

Iluminación led de autopistas argentinas

Pablo Ixtaina, Alejandro Armas, Braian Bannert, Nicolás Bufo
 Laboratorio de Acústica y Luminotecnia
 de la Comisión de Investigaciones
 Científicas de la Provincia de Buenos Aires
 la1.cic.gba.gob.ar
 pixtaina@yahoo.com

La irrupción de luminarias leds en el alumbrado vial ha modificado pautas tradicionales de diseño. El cambio tecnológico propone una instalación con mayor costo inicial y menor consumo de energía. Por un lado, la relación de precios entre luminaria led y luminaria tradicional es, al menos, 3:1. Por otra parte, la mayor eficiencia energética del led permitiría mantener niveles adecuados de iluminación con menor potencia instalada. En este marco, desde mediados de 2013, las concesionarias viales de las autopistas que integran la red de accesos a la ciudad de Buenos Aires, junto con las autopistas urbanas de la mencionada ciudad, iniciaron un proceso de reconversión de sus sistemas de alumbrado a tecnología led.

Enmarcado en una revisión de conceptos de eficiencia y clasificación energética para instalaciones de alumbrado vial, el trabajo presenta los principales resultados de las pruebas de evaluación previa y de las instalaciones reconvertidas, que pueden considerarse como las primeras aplicaciones a gran escala del led en el alumbrado vial de la región.

Introducción

La red de accesos a la ciudad de Buenos Aires comprende cuatro concesiones viales: acceso Norte, con dos ramales principales; acceso Oeste; autopista Ezeiza-Cañuelas, como ingreso sur, y finalmente la autopista La Plata-Buenos Aires, que vincula la capital nacional con la provincial bonaerense. Esta red de

autopistas, cuya traza íntegra posee iluminación artificial, se completa con las también iluminadas autopistas urbanas de la ciudad, que la cruzan, y la avenida General Paz, que la circunda. El conjunto involucra alrededor de cuatrocientos kilómetros (400 km) de autopistas cuyos sistemas de alumbrado se encuentran en diversas etapas de reconversión.

En líneas generales, la red está compuesta por instalaciones típicas de autopista, con reserva central (cantero o división tipo New Jersey), entre dos y seis carriles por mano, con vanos de entre cincuenta y hasta 65 metros, y alturas de montaje que rondan los dieciséis metros.

Clase	Valores mínimos admitidos			TI	G
	Luminancias promedio	Uniformidades			
	Nivel inicial L _{med}	U _o 1)	U _l		
A	2,7 cd/m ²	0,4 L _{min./med}	0,7 L _{c min.}	≤ 10%	≥ 6
B1	2 cd/m ²	0,4 L _{min./med}	0,6 L _{c min.}	≤ 20%	≥ 5
B2	1,3 cd/m ²	0,4 L _{min./med}	0,6 L _{c min.}	≤ 15%	≥ 6
C*	2,7 cd/m ²	0,4 L _{min./med}	0,6 L _{c min.}	≤ 15%	≥ 6

1) En el caso de calzadas de cinco carriles en un mismo sentido de circulación, se admite U_o mayor a 0,32.

B1: ruta de clase B con entornos iluminados

B2: ruta de clase B con entornos no iluminados

U_l: valores de uniformidad longitudinal de cada carril

U_o: valores de uniformidad general

TI: incremento del umbral de percepción

G: deslumbramiento molesto (psicológico)

* En caso de utilizar el método de luminancias para la clase C.

Tabla 1.
 Parámetros luminotécnicos según IRAM-AADL J 2022-2

La iluminación se rige por la normativa nacional: IRAM-AADL J 2022-2[1], que sigue a la Recomendación CIE 30.2 [2]. Establece parámetros de calidad en base a luminancias, que se resumen en la tabla 1.

Inicialmente, las autopistas argentinas se consideraban calzadas tipo A, estableciéndose 2,7 candelas por metro cuadrado como luminancia media inicial. A partir del proceso de reconversión led y para el caso de las autopistas urbanas, con limitaciones en la velocidad máxima a cien u ochenta kilómetros por hora (100 u 80 km/h), se adoptó allí la clase B1, con luminancias medias iniciales de dos candelas por metro cuadrado (2 cd/m²).

