

Iluminación led en 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 LAL CIC¹, Argentina – <http://www.cic.gba.gov.ar/centros/otros-centros/lal/pixtaina@yahoo.com>

Resumen—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 adecuados niveles 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 (Argentina), 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.

Abstract— The barrage of leds luminaires in road lighting has modified traditional design rules. An initial more expensive installation with less energy consumption is proposed by the technological change. On one hand, the prices relationship between led luminaries and traditional ones is minimum 3:1. On the other hand, the increase of energy efficacy would give good lighting levels with less installed power. Within this framework, the vial concessionaries of the access network road to Buenos Aires City (Argentina) together with the Urban Motorways began a reconversion to led lighting process.

Within the efficiency and energy classification concepts review framework, the paper presents the main results of installation evaluation proofs and the reconverted installation results. These lighting installations can be considered as the first road lighting led applications in the region.

I. INTRODUCCIÓN

La Red de Accesos a la ciudad de Buenos Aires (Argentina) 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. 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 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 50 y hasta 65 m y alturas de montaje que rondan los 16 m.

Los parámetros lumínicos se rigen 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 luminancia, que se resumen en la Tabla I.

TABLA I
PARÁMETROS LUMINOTÉCNICOS SEGÚN IRAM AADL J 2022-1

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

¹⁾ En el caso de calzadas de cinco carriles en un mismo sentido de circulación, se admite U_o > 0,36. En seis carriles o más se admite U_o > 0,32.

B1 Ruta de clase B con entornos iluminados.
B2 Ruta de clase B con entornos no iluminados.
U_i corresponde a los valores de uniformidad longitudinal de cada carril (ver el apartado 5.2.2)
U_o corresponde a los valores de uniformidad general (ver el apartado 5.2.3)
TI Incremento del umbral de percepción (ver el apartado 5.5.6).
G Deslumbramiento molesto (psicológico) (ver el apartado 5.5.5).
* En el caso de utilizar el método de luminancias para la clase C.

Inicialmente, las autopistas argentinas se consideraban calzadas tipo A, estableciéndose 2,7 cd/m² 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 100 u 80 km/h, se adoptó la clase B1, con luminancias medias iniciales de 2,0 cd/m².

El proceso de cambio estuvo guiado por estudios lumínicos de campo y pruebas de laboratorio, realizadas por el LAL, Laboratorio Oficial de la provincia de Buenos Aires. Las primeras se basaron en mediciones de luminancia estandarizadas [1], realizadas sobre “zonas testigo”. Éstas se conformaban con 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 reemplazaban 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, iniciadas en 2011, junto con las evaluaciones iniciales de las instalaciones ya reconvertidas (2014-2015), conforman la base de datos de performance de luminarias leds en autopistas utilizada en el presente trabajo.

¹ Los autores agradecen a la CIC PBA, donde P.I. es miembro de la Carrera de Investigador Científico y Tecnológico, A.A. y B.B. son profesionales y N.B. es personal técnico.

II. 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
- Un espectro que permite aprovechar la visión mesópica.
- Vida superior de la instalación.
- Menores costos de mantenimiento.

El primer punto será analizado en detalle en el apartado III, 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.

A. Luz Blanca

No hay duda 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 20 años para el alumbrado público y vial (sodio alta presión, amarilla). La alta reproducción cromática del led permite una excelente percepción de colores en parques, plazas, áreas comerciales, etc., y no hay duda 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, [1] 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 [3,4,5].

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, 7]. De este modo, no estaría comprobado que la luz blanca, pese a ser preferida, mejore la visión bajo los preceptos del alumbrado vial.

B. 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 nm. 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 nm.

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

En el alumbrado vial, los valores luminancias en juego en la visión del conductor, pueden clasificarse como mesópicas [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, con fuertes componentes en esta región del espectro.

Kostic [9] cuantifica la mejora perceptiva a partir de considerar el incremento de sensibilidad del ojo en visión mesópica. La Tabla II, 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 – escópico de la fuente (relación S/P).

TABLA II
LUMINANCIA FOTÓPICA CORREGIDA, CONSIDERANDO VISIÓN MESÓPICA (REFERENCIA S/P 0,65 –SAP-) – TOMADA DE [9]

S/P	Photopic luminance (cd/m ²)					
	0.30	0.50	0.75	1.00	1.50	2.00
0.25	0.33	0.54	0.80	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	0.30	0.50	0.75	1.00	1.50	2.00
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	0.70	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	1.40	1.90
1.65	0.24	0.42	0.66	0.90	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	0.40	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	0.60	0.83	1.31	1.81
2.55	0.21	0.37	0.59	0.82	1.30	1.80
2.65	0.20	0.37	0.58	0.81	1.29	1.79
2.75	0.20	0.36	0.58	0.80	1.28	1.78

Para ejemplificar el efecto de la visión mesópica, consideremos una instalación con led blanco frío (S/P \approx 1,85). Según la

tabla II, en dicha instalación, una luminancia media de 0,88 cd/m² tendría el mismo efecto visual que 1,0 cd/m² logrados 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} ≈ 2,7 cd/m²), la influencia de la visión mesópica es prácticamente despreciable.

