

Uso de filtros en el recorte espectral de luminarias led

El presente trabajo evalúa una alternativa económica para obtener una luminaria con espectro de emisión acotado, que cumpla con requisitos aún más estrictos que los señalados en el D.S. N°043/2012 MMA, Norma de la Emisión para la Regulación de la Contaminación Lumínica. La opción pretende, además, obtener mejoras en la eficacia lumínica frente tecnologías led más convencionales como el led con juntura ámbar o el tipo PC ámbar. Con este objetivo, se aplicaron diversas técnicas de recorte de la zona azul del espectro visible, empleando cubiertas refractoras coloreadas. El estudio incluye el análisis de la eficacia para los posibles filtrados.

Carlos Lionel Colonna y Pablo Ixtaina
Laboratorio de Acústica y Luminotecnia de la
Comisión de Investigaciones Científicas de la
provincia de Buenos Aires
lionelcolonna@gmail.com

Pedro Sanhueza
Oficina de Protección de la Calidad del Cielo del
Norte de Chile – OPCC
psanhueza@opcc.cl

Palabras clave: espectro, contaminación lumínica

Introducción

La iluminación artificial nocturna del espacio público es necesaria tanto para una correcta y segura circulación

de vehículos y peatones, como para asegurar seguridad personal y generar entornos atractivos, prolongando así la actividad humana durante la noche.

En los últimos años, se ha incrementado la utilización de la tecnología led atento a la mayor eficacia y practicidad de los dispositivos. Las luminarias led brindan la ventaja adicional de una mejor y más simple orientación de las emisiones luminosas. La luz se puede dirigir en forma simple hacia la zona a iluminar, logrando disminuir el derroche energético. En especial, se pueden limitar y anular las emisiones en el hemisferio superior o cercanas a la horizontal, lo que resulta en una baja de los niveles de contaminación lumínica producto del mal direccionamiento del haz de luz. Esta emisión controlada tiene como contraparte el uso

en forma casi exclusiva de fuentes del tipo PC led ('led recubierto de fósforo', por sus siglas en inglés) [1]. Estos leds emplean un diodo de juntura azul al que se le superpone una película fosforada que absorbe parte de la emisión azul y genera, por emisión secundaria, un lóbulo espectral centrado en el verde. La combinación de ambos espectros genera luz blanca [2] y, si bien existen diferencias importantes entre las emisiones de distintos dispositivos, todas tienen en común un gran contenido de energía en longitudes de onda entre 380 y 499 nm. Planteándose entonces la problemática, ya que justamente esta zona es considerada la "ventana espectral crítica" en astronomía y debe ser preservada. Tenemos, por un lado, una mayor dispersión en la atmósfera de estas radiaciones "cortas". Por otro, es una región espectral muy rica en información y su "contaminación" implica pérdidas en la información recabada por el equipamiento para estudios astronómicos de algún modo inaceptables en zonas protegidas.

Es claro que el uso de esta tecnología para generar luz blanca con leds está ligada a su gran eficacia junto

con la obtención de altos índices de reproducción cromática (CRI), características ambas que se han logrado imponer como criterio de calidad.

El trabajo, realizado en el marco del convenio entre el Laboratorio de Acústica y Luminotecnia (LAL-CIC, Argentina) y el Observatorio de Las Campanas (La Serena, Chile), con la colaboración de la Oficina de Protección de la Calidad del Cielo del Norte de Chile (OPCC), se orienta a mantener las ventajas tecnológicas de la iluminación led: eficacia y practicidad de los dispositivos led de luz blanca, introduciendo el recorte del espectro a partir del uso de filtros. Para ello, se ha explorado la alternativa de colorear las cubiertas refractoras de las luminarias con tecnología PC led, obteniendo una solución simple y de bajo costo que permite preservar la zona azul del espectro sin equipamiento especial como sería la construcción de luminarias con placas de led ámbar.

La contaminación lumínica

Límites para la astronomía

Para la astronomía, el alumbrado público con tecnología PC led introduce el problema del pico de emisión "azul", cercano a los 440 nanómetros. La normativa vigente para la protección del cielo en el norte de Chile se redactó en el año 2010 y especifica que entre 300 a 499 nanómetros, la irradiancia espectral no debe superar el quince por ciento del espectro visible [3]. Las luminarias led convencionales no cumplimentan, como es evidente, estos requisitos: contienen un veintitrés por ciento del espectro visible entre 300 y 499 nanómetros, muy por encima de lo especificado en la reglamentación.