El proceso de cambio estuvo guiado por estudios lumínicos de campo y pruebas de laboratorio realizados por el Laboratorio Oficial de la provincia de Buenos Aires (LAL). Las primeras aproximaciones se basaron en mediciones de luminancia estandarizadas [1], realizadas sobre zonas testigo. Estas se conformaron sobre un tramo recto de ruta seleccionado por, entre otros aspectos, la facilidad para desviar o interrumpir el tránsito, homogeneidad del pavimento, facilidad de acceso. En dicha sección, se reemplazaron las luminarias por aquellas a evaluar, sobre entre cuatro y ocho columnas, adoptándose el vano entre las dos centrales como área de evaluación. Estas pruebas, que comenzaron en 2011, junto con las evaluaciones iniciales de las instalaciones ya reconvertidas (2014-2015), conforman la base de datos de rendimiento de luminarias leds en autopistas utilizada en el presente trabajo y que se completa con los estudios fotométricos realizados a las luminarias.

Led en alumbrado vial

Podemos resumir los cambios que introduce el uso de luminarias led en alumbrado vial de la siguiente manera:

- » Incremento en la eficiencia de la instalación
- » Luz blanca

- » Espectro que permite aprovechar la visión mesópica
- » Vida superior de la instalación
- » Menores costos de mantenimiento

El primer punto será analizado en detalle más adelante, en virtud de los resultados recabados en las campañas de medición realizadas. Está claro que el ítem eficiencia energética es quizá el punto central en los planes de reconversión de instalaciones y la principal promesa del led como fuente luminosa.

Luz Blanca

No hay duda de que la luz blanca es preferida por los usuarios de los espacios públicos, incluso en el caso de conductores de vehículos (alumbrado vial). En este sentido, la luz blanca del led posee un rendimiento cromático que aventaja en mucho a las fuentes que, por su eficiencia, han sido preferidas en los últimos veinte años para el alumbrado público y vial (sodio alta presión, con luz predominantemente amarilla). La alta reproducción cromática del led permite una excelente percepción de colores en parques, plazas, áreas comerciales, etcétera, y no hay duda de que este punto se torna una ventaja sustancial e irremplazable en entornos urbanos, parques, zonas verdes.

Sin embargo, buena reproducción cromática no es un sinónimo de “ver bien”. En este punto, debe considerarse la tarea visual y el requerimiento que se le impone al sistema de alumbrado. En alumbrado vial, con eje en la seguridad del tránsito vehicular nocturno, el concepto de “ver bien” está asociado a la detección temprana de obstáculos y orientación adecuada a fin de evitar accidentes. En este sentido, la norma IRAM-AADL define: “El alumbrado de calles tiene por objeto facilitar a los participantes del tránsito vehicular el reconocimiento de la superficie de la calzada, sus límites, obstáculos, accesos, cruces, objetos móviles y estáticos sobre ella, de modo de permitir el desplazamiento nocturno con un mínimo de riesgo, facilitando también un rápido drenaje del tránsito”. Caracterizaciones

similares pueden encontrarse en bibliografía que puede hoy considerarse clásica ([3], [4] y [5]).

Tomando como base la definiciones anteriores, numerosos estudios han demostrado que el contraste monocromático o con espectros de iluminación acotados favorecen la detección de obstáculos, mejorando la sensación de claridad de la calzada ([4], [6] y [7]). De este modo, no estaría comprobado que la luz blanca, pese a ser preferida, mejore la visión bajo los preceptos del alumbrado vial.

Visión mesópica

El sistema de visión humano tiene dos tipos de receptores en la retina, conos y bastones. Los primeros, son los responsables de la llamada "visión diurna" o fotópica, cuya sensibilidad espectral (estandarizada) V_λ es la base para la definición de luz, con un máximo

en 555 nanómetros. Para niveles muy bajos de iluminación, los segundos fotorreceptores (bastones) adquieren protagonismo en la llamada visión nocturna o escotópica. La curva de sensibilidad para bastones adopta la misma forma que la fotópica, pero se encuentra desplazada hacia el azul en 55 nanómetros.

