

Eficiencia y mantenimiento de luminarias led en alumbrado público

Eduardo Manzano
Departamento de
Luminotecnia, Luz y Visión,
Universidad Nacional de
Tucumán ILAV-CONICET
emanzano@herrera.unt.edu.ar

Resumen

La eficiencia de las instalaciones de iluminación con luminarias de tecnología led está estrechamente relacionada con el mantenimiento. La duración y el aprovechamiento óptimo de las instalaciones dependerán inicialmente de una selección adecuada de las características técnicas de las luminarias, y su funcionamiento dependerá de la conservación. Características a considerar tales como: la vida, la depreciación luminosa, la estabilidad del color, la depreciación por suciedad y las operaciones de mantenimiento se abordan en el presente trabajo y se comparan con la tecnología tradicional de luminarias que emplean lámparas de descarga.

Introducción

Con la tecnología tradicional de lámparas de descarga, dado que el componente más solicitado fue siempre la lámpara, sus averías puntuales debían ser atendidas en un breve lapso de tiempo (24 a 48 horas). La depreciación gradual por envejecimiento se compensaba con cambios masivos de lámparas cada cuatro a seis años y limpiezas simultáneas. La práctica de mantenimiento más aplicada en países en vías de desarrollo ha sido la de cambiar las lámparas una vez que se extinguían (mantenimiento correctivo). En países más desarrollados, la práctica más indicada fue la de mantenimiento correctivo y preventivo simultáneamente [1] [2].

Una característica que se espera de la tecnología de luminarias led es una reducida demanda de mantenimiento durante su vida útil. Lo ideal para países en vías de desarrollo sería disponer de luminarias con mantenimiento cero, es decir que una vez instaladas no requieran prácticamente atención durante su vida útil, es decir que no fallen, que no se deprecien por envejecimiento y que al final de su vida útil se cambien por una nueva sin impactar en el medioambiente. La tecnología led promete acercarse a esta concepción en un futuro.

Algunos aspectos respecto al mantenimiento de la tecnología led son de destacar, los cuales se diferencian de la tecnología de lámparas de descarga, entre ellos: la vida y la depreciación luminosa, la eficiencia luminosa, la estabilidad del color de la luz, la disipación del calor, el factor de mantenimiento y las operaciones de mantenimiento.

Vida y depreciación luminosa

En las lámparas incandescentes, se definía la vida como vida media, tiempo de servicio hasta que el cincuenta por ciento (50%) de la muestra ensayada dejaba de funcionar o sobrevivía. En lámparas de descarga, dado que además de fallar se deprecian, se define la vida útil, que combina la vida considerando los ciclos de encendido y la reducción de flujo luminoso con el uso. Con la tecnología led, las características de comportamiento son diferentes. Las fallas abruptas

completas son muy escasas y se espera que la depreciación de flujo luminoso se reduzca con una duración muy prolongada (¿100.000 horas?). En consecuencia, se emplean otros parámetros para definir su comportamiento.

Para caracterizar la depreciación luminosa que experimenta una luminaria led, se emplea como referencia la depreciación que experimenta la placa o módulo de leds. Si bien el módulo compone la luminaria, su comportamiento es distinto en un recinto cerrado; con un disipador de calor y bajo condiciones ambientales de temperatura y de corriente eléctrica diferentes a las del laboratorio, es muy factible que la respuesta no sea la misma. En la norma LM80 [3] se indica un método para caracterizar la curva de reducción que flujo luminoso de un módulo led en función del tiempo de uso y un valor característico LX, por ejemplo L70 igual a 67.000 horas significa que redujo el flujo a un setenta por ciento (70%) del valor inicial al cabo de 67.000 horas de uso (ver figura 1). Dado que no se pueden efectuar ensayos de envejecimiento acelerado, el método de ensayo para estimar la depreciación de flujo mide el flujo luminoso cada mil horas durante seis mil horas para más de veinte muestras (indicado en IEC 62722-2-1 [4]) y luego, para tiempos mayores, se efectúa una extrapolación mediante un método de ajuste (definido en TM 21-11 [5]). Debemos confiar en que el fabricante de la luminaria hace que el módulo de led que utiliza trabaje a la temperatura de juntura y corriente de driver similar a la que informa según el ensayo LM80.