Actualmente, el rendimiento lumínico de las fuentes led es mucho mayor al del año 2010, cuando se redactó la norma, por lo que es factible (y también una aspiración de los astrónomos) modificar la normativa e incrementar la restricción espectral en áreas cercanas a los observatorios astronómicos, hasta el punto de eliminar totalmente dicha emisión de luz azul, sin comprometer el rendimiento general de las aplicaciones.

Efectos en la vida humana

Las emisiones luminosas en longitudes de onda corta, cercanas a los 440 nanómetros son absorbidas por las células ganglionares de la retina excitando, vía el nervio óptico, la región del hipotálamo. Estudios demuestran que dicha estimulación está vinculada con la generación de la melatonina, la cual se secreta fundamentalmente durante la noche y actúa sobre la capacidad de discernir entre el día y la noche. Entre otras cosas, modula el ciclo sueño/vigilia, el pulso cardiaco y las actividades de oxidación. El déficit de melatonina puede producir insomnio, depresión y alteraciones en la conducta, de aquí la importancia de limitar emisiones en este rango [4].

Efectos en especies animales

La luz artificial nocturna altera los ciclos activos de los animales. En los insectos es capaz de producir un notable desequilibrio ecológico. Muchos utilizan el periodo de la luna para desarrollar distintos ciclos vitales (estado larvario, alimentación, crecimiento y reproducción) y cuando se altera, ocasiona que muchos de los insectos interrumpan su proceso, lo que a menudo los lleva a su muerte.

La discontinuidad de algunas especies de insectos puede afectar la continuidad de animales insectívoros y plantas que se reproducen gracias a ellos, generando un desequilibrio en la funcionalidad de los ecosistemas y biomas.

En la Universidad Nacional de Misiones se ha efectuado un experimento con trampas luminosas para insectos, a fin de determinar el tipo de fuente luminosa que más afecta a la especie. Los resultados reflejaron que las luminarias con una temperatura de color inferior a 2.800 grados kelvin (luz cálida) atraen a la mitad de insectos, frente a las que tienen una temperatura mayor a los 4.000 grados kelvin (aproximada a la luz de la luna llena) [5, 6]. Las luminarias de led azul presentan temperaturas mayores a los 4.000 grados kelvin, encontrándose los insectos atraídos hacia ellas. Este comportamiento se explica por presentar dos picos de sensibilidad espectral, el mayor alrededor de los 365 nanómetros y el otro, entre 492 y 515, área en la cual el diodo muestra un pico de emisión del "azul" [5].

Filtrado del espectro

Recorte del pico azul

Tal como se enunció en el punto anterior, el contenido de azul en el espectro de luminarias para el alumbrado público con tecnología led es el que introduce la principal problemática en todas las áreas. Las experiencias realizadas con leds del tipo ámbar (sin emisión azul) resultaron en alternativas poco prácticas: luminarias especiales, diseñadas o construidas a pedido y con mayor costo; baja eficacia [3]. El presente trabajo explora la posibilidad de utilizar filtros que permitan atenuar el pico azul. La alternativa permite adaptar luminarias estándares con leds blancos de alta eficacia, planteando de esta manera una opción simple y económica para el recorte del espectro.

Los filtros utilizados en la experiencia fueron de película de PVC estabilizado a la radiación ultravioleta, con superficie brillante. El material fue del tipo autoadhesivo y posibilitó colorear la cubierta refractora de la luminaria, introduciendo la única limitación del método: la luminaria debe ser del tipo led de potencia o media potencia (high o mid power, no COB) y con cubierta lisa de protección sobre la lente. Tales dispositivos se especifican en la normativa argentina IRAM [7].

Para la experiencia se seleccionaron filtros de tres colores distintos, que llamamos filtros uno, dos y tres, cuyas características cromáticas de indican en la tabla I a partir de su composición RGB ('rojo-verde-azul', por

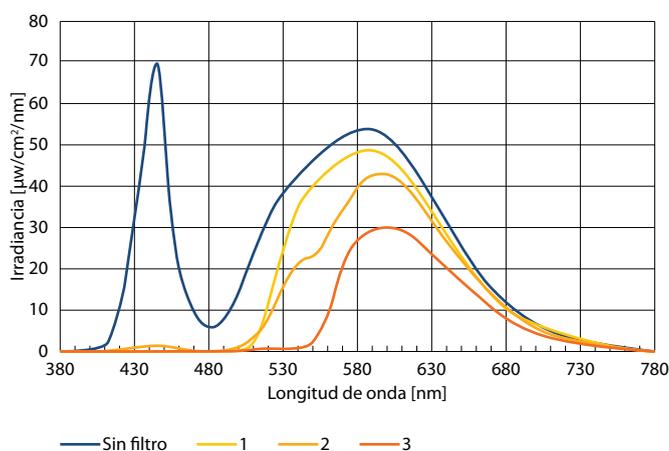


Figura 1. Espectros

sus siglas en inglés) y sus coordenadas equivalentes del diagrama cromático xy CIE. La metodología implementada fue utilizar una misma luminaria de luz blanca de 44 watts, colocando los diferentes filtros, uno por vez, sobre su cubierta refractora. Para cada alternativa, se realizó una prueba espectral en el LAL, utilizando un espectrómetro UV-VIS-IR Avantes [8].

