas.

Este módulo permite ajustar las transiciones entre las diferentes facetas a los efectos de lograr una matriz que no presente problemas en cuanto a profundidad y salidas.

El módulo se ha desarrollado con la segunda herramienta de programación ya comentada en virtud de ser menos demandante de recursos de cálculo y la necesidad de una interfaz gráfica de usuario adecuada.

V. PRUEBAS DE VALIDACIÓN

A. Comparación de la simulación de una luminaria real con su ensayo fotométrico

Como forma de validar la simulación, se procedió a comparar el resultado de la iluminación a nivel de piso calculada a partir de un ensayo fotométrico de una luminaria real y a partir de una simulación de esa misma luminaria. Se siguió el siguiente procedimiento:

- Se relevó la geometría de una luminaria real y se construyó un modelo CAD de la misma.

- Se ensayó la luminaria real con un goniofotómetro obteniendo la matriz $C-\gamma$
- Se calculó la iluminación en el piso a partir de la matriz $C-\gamma$ y los parámetros de ubicación de la luminaria
- A partir del diseño gráfico se simuló la luminaria y se obtuvo la iluminación a nivel de piso.
- Se compararon los resultados.

Las tablas I y II y las Fig. 11 y 12 muestran un ejemplo de los resultados obtenidos sobre la luminaria correspondiente al modelo CAD de la Fig. 5.

Se puede apreciar una buena correlación entre los resultados. Esto permite pensar que la simulación puede ser un buen predictor de niveles y uniformidades de iluminación en el diseño de una luminaria.

TABLA I
INDICADORES DE ILUMINACIÓN PARA LA LUMINARIA REAL

Iluminación máxima	31.3 lux
Iluminación mínima	2.3 lux
Iluminación media	11.6 lux
Uniformidad media	20 %
Uniformidad extrema	7 %

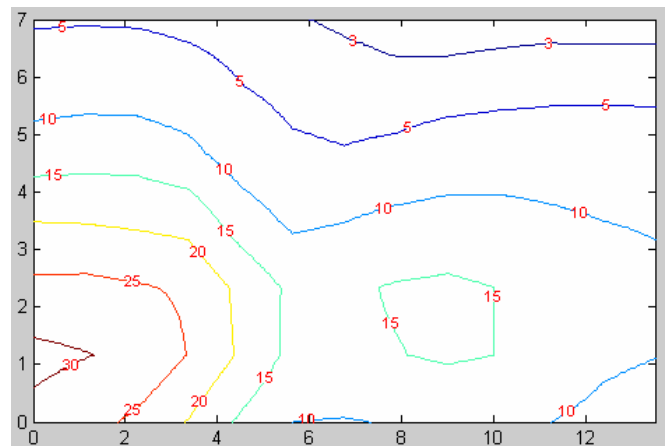


Fig. 11. Curvas de nivel de la iluminación a nivel del piso para la luminaria real calculadas a partir de un ensayo fotométrico.

TABLA II
INDICADORES DE ILUMINACIÓN PARA LA SIMULACION DE LA LUMINARIA

Iluminación máxima	36.3 lux
Iluminación mínima	2.9 lux
Iluminación media	12.7 lux
Uniformidad media	23 %
Uniformidad extrema	8 %

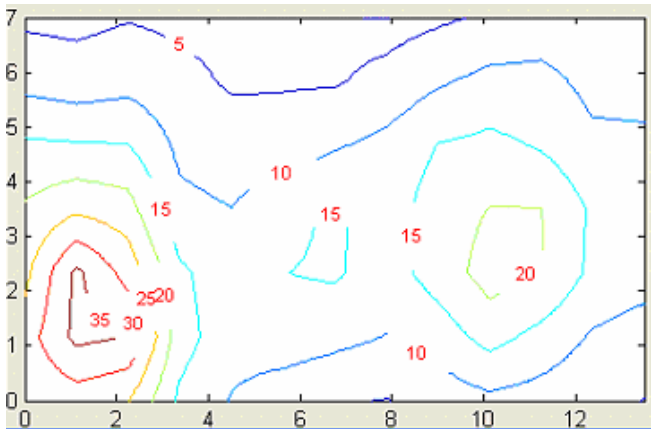


Fig. 12. Curvas de nivel de la iluminación a nivel del piso para la luminaria simulada utilizando los módulos I y II.