La curva de línea llena de la figura 1 representa un comportamiento promedio, pero existe una dispersión que se

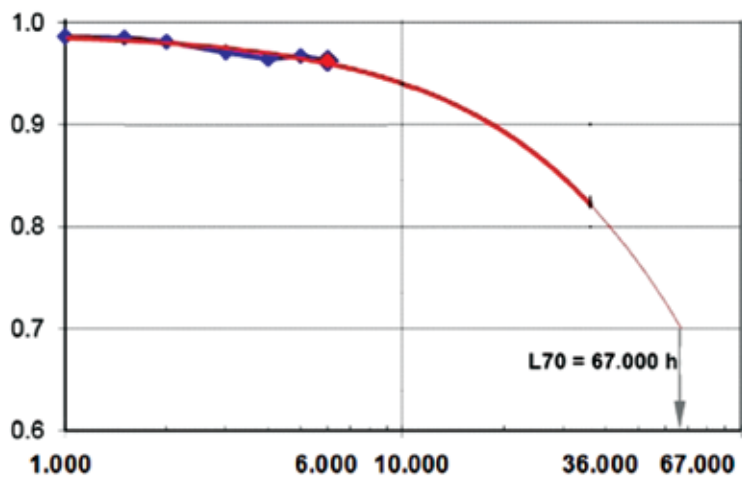


Figura 1. L70 es el tiempo de uso hasta que el flujo luminoso alcanza el setenta por ciento (70%) del valor inicial [5]

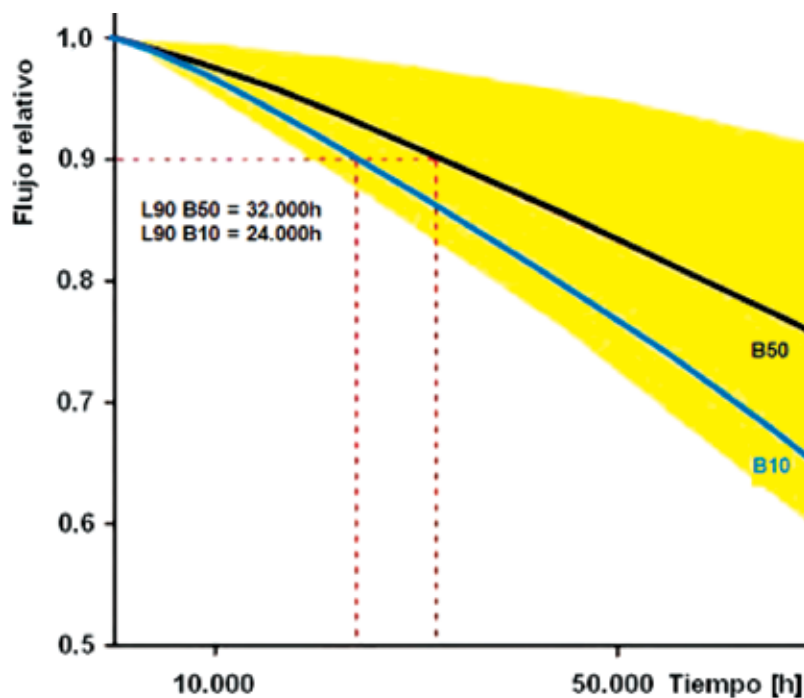


Figura 2. Depreciación luminosa y el porcentaje de leds que alcanzan dicho valor [6]

representa con el porcentaje BY de la muestra de led que no alcanza el LX esperado (ver figura 2). Por ejemplo, L70 B10 de 67.000 horas indica que el noventa por ciento (90%) de las fuentes led de la muestra medida alcanzaron el treinta por ciento (30%) de reducción de flujo al cabo de 67.000 horas. O que el diez por ciento (10%) está por debajo del setenta por ciento (70%) de emisión del flujo luminoso inicial. Dado que estos parámetros dependen de la temperatura de funcionamiento, se suelen indicar a una temperatura ambiente de funcionamiento de 25 grados centígrados como referencia.

Se incorpora además un indicador de falla abrupta, CZ: tiempo transcurrido hasta que ocurre Z% de falla abrupta de los componentes de la muestra. Por ejemplo C5 de 50.000 horas indica que el cinco por ciento (5%) de las fuentes de la muestra ha tenido una falla abrupta al cabo de 50.000 horas.

Como indicador de la vida de una luminaria led para planificación del mantenimiento, se recomiendan dos criterios de conjuntos de parámetros (ver figura 3):

- » el tiempo de uso para L80 B50 e independientemente del tiempo de uso para alcanzar CZ;
- » un único valor del tiempo de uso para alcanzar LX BY CZ.