Filtro	Composición RGB	Coordenadas xy
1	252.200.0	0,4378; 0,4906
2	253.170.3	0,4486; 0,4755
3	250.107.3	0,4856; 0,4445

Tabla I. Filtros

Como puede apreciarse en la tabla 1, el RGB de cada uno de los filtros indica que el contenido de azul es bajo o nulo, presentándose a la vista de colores amarillos-anaranjados.

La figura 1 muestra el resultado de la experiencia y permite observar los tres tipos de recortes logrados. En todos los casos, y en términos práctico, la eliminación del pico azul fue total.

La Norma lumínica D.S. N° 043/2012 MMA establece que el porcentaje admitido de irradiancia espectral total respecto de la irradiancia en el intervalo visible entre 380 y 780 nanómetros sea:

- a. Entre 300 y 379 nanómetros no podrá superar el quince por ciento del intervalo visible
- b. Entre 380 y 499 nanómetros no podrá superar el quince por ciento del intervalo visible
- c. Entre 781 y una micra no podrá superar el cincuenta por ciento del intervalo visible

La tabla 2 muestra la ponderación, según la norma citada, de las mediciones efectuadas y permite verificar que los tres filtros adaptan el espectro original a un apto para el cumplimiento de los límites estandarizados. Por lo tanto, y en una primera instancia, podría utilizarse cualquiera de los seleccionados para la experiencia.

Flujos y eficacias

Una de las características principales que deben presentar las luminarias "filtradas" es mantener una

Filtro		λ			Temperatura de color
		300 a 379 nm	380 a 499 nm	781 a 849 nm	
Sin filtro	Porcentaje	0,17	22,41	0,02	4.035,5 K
	Norma	Cumple	No cumple	Cumple	
1	Porcentaje	0,23	0,16	0,07	2.777,6 K
	Norma	Cumple	Cumple	Cumple	
2	Porcentaje	0,22	0,78	0,11	2.373,9 K
	Norma	Cumple	Cumple	Cumple	
3	Porcentaje	0,22	0,09	0,20	1.668,3 K
	Norma	Cumple	Cumple	Cumple	

Tabla 2, Porcentajes espectrales

eficacia compatible con las tecnologías en uso. El factor para ponderarla es el cociente entre el flujo luminoso y la potencia total consumida, eficacia en lúmenes por watt (lm/W). Para obtener dicha magnitud, cada muestra en estudio fue sometida a una fotometría en gonio fotómetro, siguiendo lo especificado en IRAM [9] y utilizando el gonio fotómetro automático del LAL, Everfine GO2000 [10]. Los flujos luminosos se obtuvieron a partir del diagrama de intensidades, mediante el método zonal.

Los resultados obtenidos se compararon posteriormente con las tecnologías led tipo PC ámbar y ámbar, estudiados en detalle en las experiencias publicadas en Luxamérica 2016, trabajo "Alumbrado vial de baja contaminación para la 'Ruta de Algarrobo'" [3]. En la tabla 3 se detallan los resultados de las fotometrías para la luminaria sin filtro y con las tres opciones seleccionadas. Se incorporan, asimismo, los valores obtenidos con la luminaria de led ámbar y de tipo PC ámbar del estudio [3].

Teniendo en cuenta que los flujos no son comparables dado que las otras tecnologías eran luminarias de distinta potencia, se comparan sus eficiencias y las

pérdidas de eficacia frente a la luminaria de led luz blanca original de 44 watts utilizada como referencia en las pruebas. Debe tenerse en cuenta que esta referencia fue seleccionada por una cuestión de practicidad de la experiencia (cubierta de vidrio plano fácilmente desmontable, tamaño pequeño, buena estabilidad de emisión, etc.), y resultó ser una luminaria de baja eficacia.

Como puede observarse, dos de los filtros utilizados demostraron un mejor desempeño frente a las tecnologías ya analizadas por el laboratorio [3]. El filtro 2 obtuvo una eficiencia de un 17,36 por ciento mayor que PC ámbar, y el filtro 1 se vio mejorado en un 48,13 por ciento, quedando este seleccionado para el ensayo de durabilidad y las pruebas con una luminaria de mayor potencia.