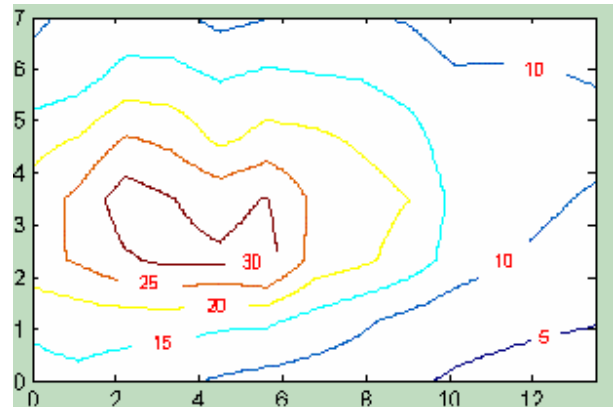


Fig. 13. Curvas de nivel de la iluminación a nivel del piso para el reflector arrugado con el módulo II.

B. Realimentación de la salida del módulo II al módulo I/. Verificación del cálculo de iluminación del módulo II.

El módulo II permite rotar las facetas del reflector y ver el cambio de iluminación a nivel de piso que provocan estas modificaciones.

Al mover una faceta se consideran todos los rayos que parten de ella y se recalcula la dirección de los mismos. Estos cálculos implican una serie de aproximaciones:

- Al girar la faceta todos los rayos que antes incidían en la misma lo siguen haciendo en el mismo punto de la faceta. En realidad el punto de incidencia cambia y parte de los rayos sobre los bordes de la faceta podría “escapar” de la misma.
- Los rayos incidentes no cambian su dirección. Esto es cierto si los rayos provienen directamente de la lámpara o de otra faceta que no se haya rotado. No se consideran los cambios de las rotaciones sobre múltiples rebotes.

Para verificar los cálculos aproximados del módulo II se procedió a realimentar la salida de este módulo al módulo I de forma de recalcular completamente los rayos. Un ejemplo de los resultados obtenidos puede verse en las Fig. 13 y 14.

Se puede apreciar una similitud importante en los resultados lo que hace pensar que las aproximaciones no afectan mayormente los cálculos.

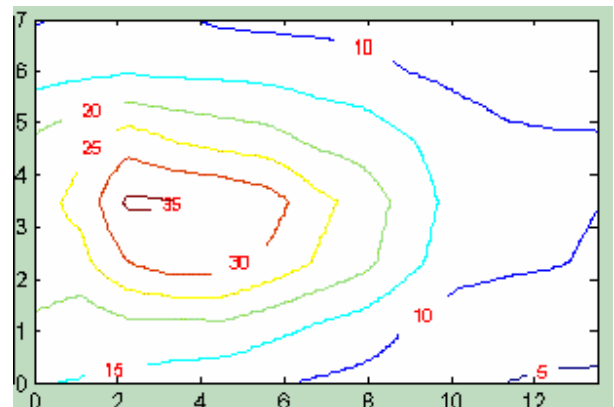


Fig. 14. Curvas de nivel de la iluminación a nivel del piso para el reflector luego de recalcular con el módulo I.

C. Simulaciones con distintas granularidades de la lámpara

Se realizaron pruebas para distintos niveles de discretización en el largo de la lámpara para encontrar el número mínimo de segmentos que da resultados razonables.

En lo que sigue se muestran resultados de las pruebas para un filamento de lámpara de 4.5 cm. y un paso de 0.5° en coordenadas esféricas (azimut, elevación).

Se realizaron pruebas subdividiendo la lámpara en 1, 2, 3, 5 y 10 partes. La Tabla III muestra los indicadores para los distintos casos y la Fig. 15 muestra las curvas de nivel correspondientes de la iluminación a nivel de piso

TABLA III
INDICADORES DE ILUMINACIÓN PARA DIVERSAS GRANULARIDADES EN EL LARGO DE LA LÁMPARA

	Tramos de lámpara				
	1	2	3	5	10
Iluminación máxima (lux)	47.4	42.7	43.0	42.2	41.8
Iluminación mínima (lux)	1.8	3.6	3.8	3.8	3.8
Iluminación media (lux)	16	16	16	16	16
Uniformidad media (%)	11	23	24	24	24
Uniformidad extrema (%)	4	8	9	9	9