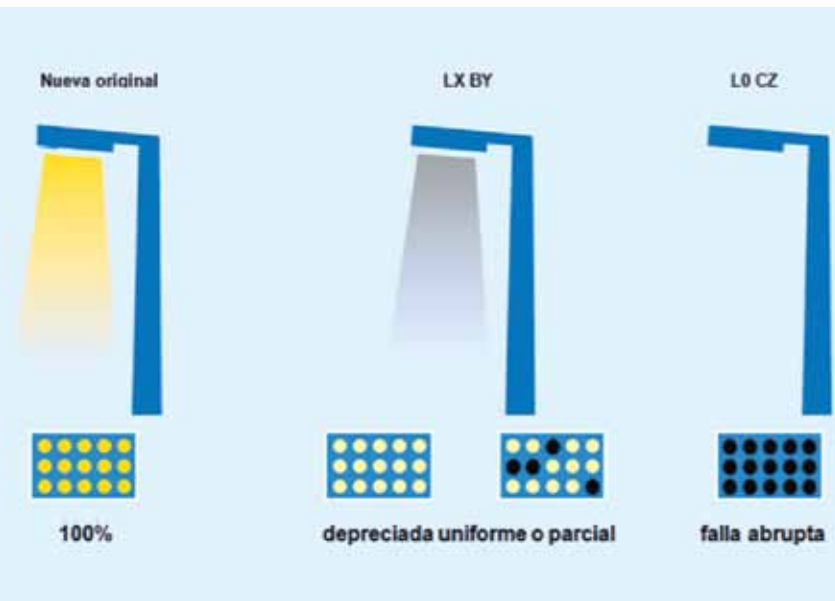


Figura 3. Representación esquemática del estado de falla de una luminaria led [7]

Datos sobre vida de módulos de leds y drivers (si existieran) deben indicarse separadamente. Estos datos son todavía escasos por el reducido tiempo de uso transcurrido.

Si efectivamente las fallas abruptas fueran muy bajas, la detección de luminarias fuera de servicio por inspección nocturna daría lugar a otro tipo de detección tal vez más eficiente y económica (telegestión) o simplemente denuncias de vecinos. Asimismo, si la vida fuera muy prolongada con depreciación muy baja, las operaciones de reparación in situ de averías de luminarias serían sustituidas por el reemplazo completo y posterior reparación en el taller. En este último caso, no se requerirían sistemas especiales de apertura manual por parte del operario ubicado en una cesta en altura.

Cabe destacar también que dada la velocidad del cambio tecnológico, es posible que la reposición de componentes no sea posible por obsolescencia o inexistencia.

Eficiencia de la luminaria led

Uno de los parámetros de calidad actualmente utilizados en luminarias con tecnología led es la eficiencia luminosa, calculada como sigue: eficiencia es igual a flujo luminoso total emitido por la luminaria sobre potencia total consumida (lm/W).

Este parámetro difiere del rendimiento luminoso, parámetro empleado con luminarias convencionales de lámpara

de descarga: rendimiento es igual a flujo emitido por la luminaria sobre flujo de lámpara. No es posible aplicarlo para luminarias led dado que la emisión de flujo de los módulos led depende de la disipación de calor y no pueden ser separada de la luminaria.

Como bien es conocido, la eficiencia de la luminaria led es un parámetro global, no indica cuánto efectivamente de dicho flujo es emitido hacia la calzada y cuánto hacia la vereda, ni si el resultado final cumple con los requerimientos de las normas. A medida que evoluciona la tecnología del led, el valor aumenta. Actualmente, alcanza los 80 a 110 lúmenes por watt en luminarias de alumbrado público de muy buena calidad y duración. Dicho valor es inferior al de la eficiencia luminosa de los leds individuales o de la placa de led (120 a 130 lúmenes por watt) dado que existen pérdidas en la óptica del módulo (cinco al diez por ciento), en la disipación de calor (cinco al diez por ciento) y en el driver (diez por ciento). Cabe destacar que estos son valores iniciales de eficiencia pero que, dependiendo de la depreciación, podría alcanzar valores en promedio un quince por ciento inferiores a lo largo de la vida útil (hasta que el factor de mantenimiento sea menor a 0,8).

La eficiencia depende de la corriente de alimentación y de la disipación del calor. El valor actual óptimo de corriente aparenta ser de 700 miliampers, indicado por fabricantes de luminarias (ver figura 4) [8].