C. *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 3600 h/año para el tiempo de encendido medio de una instalación de alumbrado vial, las reconversiones locales no superarían el 20 % de la vida prometida para el led, de 50.000 h. Asimismo, los datos suministrados por los fabricantes (fig. 1, extraída de [10], como ejemplo) se basan en mediciones de relativo corto plazo (5000 h) y proyecciones.

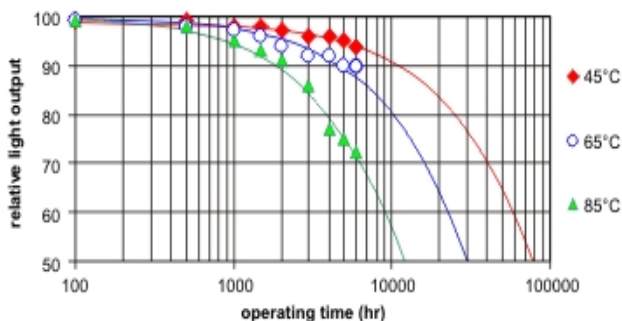


Fig. 1. Vida y depreciación de módulos led, extraída de [10]

Tomando la fig. 1, y como dato adicional, la vida y depreciación del led dependen fuertemente de la temperatura de junta 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.

III. EFICIENCIA ENERGÉTICA

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

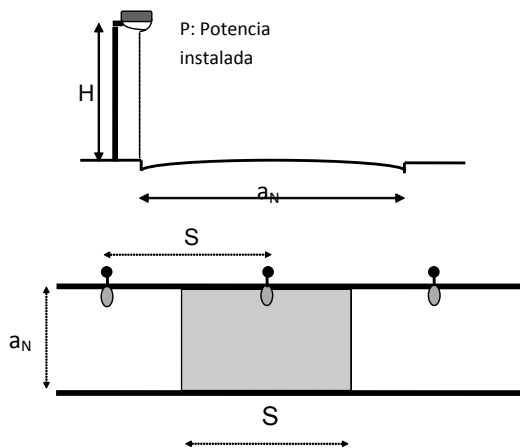


Fig. 2. Esquema elemental de la calzada

$$L = Q_0 \mu_u \frac{LOR \mu_L \mu_B P_{Lum}}{S a_N} \tag{1}$$

En (1), μ_u 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).

$$L = Q_0 \mu_u \frac{\mu_{LUM} P_{Lum}}{S a_N} \tag{2}$$

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

$$LOR \mu_L \mu_B \tag{3}$$

$$\mu_{LUM} \tag{4}$$

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

TABLA III
PARÁMETROS TÍPICOS DE LUMINARIAS CONVENCIONALES

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

LOR = 0,75 es el valor mínimo admitido por el programa PRONUREE de Argentina para el financiamiento de instalaciones de alumbrado. Valores más altos son usuales en luminarias cuidadas con cierres transparentes. Consideraciones similares valen para el resto de los parámetros. Por ejemplo, 120 lm/W corresponde a una lámpara de sodio alta presión de uso corriente, 140 lm/W vale para lámparas de última generación, también para las conocidas como “sodio cerámico”, de luz blanca.

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

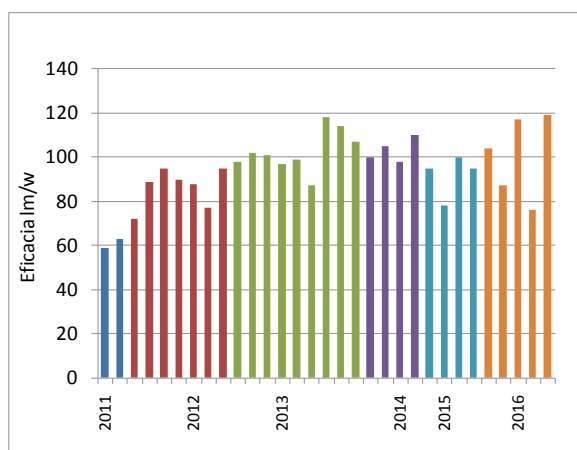


Fig. 3. Eficacia de luminarias leds

Con respecto a la fig. 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 los períodos 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 15/20 fotometrías anuales, exceptuando 2013, año en que la media fue superada justamente por la asistencia a empresas que ensayaron numerosos prototipos.