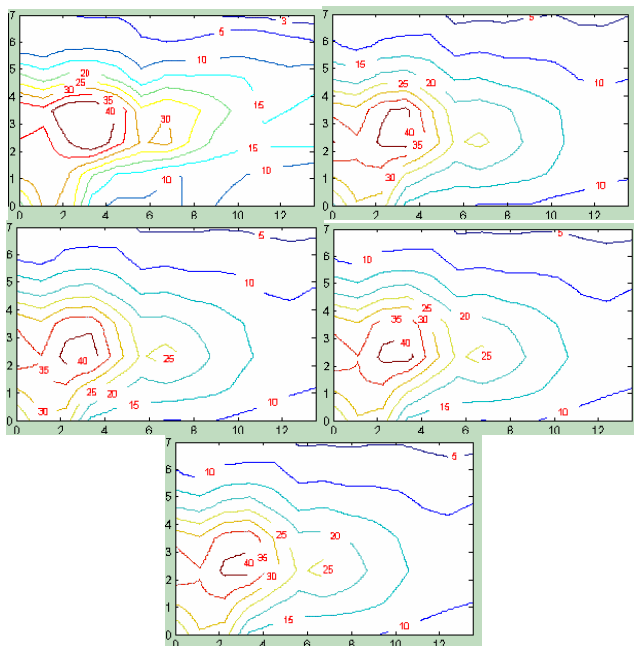


Fig. 15. Curvas de nivel de la iluminación a nivel del piso para diversas granularidades en el largo de la lámpara. De izquierda a derecha y de arriba abajo resultados para 1, 2, 3, 5 y 10 tramos

Considerar la lámpara como un foco puntual reduciría la cantidad de rayos, y por tanto el tiempo de cálculo, pero da resultados inaceptables.

Se puede observar que a partir de 3 tramos no se aprecian cambios sustanciales en la simulación (téngase en cuenta que el tubo emisor es de 4.5 cm.). En estas pruebas incluso la división en 2 tramos da resultados razonables.

VI. DISEÑO DE UN REFLECTOR

A partir del casco básico determinado a partir de las dimensiones deseadas de la luminaria final, el tipo de vidrio de posible construcción en Uruguay que asegura junto con el reflector el grado de protección a la entrada de partículas al mismo y las características de salida de la matriz a construir (por ejemplo el ángulo de la cara plana frontal del reflector) se analizó la ubicación óptima posible de la lámpara. En dicha

posición y con 10° de inclinación de montaje se obtienen los resultados fotométricos en la grilla de cálculo que se aprecian en la Tabla IV y la Fig. 16.

TABLA IV
INDICADORES DE ILUMINACIÓN PARA EL CASCO BÁSICO

Iluminación máxima	37 lux
Iluminación mínima	3.5 lux
Iluminación media	15 lux
Uniformidad media	23 %
Uniformidad extrema	9 %

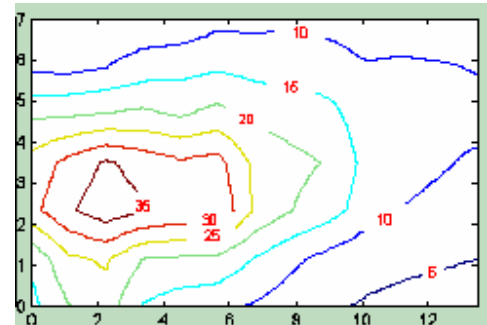


Fig. 16. Curvas de nivel de la iluminación a nivel del piso para el casco original.

Los mejores valores medidos en luminarias comerciales son:

- Uniformidad media: 51 %
- Uniformidad extrema: 24 %

Por otra parte la uniformidad extrema mínima admitida en las especificaciones es de 12% por lo se procedió a “arrugar” la luminaria a los efectos de mejorar el resultado.

Con un arrugado “leve” (con pocas facetas rotadas con valores menores a 15°) se obtienen resultados tal como muestran la Tabla V y la Fig. 17.

TABLA V
INDICADORES DE ILUMINACIÓN PARA UN ARRUGADO LEVE DEL CASCO BÁSICO

Iluminación máxima	37 lux
Iluminación mínima	6.2 lux
Iluminación media	15 lux
Uniformidad media	41 %
Uniformidad extrema	17%

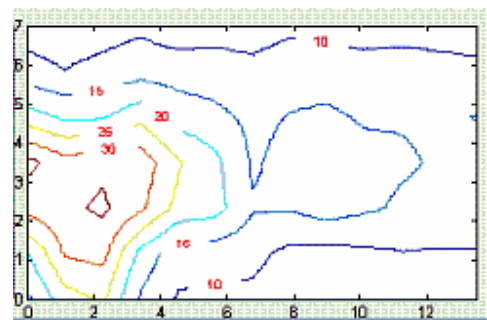


Fig. 17. Curvas de nivel de la iluminación a nivel del piso para el casco levemente modificado.