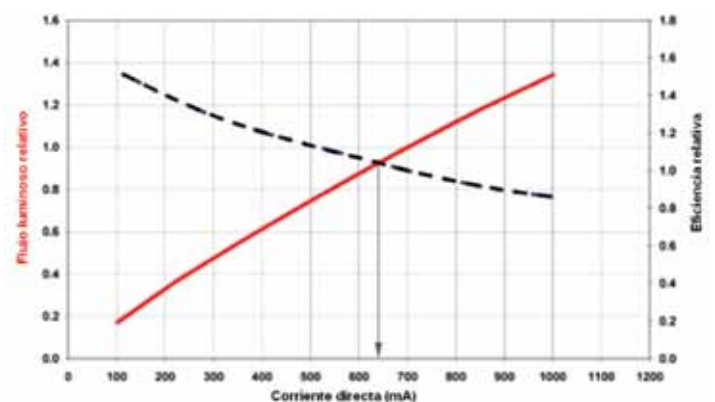


Figura 4. Flujo luminoso y eficiencia relativa de led en función de la corriente [8]

Consumo energético eficiente

El sistema de iluminación puede ser muy eficiente en términos de lúmenes por watt y ofrecer un aprovechamiento óptimo en términos de watt/lux/metro cuadrado o watt/(candela/metro cuadrado)/metro cuadrado [$W/lx/m^2$ o $W/(cd/m^2)/m^2$], pero además debe gestionar eficientemente la energía que consume.

Dado que la inversión en tecnología led implica un gasto muy importante [9], es más conveniente un cambio total, es decir, incluir en el driver, además del estabilizador de voltaje y la protección para descargas atmosféricas, un regulador de flujo luminoso y un sistema de control y gestión de la información del estado de funcionamiento. Gestionar a distancia o programar el funcionamiento es el concepto de telegestión en ciudades inteligentes. Un ahorro de energía importante puede producirse si en lugar de proveer inicialmente el 125 por ciento del nivel mínimo mantenido (factor de mantenimiento igual a 0,8), el nivel se fuera incrementando gradualmente para compensar la depreciación de la luminaria regulando el flujo luminoso. Se podría, de este modo, reducir en teoría un 12,5 por ciento el consumo.

Otra forma de reducir el consumo es reduciendo el flujo luminoso cuando se reduce el tráfico a partir de cierta hora de la noche [10] o mediante el uso de sensores de tráfico adaptativos en cada luminaria o por grupo de luminarias.



Figura 5. Diferencias de color percibido con luminarias led [6]

Estabilidad del color

La estabilidad del color de las luminarias led [11] puede ser tan importante como su depreciación a lo largo de su vida, esto depende de su aplicación, por ejemplo donde se requiera discriminación del color, caso de iluminación de obras de arte en museos, exanimación clínica o comparación de colores en pinturas. También es el caso cuando se baña con luz monocromática grandes superficies con múltiples luminarias (ver figura 5), donde la igualdad y estabilidad cobra importancia. Sin embargo no es el caso del alumbrado vial donde la importancia es menor.

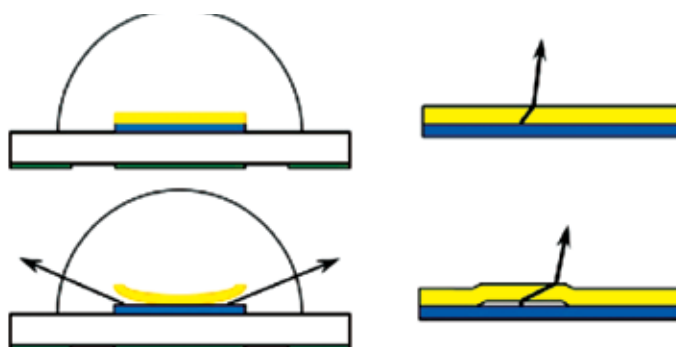


Figura 6. Cambio de color en leds por desprendimiento o deslaminado de la capa de fósforo [12]

Es posible que algún cambio de color comience a ser perceptible a partir de las 25.000 horas de uso de las luminarias led. El cambio sería más perceptible cuando por proximidad se compare una luminaria nueva (reemplazada por falla) con las restantes envejecidas. Aún en dicho caso no será relevante siempre y cuando la temperatura de color correlacionada no se aparte en más de cien grados kelvin.

Las causas del cambio de color en led [12] pueden deberse a cambios físicos en la capa de fósforo que filtra la luz azul por procesos de fabricación. Desprendimientos o deslaminado (ver figura 6) son algunas causas potenciales.

En caso de que sea necesario garantizar la estabilidad del color, dos son las métricas que se recomiendan como indicadores de la magnitud del cambio de color: la desviación $\Delta u'v'$ y los pasos de las elipses de MacAdam.