La visión mesópica es una situación intermedia entre la fotópica y la escotópica, que se da en situaciones de iluminación que, sin llegar a la oscuridad total, tampoco alcanzan a ser la de un día a pleno sol.

En el alumbrado vial, los valores luminancias en juego en la visión del conductor pueden clasificarse como mesópicos [8]. En estas condiciones, el corrimiento de la sensibilidad espectral de ojo hacia el azul puede generar cierta ganancia perceptiva gracias al espectro del led, que posee fuertes componentes en esta región.

S/P	Luminancia fotópica					
	0,3 cd/m ²	0,5 cd/m ²	0,75 cd/m ²	1 cd/m ²	1,5 cd/m ²	2 cd/m ²
0,25	0,33	0,54	0,8	1,05	1,56	2,05
0,35	0,32	0,53	0,79	1,04	1,54	2,04
0,45	0,32	0,52	0,77	1,02	1,53	2,03
0,55	0,31	0,51	0,76	1,01	1,52	2,02
0,65	0,3	0,5	0,75	1	1,5	2
0,75	0,29	0,49	0,74	0,99	1,49	1,99
0,85	0,29	0,48	0,73	0,98	1,48	1,98
0,95	0,28	0,48	0,72	0,97	1,47	1,97
1,05	0,27	0,47	0,71	0,96	1,46	1,96
1,15	0,27	0,46	0,7	0,94	1,44	1,95
1,25	0,26	0,45	0,69	0,93	1,43	1,94
1,35	0,26	0,45	0,68	0,92	1,42	1,92
1,45	0,25	0,44	0,68	0,91	1,41	1,91
1,55	0,25	0,43	0,67	0,91	1,4	1,9
1,65	0,24	0,42	0,66	0,9	1,39	1,89
1,75	0,24	0,42	0,65	0,89	1,38	1,88
1,85	0,23	0,41	0,64	0,88	1,37	1,87
1,95	0,23	0,41	0,63	0,87	1,36	1,86
2,05	0,23	0,4	0,63	0,86	1,35	1,85
2,15	0,22	0,39	0,62	0,85	1,34	1,84
2,25	0,22	0,39	0,61	0,84	1,33	1,83
2,35	0,21	0,38	0,61	0,83	1,32	1,82
2,45	0,21	0,38	0,6	0,83	1,31	1,81
2,55	0,21	0,37	0,59	0,82	1,3	1,8
2,65	0,2	0,37	0,58	0,81	1,29	1,79
2,75	0,2	0,36	0,58	0,8	1,28	1,78

Tabla 2. Luminancia fotópica corregida, considerando visión mesópica. Fuente: Kostic [9]

Kostic [9] cuantifica la mejora perceptiva a partir de considerar el incremento de sensibilidad del ojo en visión mesópica. La tabla 2, extraída de su publicación, permite obtener en forma simple la luminancia mesópica equivalente, para una cierta luminancia fotópica (medible), en función de la relación espectro fotópico-escotópico de la fuente (relación S/P).

Para ejemplificar el efecto de la visión mesópica, consideremos una instalación con led blanco frío (S/P ≈ 1,85). Según la tabla 2, en dicha instalación, una luminancia media de 0,88 candelas por metro cuadrado tendría el mismo efecto visual que una lograda con un espectro SAP (S/P ≈ 0,65). La diferencia se vuelve mínima para luminancias mayores, con lo que, si consideramos nuestra norma ([1], $L_{med} \approx 2,7 \text{ cd/m}^2$), la influencia de la visión mesópica es prácticamente despreciable.

Vida y mantenimiento

Los datos reales que pueden recabarse en este punto tienen un significado relativo, debido a los tiempos de uso relativamente cortos de las nuevas instalaciones. Pensando 3.600 horas por año para el tiempo de encendido medio de una instalación de alumbrado vial, las reconversiones locales no superarían el veinte por ciento (20%) de la vida prometida para el led, de 50.000 horas. Asimismo, los datos suministrados por los fabricantes (figura 1, extraída de Cree [10], como ejemplo) se basan en mediciones de relativo corto plazo (5.000 horas) y extrapolaciones.