Se puede apreciar que mediante una leve modificación del casco es posible aumentar los niveles mínimos de iluminación. Los resultados se pueden mejorar sensiblemente aumentando el grado de “arrugado” del reflector llegando a indicadores cercanos a los mejores medidos en luminarias comerciales.

El módulo de especificación de matrizado permite obtener la superficie del reflector como un conjunto de cortes. La Fig. 18 muestra algunos cortes transversales del reflector diseñado.

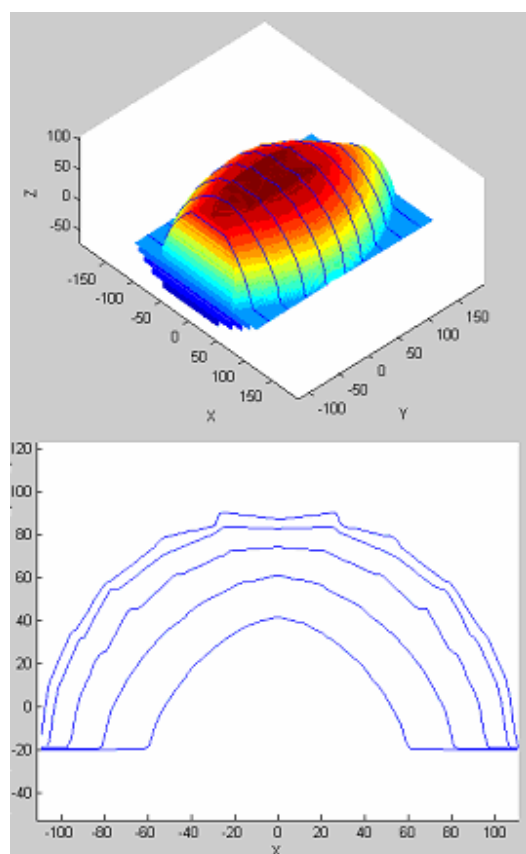


Fig. 18. Algunos cortes transversales del casco diseñado.

VII. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

Más allá de la especificación primaria de un reflector que cumple con los requerimientos mecánicos y lumínicos especificados, se ha desarrollado una herramienta de diseño de reflectores para luminarias de alumbrado público que ofrece un muy amplio grado de libertad para el diseñador que le permite ajustar el diseño de acuerdo a la tecnología de fabricación utilizada.

La herramienta podrá ser utilizada asimismo durante el proceso de construcción de la matriz del reflector a los efectos de compatibilizar los costos de fabricación de la misma y las prestaciones finales de la luminaria.

El software de simulación y diseño se encuentra en este momento en estado de prototipo. Hay muchos aspectos en los cuales se puede trabajar para mejorarlo y llegar a un producto final. Se pueden mencionar algunos como:

- unificación de los módulos en un mismo lenguaje de programación y con una misma interfaz de usuario.
- agregado de un mecanismo de plug-ins (complementos) que permita agregar tipos de superficie desarrollados por terceros.
- mejora de la performance del módulo I modificando la forma en que se realiza el cálculo actual de los rayos. Se pueden estudiar distintas técnicas para acelerar el trazado de los rayos de las que se usan en los programas de Ray Tracing.

Otras líneas de trabajo futuro que se presentan:

- El diseño orientado a objetos del módulo de simulación permite incorporar fácilmente nuevos tipos de superficie con los que se podría probar los efectos de considerar modelos más sofisticados de reflexión.
- Hasta el momento no se ha considerado el efecto del refractor el cual para algún tipo de vidrio puede ser significativo
- Sería interesante desarrollar un algoritmo automático de optimización que, dado un nivel de iluminación objetivo a alcanzar, busque o sugiera las mejores deformaciones del reflector para cumplir las especificaciones.

Finalmente se debe destacar que se han formado recursos humanos en el país con la capacidad de darle soporte técnico al emprendimiento de construir luminarias en el marco de los objetivos de este trabajo.

VIII. AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren agradecer a Ricardo Marotti y Arturo Lezama del Instituto de Física de FING, Daniel Vergara de la ONG Ciencia Viva, Paula Menéndez de Diseño Básico y Pablo Cancela del Instituto de Ingeniería Eléctrica de FING.

IX. REFERENCIAS

- [1] Autodesk, “AutoCAD – DXF Reference” [Online]
<http://usa.autodesk.com/adsk/servlet/item?siteID=123112&id=5129239>