El color de un led [11] se describe en el diagrama de cromaticidad CIE 1976 por sus coordenadas u' y v' . Para mantener la apariencia, un apartamiento máximo recomendado de $\Delta u'v'$

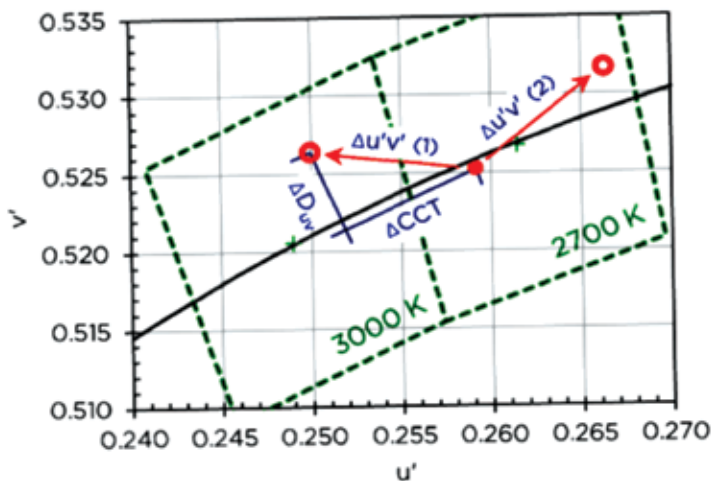


Figura 7. $\Delta u'v'$ como indicador del cambio de color en luminarias led [11].

medida en nueve de cada diez muestras de una fuente luminosa debe ser inferior a 0,007 durante las primeras 6.000 horas de funcionamiento. $\Delta u'v'$ no indica la dirección del cambio, solo su magnitud (ver figura 7).

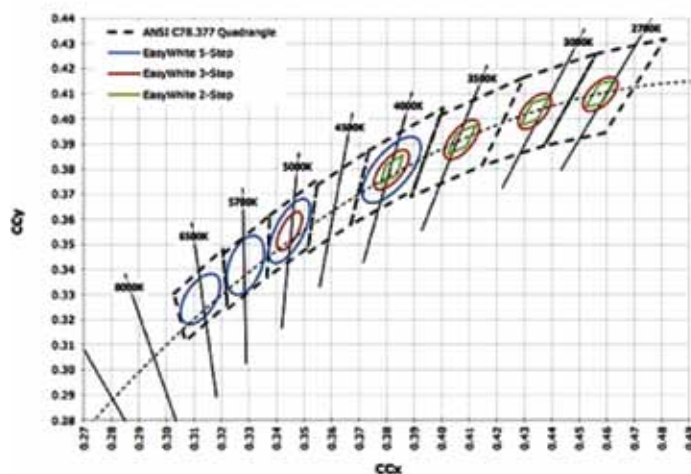


Figura 9. Elipses de MacAdam como indicadores del cambio de color en luminarias led [14]

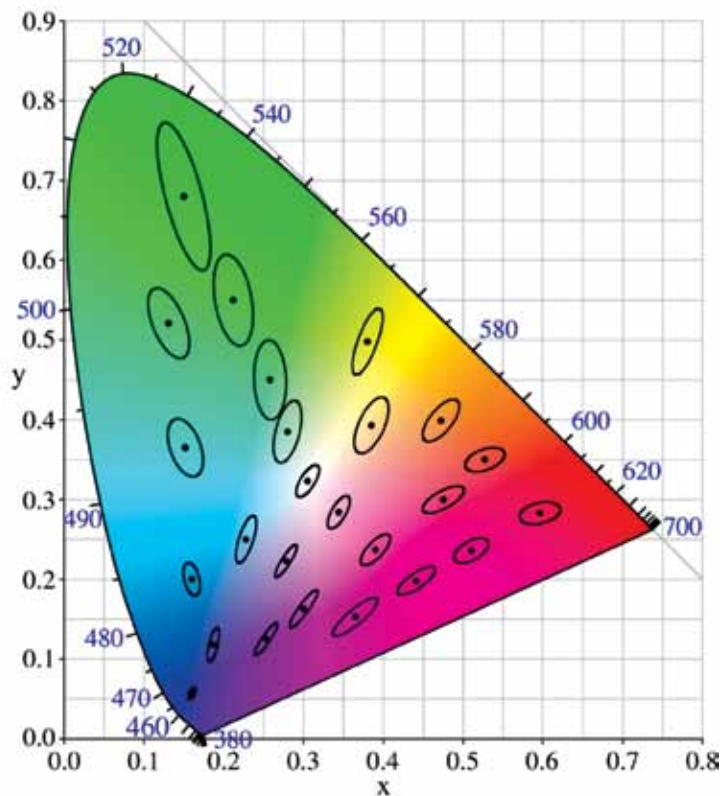


Figura 8. Elipses de MacAdam como indicadores del cambio de color en luminarias led [13]

El color de un led también puede caracterizarse por un punto (x,y) en el diagrama de cromaticidad CIE 1931 (ver figura 8). Si alrededor de dicho punto se traza la elipse de MacAdam correspondiente, cuanto más cerca se encuentre otro led, menos desviación de color se notará cuando dichos leds se coloquen uno al lado del otro en una instalación de iluminación.