En la figura 2 se ve la luminaria montada en el gonímetro con los distintos filtros y sin estos, colocados de izquierda a derecha, desde los más fríos hasta los más cálidos (luz blanca, filtro 1, 2 y 3)

	Sin filtro	1	2	3	Led ámbar	PC ámbar
Potencia	44 W	44 W	44 W	44 W	56,4 W	144 W
Flujos luminosos						
Hemisferio inferior lado camino	3.063,3 lm	2.380,1 lm	1.901,4 lm	1.079,7 lm	2.100 lm	4.900 lm
Hemisferio inferior lado vereda	1.052,8 lm	922,1 lm	713,9 lm	541,3 lm	600 lm	2.400 lm
Hemisferio inferior, total	4.116,1 lm	3.302,2 lm	2.615,3 lm	1.621 lm	2.700 lm	7.300 lm
Hemisferio superior, total	0 lm	0 lm	0 lm	0 lm	0 lm	0 lm
Total del artefacto	4.116,1 lm	3.302,2 lm	2.615,3 lm	1.621 lm	2.700 lm	7.300 lm
Eficiencia	93,6 lm/W	75,1 lm/W	59,5 lm/W	36,9 lm/W	47,9 lm/W	50,7 lm/W
Pérdida al frente al sin filtro	-	19,7%	36,4%	60,6%	48,8%	45,8%

Tabla 3. Eficiencias



Figura 2. Luminaria con y sin filtros

Ensayo de durabilidad

Para garantizar un desempeño correcto del filtro, se efectuó una prueba de durabilidad que permitió verificar el desempeño ante los cambios de temperatura propios de la operación de la luminaria led. Se estudiaron alguna posible fatiga, cambio de color o pérdida de adherencia debida al uso.

La prueba consistió en montar la luminaria encendida con el filtro en su posición normal de uso, dentro de una cámara de calor a una temperatura de 55 grados centígrados durante 240 horas continuas. Finalizado el ciclo de prueba, se inspeccionó el filtro, verificando la adherencia a la cubierta refractora, sin experimentar alteraciones en el pegamento, cuarteo o fragmentación.

Posteriormente, se efectuó una nueva medición del espectro para identificar alguna variación sufrida. En la figura 3, se encuentran solapados el realizado previamente y el de la medición luego del ensayo. Se observa que se encuentran solapados sin sufrir ningún cambio significativo. De esta manera, se puede decir que el filtro presentó un desempeño correcto en la tarea.

Flujo y espectro con luminaria de potencia

Las pruebas anteriores fueron realizadas con una luminaria de potencia media, justificada por el hecho de que presentaba una cubierta refractora menor, de esta manera proporcionó facilidades al colocar los distintos filtros, logrando seleccionar cuál de ellos presentó un mejor desempeño.

La segunda experiencia se realizó, ya solo para el filtro seleccionado, con una luminaria de mayor tamaño, potencia y eficacia, apta para el alumbrado de vías de tránsito superiores: avenidas y autopistas. En este caso se trató de una muestra de 135 watts, cuya eficacia obtenida en estado original resultó de 110,6 lúmenes por watt. La aplicación del filtro resultó en 91,5 lúmenes por watt, obteniéndose una pérdida de eficacia de un 17,3 por ciento, lo que representa un incremento del 21,8 por ciento frente a la luminaria de 44 watts. La tabla 4 resume los resultados de esta última experiencia.

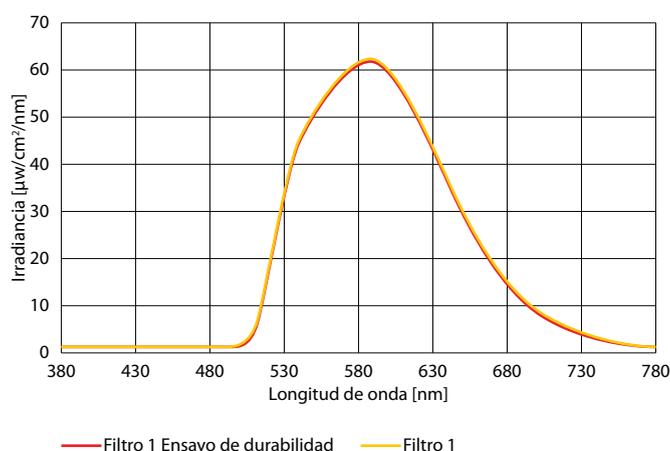


Figura 3. Espectros comparados

	Sin filtro	1
Potencia	126,5 W	126,4 W
Flujos luminosos		
Hemisferio inferior lado camino	8.978,2 lm	7.203,3 lm
Hemisferio inferior lado vereda	5.018,6 lm	4.358,6 lm
Hemisferio inferior, total	13.996,8 lm	11.561,9 lm
Hemisferio superior, total	0 lm	0 lm
Total del artefacto	13.996,8 lm	11.561,9 lm
Eficiencia	110,6 lm/W	91,5 lm/W
Pérdida al frente a la de 135 W sin filtro	-	17,3 %