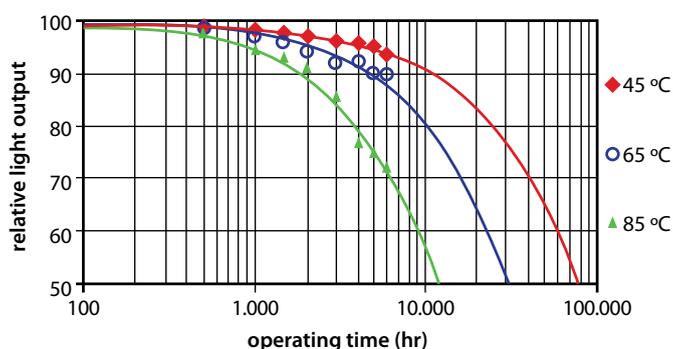


Figura 1. Vida y depreciación de módulos led, extraída de Cree [10]

Tomando la figura 1, y como dato adicional, la vida y depreciación del led dependen fuertemente de la temperatura de juntura dentro de la luminaria real, también difícil de estimar, por lo que el desempeño de las instalaciones actuales darán datos valederos recién en un par de años.

Eficiencia energética

Considerando el esquema de la figura 2, la luminancia media que produce una luminaria convencional puede obtenerse a partir de (1).

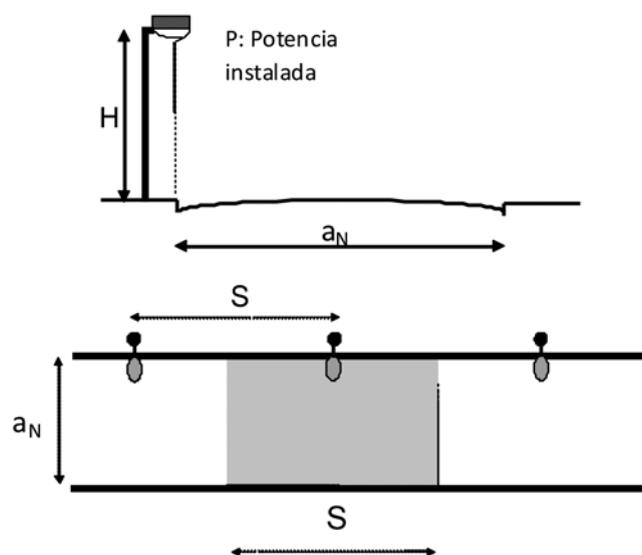


Figura 2. Esquema elemental de la calzada

$$(1) L = Q_0 \mu [(LOR \eta_L \eta_B P_{Lum}) / S aN]$$

En (1), μ es el rendimiento de la luminaria en la instalación (relación entre flujo luminoso útil y flujo emitido por la luminaria); Q_0 , el coeficiente de luminancia media; LOR es el rendimiento de la luminaria, η_L es la eficacia de la lámpara; η_B es el rendimiento del balasto, y P_{Lum} , la potencia de la luminaria.

En la luminaria led, la fuente luminosa (módulo led) es inseparable de la luminaria. El rendimiento es conjunto: módulo led, sistema óptico y driver. De modo que la (1) debe reescribirse como (2).

Artículo técnico

$$(2) L = Q_0 \mu [(LUM P_{Lum})/S aN]$$

La comparación entonces entre eficiencia de luminaria led frente a luminaria convencional debe realizarse a partir de confrontar (3) con (4).

$$(3) LOR \mu_L \mu_B$$

$$(4) \mu_{LUM}$$

La tabla 3 reúne datos típicos de luminarias, lámparas y equipos auxiliares instalados en nuestro país y evaluadas en el LAL.

Luminarias - LOR	0,75-0,85
Lámpara - η_L	120-140 lm/W
Balasto - η_B	0,90-0,95

Tabla 3. Parámetros típicos de luminarias convencionales

LOR igual a 0,75 es el valor mínimo admitido por el programa PRONUREE [11] de Argentina para el financiamiento de instalaciones de alumbrado. Valores más altos se pueden lograr en luminarias con ópticas cuidadas y cierres transparentes. Consideraciones similares valen para el resto de los parámetros. Por ejemplo, 120 lúmenes por watt corresponde a una lámpara de sodio alta presión de uso corriente, 140 vale para lámparas SAP de última generación y también para las conocidas como sodio cerámico, de luz blanca.