La distancia desde el punto deseado en cada elipse se mide en SDCM (*Standard Deviation of Colour Matching*, 'desviación estándar de correspondencia de colores') de manera, por ejemplo, que una SDCM de un paso significa que no existen diferencias de color entre led, mientras que dos o tres pasos implican que apenas existe alguna diferencia visible de color (figura 9). Aun cuando en el mercado se acepta hasta una uniformidad de color de siete SDCM, se recomienda que el número de pasos de SDCM sea como máximo cinco, límite deseable de uniformidad de color [6].

Cabe destacar que $\Delta u'v'$ engloba también cambios en la temperatura de color correlacionada (desplazamiento sobre la curva de temperatura de color correlacionados) y D_{uv} , sin embargo, con cualquiera de estas dos últimas métricas se tendría una caracterización insuficiente de la diferencia de color.

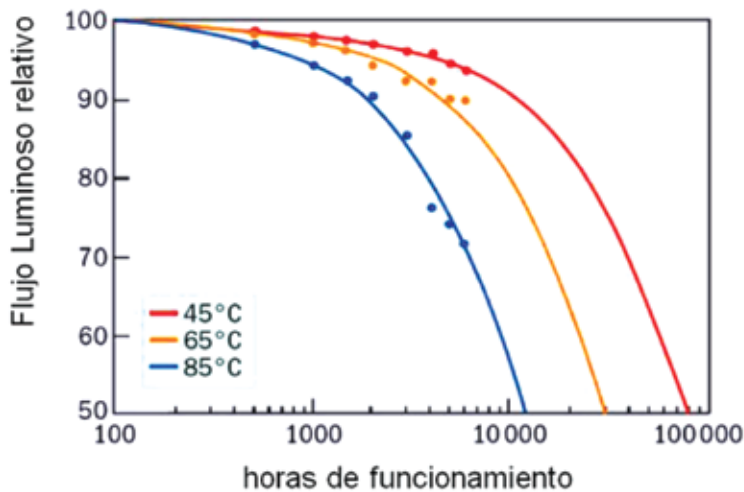


Figura 10. Flujo luminoso en función de la vida y de la temperatura de junta del led [15]

El índice de respuesta al color (IRC) y la temperatura de color correlacionado son parámetros que se emplean para caracterizar las propiedades de color de fuentes luminosas. Hasta ahora, se emplearon con lámparas de incandescencia, fluorescencia y descarga, pero es discutida su aplicación para la tecnología led. Su uso todavía se mantiene hasta tanto surjan nuevas normativas.



Figura 11. Ejemplos de distintos diseños de disipadores en luminarias led

Disipación del calor

Tanto la emisión de flujo (y por tanto la eficiencia), como la vida, dependen fuertemente de la disipación de calor generado por los leds. En la figura 10 se puede observar la dependencia del flujo emitido con la temperatura de junta de los leds o módulo de leds [15]. Si bien es importante trabajar con datos de vida y depreciación para la temperatura real de junta cuando los leds operan dentro de la luminaria, dicho dato también es difícil de obtener sin abrir la luminaria y afectar su comportamiento. La información de la luminaria, fotométrica y de vida a una temperatura ambiente de 25 grados centígrados sigue siendo el requerimiento de ensayo.

Dado que la disipación del calor es crítica para garantizar la calidad de la luminaria, es conveniente asegurar el buen diseño del disipador, y su mantenimiento autolimpiante libre de acumulación de hojas o cualquier elemento que reduzca la evacuación del calor (ver figura 11).

Factor de mantenimiento

Con la tecnología tradicional de lámparas de las descarga, para mantener las instalaciones por arriba de las condiciones mínimas de iluminación requeridas según normas había que compensar la depreciación con un factor de mantenimiento (MF, del inglés *maintenance factor*), indicado en la expresión (1), que englobaba: a) las fallas aleatorias debidas en su gran