Tabla 4. Eficiencias

En las porciones de espectro donde se busca limitar la irradiancia frente al espectro visible, no se vieron variaciones importantes frente a las obtenidas con la luminaria de 44 watts, quedando de esta manera dentro de los márgenes de tolerancia.

En la figura 4 se muestran los espectros con luminaria de potencia y se puede observar que el filtrado de la luz se mantiene igual al primer caso estudiado.

Conclusiones

La adición de filtros que limitan la emisión espectral de luz azul en luminarias led de luz blanca mostró

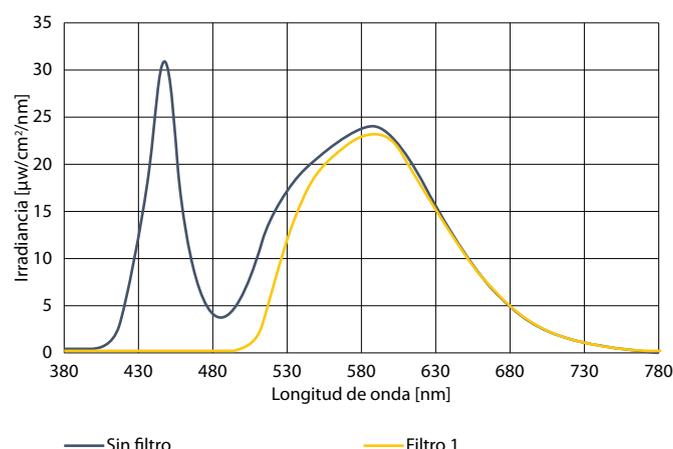


Figura 4. Espectro con luminaria de potencia

una alta eficiencia, eliminando toda emisión del espectro electromagnético por debajo de los quinientos nanómetros. Además, se logró una mejora en las eficiencias lumínicas de un 80,5 por ciento frente a la luminaria del tipo PC ámbar. Se obtuvo así una luminaria de espectro limitado, apta para utilizar en zonas de cielo protegido, de buena eficacia y de costo prácticamente similar a una luminaria led blanco convencional, con la única limitación de requerir cubierta refractora plana para poder facilitar la adhesión del filtro.

Reconocimientos

Los autores agradecen a la CIC PBA, donde Carlos Colonna es becario doctoral y Pablo Ixtaina es miembro de la carrera de Investigador Científico y Tecnológico. ❖

Referencias

- [1] Patrick Mottier (ED), LEDs for Lighting Applications, John Wileys & Sons, Inc, NJ 07030 UK USA, 2009.
- [2] Khanh, Bodrogi, Vinh, et al (Ed), Led Lighting, Technology and Perception, Wiley-VCH, Verlag GmbH & Co.KGaA, Boschstr. 12, 69469 Weinheim, Germany.
- [3] Ixtaina P., Sanhueza P., "Alumbrado vial de baja contaminación para la 'Ruta del Algarrobo'", Chile, trabajo publicado en Luxamérica 2016.
- [4] Cabello A., Manzano E, "Efectos ambientales y económicos del alumbrado público", trabajo publicado en Luxamérica 2010.
- [5] Mattivi M., "Los insectos y la eficiencia luminosa en el alumbrado público", trabajo publicado en Uso racional de la energía en iluminación.
- [6] Mattivi M., Manzano R., Kirschbaum C., Perrone O., "Los insectos y el alumbrado público", trabajo publicado en Luxamérica 2004.
- [7] IRAM AADL J 2020-4 Luminarias para vías públicas, Características de diseño. Parte 4 - Luminarias LED, 2015.
- [8] <https://www.avantes.com/products/spectrometers/starline>
- [9] IRAM AADL J 2022-1 Alumbrado público Parte 1 - Luminarias. Clasificación fotométrica, 2013.
- [10] <http://www.everfine.net/en/productsinfo.php?cid=8&id=42>

Nota del editor. La nota aquí reproducida fue originalmente presentada por los autores como artículo de investigación en Luxamérica 2018.