Con respecto a luminarias led, los datos recabados se resumen en la figura 3.

Con respecto a la figura 3, los datos presentados se corresponden a luminarias medidas en el LAL. Se muestran luminarias comercializadas y también prototipos o pruebas previas que posiblemente no llegaron al mercado. Este comentario vale principalmente para el periodo 2011-2013. Las barras del diagrama no tienen una correspondencia cierta con una cantidad de luminarias, los valores indicados son los característicos de cada período. La media de pruebas ronda las quince a veinte fotometrías anuales, exceptuando 2013, año en que la media fue superada justamente por la asistencia a empresas que ensayaron numerosos prototipos.

Si bien la figura 3 muestra una tendencia creciente para la eficacia de las luminarias leds para el periodo

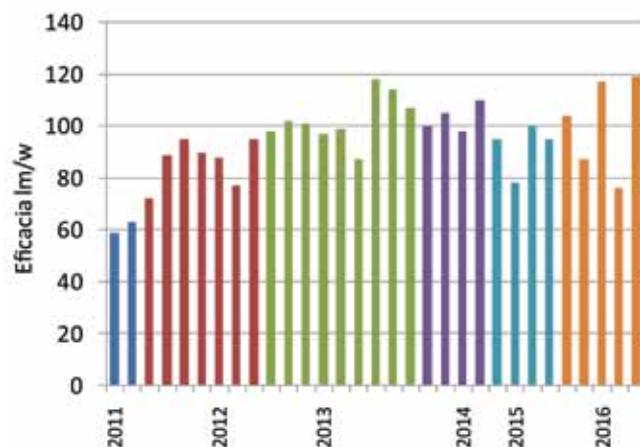


Figura 3. Eficacia de luminarias leds

2011-2014, se observa una cierta estabilidad actual, con valores entre noventa y casi 120 lúmenes por watt.

Para luminarias convencionales y tomando los valores mostrados en la tabla 3, se obtienen las eficacias mostradas en la tabla 4.

LOR $\mu_L \mu_B$	Eficacia (lm/W)
0,75 x 120 lm/W x 0,90	81 lm/W
0,85 x 140 lm/W x 0,95	113 lm/W

Tabla 4. Eficacias de luminarias convencionales

Comparando los promedios de los rangos de eficacia para cada tipo de luminaria, se obtiene una ventaja de las luminarias led de alrededor del siete por ciento frente a luminarias con lámparas de descarga. Sobre esta última comparación debe notarse que no necesariamente una luminaria led es sinónimo de la más alta eficacia, ya que coexisten en el mercado distintas tecnologías led, algunas de las cuales resultan en luminarias menos eficientes que las tradicionales con SAP.

Eficiencia en la instalación

Densidad de potencia normalizada: para cuantificar la eficacia de una instalación se define la densidad de potencia normalizada PN como la potencia instalada por unidad de área de camino (figura 2) en forma relativa al nivel de alumbrado producido.

Pracki [12] elaboró una propuesta de clasificación energética para instalaciones de alumbrado vial. Su estudio se basó en la simulación, mediante software, de varias alternativas de instalación: dos geometrías,

Clase de eficiencia energética		PN [W/m ² /cd/m ²]
A	La mayor eficiencia energética	< 0,2
B	Muy eficiente	0,2–0,4
C	Eficiente	0,4–0,6
D	Eficiencia intermedia	0,6–0,8
E	Poco eficiente	0,8–1
F	Muy poco eficiente	1–1,2
G	La menor eficiencia energética	> 1,2

Tabla 5. Clasificación en función de la potencia normalizada

pavimento estándar oscuro y claro, dos formas típicas de distribución luminosa de luminarias y variadas eficacias de lámparas. Las combinaciones logradas generaron un rango de valores posibles de PN, que posteriormente fue utilizado para calificar energéticamente a la instalación.

La tabla 5, extraída de la referencia citada, muestra el sistema de clasificación propuesto, que califica las instalaciones según su potencia normalizada en siete niveles, desde la mayor eficiencia (clase A) a la menor (clase F).