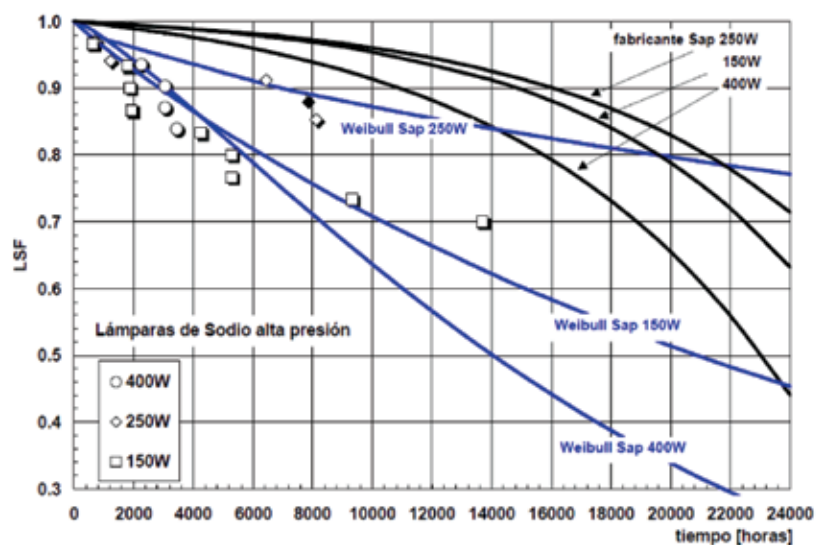


Figura 12. Datos de LSF de fabricantes y de registros sobre fallas de lámparas de sodio de alta presión [1]

mayoría a las lámparas (*LSF, Lamp Survival Factor*); b) la reducción de flujo de las lámparas (*LLMF, Lamp Lumen Maintenance Factor*); y c) la depreciación por ensuciamiento de las luminarias (*LMF, Luminaire Maintenance Factor*) [16].

$$(1) MF = LSF \cdot LLMF \cdot LMF$$

La iluminancia/luminancia en servicio sobre la calzada nunca debía caer por debajo de la mínima mantenida indicada en normas (E_{mm}/L_{mm}) [17] [18] para lo cual la iluminancia/luminancia inicial (E_i/L_i) de la instalación de iluminación se sobredimensionaba de acuerdo a la expresión (2).

$$(2) E_i = E_{mm} / MF$$

Además, ya en algunos países con normas sobre eficiencia energética, $E_i \leq 1,2 E_{mm}$ limitando así el factor de mantenimiento menor o igual a $1/1,2$ (0,83). La norma argentina [19] establece valores de iluminancia inicial e indica un factor de mantenimiento de 0,75 sin límite superior de iluminancia inicial. Como ventaja, establecer valores iniciales facilita el control de una obra nueva.

Las informaciones de LSF y de LLMF, obtenidas bajo condiciones de laboratorio, fueron siempre responsabilidad de los fabricantes de lámparas. Las condiciones reales de funcionamiento en la calle generalmente diferían de las de ensayo. En

figura 12, por ejemplo, se observan datos de LSF de lámparas de sodio de alta presión de un fabricante y datos obtenidos de registros históricos de fallas [1] donde se pueden observar diferencias importantes.

La depreciación por ensuciamiento de la luminaria la calculaba quien efectuaba el proyecto a partir de datos de la CIE 154 [16]. En la figura 13, se observan las curvas de depreciación de luminarias con cerramiento contra el ingreso de agua grado IP 6 en ambientes limpio (rural) medio (suburbano) y sucio (urbano-industrial). Se indican también estudios más recientes [20] con luminarias IP 65 en ambientes rurales E1/E2 y urbanos E3/E4 [21] para dos alturas de montaje, donde dada la mejora en la calidad de los cerramientos actuales y en particular la reducción de la contaminación ambiental (en Inglaterra donde se efectuaron estos estudios), la depreciación podría resultar ser un cincuenta por ciento (50%) menor y por lo tanto el factor de mantenimiento mayor que el resultante de CIE 154.

Con la tecnología led, la supervivencia de la luminaria podrá estimarse en base a la información de falla abrupta CZ de leds o módulos de leds; y cuando se dispongan de datos sobre luminarias, estos podrán reemplazarlos. Por otra parte, la depreciación de flujo luminoso se podría estimar también en base a LX BY, además de utilizar L80 B50 como criterio de calidad para especificar luminarias. En cuanto a la depreciación de la luminaria, podría esperarse que tuviera una respuesta similar a las luminarias convencionales [22]. Las formas exteriores podrían producir alguna discrepancia dado que existen luminarias con cierre plano y las hay con lentes expuestas con curvatura (ver figura 11).