Si bien la fig. 3 muestra una tendencia creciente para la eficacia de las luminarias leds para el período 2011-2014, se observa una cierta estabilidad actual, con valores entre 90 lm/W y casi 120 lm/W.

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

TABLA IV
EFICACIAS DE LUMINARIAS CONVENCIONALES

LOR μ_L μ_B	
0,75 x 120 lm/W x 0,90	81 lm/W
0,85 x 140 lm/W x 0,95	113 lm/W

Comparando los promedios de los rangos de eficacia para cada tipo de luminaria, se obtiene una ventaja de las luminarias led de alrededor del 7% 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.

A. Eficiencia en la Instalación.

Densidad de potencia normalizada

Para cuantificar la eficacia de una instalación se define la densidad de potencia normalizada P_N como la potencia instalada por unidad de área de camino (fig.2) en forma relativa al nivel de alumbrado producido.

$$P_N = \frac{P_D}{L_m} = \frac{P}{S_{a_N} L_m} \quad (5)$$

En (5), L_m es la luminancia media sobre la calzada, quedando expresada la densidad normalizada en $W/m^2/cd/m^2$.

Pracki [11] 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, 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 P_N , que posteriormente fue utilizado para calificar energéticamente a la instalación.

La tabla V, extraída de la referencia citada, muestra el sistema de clasificación propuesto. Por un lado, la tabla 1 muestra la clase de eficiencia energética en función de la potencia normalizada.

TABLA V
CLASIFICACIÓN EN FUNCIÓN DE LA POTENCIA NORMALIZADA

Clase de eficiencia energética		P_N [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 – 1,0
F	Muy poco eficiente	1,0 – 1,2
G	La menor eficiencia energética	>1,2

A. Potencia Normalizada en Autopistas Argentinas.

En la tabla VI se muestran potencias normalizadas obtenidas a partir de evaluaciones de luminancias en las autopistas de ingreso y urbanas de la ciudad de Buenos Aires (Argentina).

TABLA VI
CLASIFICACIÓN EN FUNCIÓN DE LA POTENCIA NORMALIZADA

Autopista	L_{med} [cd/m ²]	Pot/col [W]	Densidad de potencia normalizada [W/(m ² cd/m ²)]
Led 1	2,30	416	0,29
Led 2	3,79	270	0,23
Led 3	2,15	570	0,32
Led 4	2,11	570	0,38
Sodio 400 1	4,34	440	0,27
Sodio 400 2	2,32	880	0,36
Sodio 400 3	5,20	880	0,33

Todas las evaluaciones se realizaron según los métodos es-

tandarizados por [1]. Se incluyen instalaciones led reconvertidas en el período 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, etc.) esto es, la reconversión solo incluyó recambio de luminarias.

Se observa que todas las instancias 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, que la eficiencia empeoró con el uso de leds.

IV. CONCLUSIONES

El uso de leds en autopistas no está evidenciando un sustancial incremento en la eficiencia energética. En este sentido, la mejora del 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 P_N .

Las nuevas instalaciones reducen el consumo energético a partir de niveles medios más cercanos a los reglamentados [1], lo que marca una tendencia a reforzar el control del sobredimensionamiento.

RECONOCIMIENTOS

Los autores agradecen a la CIC PBA, donde P.I. es miembro de la Carrera de Investigador Científico y Tecnológico, A.A. y B.B. son profesionales y N.B es personal técnico.

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] Publication CIE N° 30-2 (TC-4.6), *Calculation and measurement of luminance and illuminance in road lighting*. Vienna, 1982.
- [3] J. De Boer, M. Cohu, D. Schreuder, *Public Lighting*. Philips Technical Library, The Netherlands, 1967.
- [4] W. van Bommel, J.de Boer, *Road Lighting*, Philips Technical Library, The Netherlands, 1982.
- [5] A. Erbay, *Reflection properties of road surfaces*. ILTUB, Berlin, 1974.
- [6] Boer, J.B. *Investigations on the influence of colour of light on vision in road*. Zentralblatt für 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*. Journal of IES, vol.6 p. 148, 1977.
- [8] Moon, P. *The Scientific Basis of Illuminating Engineering*. McGraw Hill Company, London, 1936.
- [9] AM Kostic, MM Kremic, LS Djokic and MB Kostic, *Light-emitting diodes in street and roadway lighting - a case study involving mesopic effects*, Lighting Research and Technology 2013 45: 217
- [10] <http://www.cree.com/>

- [11] P. Pracki, “A proposal to classify road lighting energy efficiency”, *Lighting Res. And Technol.* Vol 43, p271-280, 2011.