Potencia normalizada en autopistas argentinas

En la tabla 6, se muestran potencias normalizadas obtenidas a partir de evaluaciones de luminancias en las autopistas de ingreso y urbanas de la ciudad de Buenos Aires ya citadas.

Autopista	Lmed	Pot/Col	Densidad de potencia normalizada
Led 1	2,3	416 W	0,29 W/m ² cd/m ²
Led 2	3,79	270 W	0,23 W/m ² cd/m ²
Led 3	2,15	570 W	0,32 W/m ² cd/m ²
Led 4	2,11	570 W	0,38 W/m ² cd/m ²
Sodio 400 1	4,34	440 W	0,27 W/m ² cd/m ²
Sodio 400 2	2,32	880 W	0,36 W/m ² cd/m ²
Sodio 400 3	5,2	880 W	0,33 W/m ² cd/m ²

Tabla 6. Clasificación en función de la potencia normalizada

Todas las evaluaciones se realizaron según los métodos estandarizados por la norma IRAM-AADL. Se incluyen instalaciones led reconvertidas durante el periodo 2013-2015 (mediciones en estado inicial) y valores típicos de las mismas instalaciones con iluminación tradicional (sodio alta presión). Estas últimas mediciones se corresponden con sistemas depreciados. La totalidad de las evaluaciones consideradas contemplaban, para el caso led, estaciones que mantuvieron

los mismos parámetros geométricos (vanos, alturas de montaje, etcétera) esto es, la reconversión solo incluyó recambio de luminarias.

Se observa que todas las instalaciones mantuvieron una clasificación tipo “B” (muy eficiente), sin embargo, el uso de leds no generó grandes diferencias en la potencia normalizada. Existe un caso, incluso, en el que la eficiencia empeoró con el uso de leds.

Conclusiones

El uso de leds en autopistas no está evidenciando un incremento sustancial en la eficiencia energética. En este sentido, la mejora del siete por ciento (7%) promedio encontrada para la eficacia de las luminarias led, no se pone de manifiesto en las instalaciones estudiadas, que mantienen prácticamente sin cambios el índice PN.

Las nuevas instalaciones reducen el consumo energético a partir de niveles medios más cercanos a los reglamentados, lo que marca una tendencia a reforzar el control del sobredimensionamiento. ❖

Referencias

- [1] Instituto Argentino de Racionalización de Materiales, IRAM-AADL J 2022-2, Alumbrado Público, Vías de Tránsito – Clasificación y Niveles de Iluminación. Buenos Aires, 1995
- [2] CIE Publicación N° 30-2 (TC-4.6), Calculation and measurement of luminance and illuminance in road lighting. Viena, 1982.
- [3] Boer J. de; Cohu, M; Schreuder, D. Public Lighting. Philips Technical Library, Ámsterdam, 1967.
- [4] Bommel W. van; Boer, J. de. Road Lighting, Philips Technical Library, Ámsterdam, 1982.
- [5] Erbay, A. Reflection properties of road surfaces. ILTUB, Berlín, 1974.
- [6] Boer, J. de. “Investigations on the influence of colour of light on vision in road” en Zentralblatt fur Verkehrs-Medizin, Verkehrs Psychologie, Vol.6, 1960.
- [7] Blackwell, O. M., Blackwell, H. R. “A proposed procedure for predicting performance aspects of roadway lighting in terms of visibility” en Journal of IES, vol.6 p. 148, 1977.
- [8] Moon, P. The Scientific Basis of Illuminating Engineering. McGraw Hill Company, Londres, 1936.
- [9] Kostic, A. M.; Kremic, M. M.; Djokic, L. S.; y Kostic, M. B. “Light-emitting diodes in street and roadway lighting - a case study involving mesopic effects”, en Lighting Research and Technology 45: 217, 2013
- [10] Cree, <http://www.cree.com/>
- [11] <http://energia3.mecon.gov.ar/contenidos/verpagina.php?idpagina=3102>
- [12] Pracki, P. “A proposal to classify road lighting energy efficiency”, en Lighting Research and Technology Vol 43, p271-280, 2011.

El artículo aquí reproducido fue originalmente presentado por los autores como trabajo de investigación en el marco del XIII Congreso Panamericano de Iluminación Luxamérica 2016, llevado a cabo en La Serena (Chile).