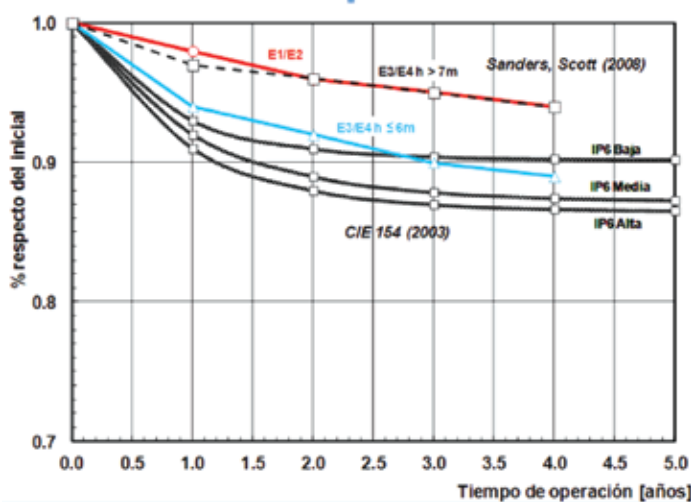


Figura 13. Depreciación de luminarias en función de la contaminación ambiental [23]

Políticas y operaciones de mantenimiento

Con la tecnología tradicional de lámparas de descarga de lámparas de sodio de alta presión ocurrían fallas aleatorias, en su gran mayoría debido a la lámpara, que se atendían con mantenimiento correctivo. Se detectaban por inspección y denuncia de vecinos y se debían reparar in situ durante la noche en plazos de 24 a 48 horas por lo que no afectaban al factor de mantenimiento. Salvo casos complicados, la luminaria no se retiraba del punto de luz. Como indicador de calidad, la tasa de fallas no debía superar el uno al tres por ciento (1 a 3%) dependiendo del estado de las instalaciones, grado de complejidad de zona y exigencia del municipio [2].

La depreciación de flujo luminoso se compensaba mediante reemplazos masivos programados de lámparas cada dos a cuatro años. La depreciación por ensuciamiento de luminarias se compensaba con limpiezas programadas masivas, simultáneamente con los reemplazos de lámparas y/o entre dichas

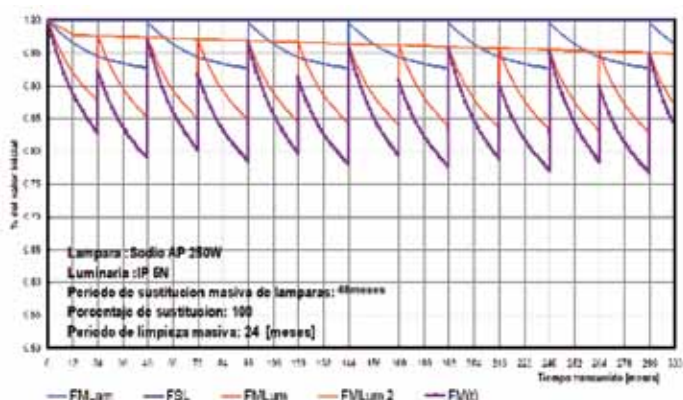


Figura 14. Depreciación con cambios masivos de lámpara cada 48 meses y limpiezas masivas cada 24 para luminarias IP 5 ambiente normal con sodio de alta presión 250 watts [1].

operaciones, es decir cada dos años generalmente. Estas operaciones de mantenimiento hacían que las luminarias vuelvan a comportarse como cuando eran nuevas salvo por una pequeña depreciación permanente (tres por ciento con IP 65) cuando se efectuaban, por ejemplo cambios de lámparas y limpieza simultanea (ver figura 14). Con tecnología led, las predicciones hasta ahora indicarían que el valor de Z por ciento sería muy bajo para ser considerado, con lo cual se propone para el diseño LSF igual a uno. Si así fuera el caso, el mantenimiento correctivo podría depender de la fiabilidad del driver y de otros componentes eléctricos más propensos a fallar. Las inspecciones nocturnas no serían necesarias ya o inclusive la telegestión para detectar fallas y reducir tiempos de mantenimiento sería cuestionable. Las operaciones de inspección nocturna y reparación in situ de averías por falla de luminarias podrían dar lugar a otro tipo de detección más económico y al reemplazo completo y reparación posterior en taller (si la tecnología todavía existiese). En caso de reparación en el taller, el cierre que garantizara una buena hermeticidad no requeriría de sistema de aperturas y cierres especiales como para que un operario lo pudiera efectuar ubicado en camión cesta en altura. Al menos el de la parte óptica que es más complicado.

La información de depreciación por reducción de flujo luminoso y por envejecimiento permanente estaría dentro de LX BY, la combinada con la depreciación por ensuciamiento permitiría establecer los periodos de mantenimiento. Como ejemplo (ver figura 15), para luminarias led IP 65 en ambiente urbano, con L70 B50 igual a 80.000 horas, 4.000 horas/año de servicio, para mantener un factor de mantenimiento de 0,8 de

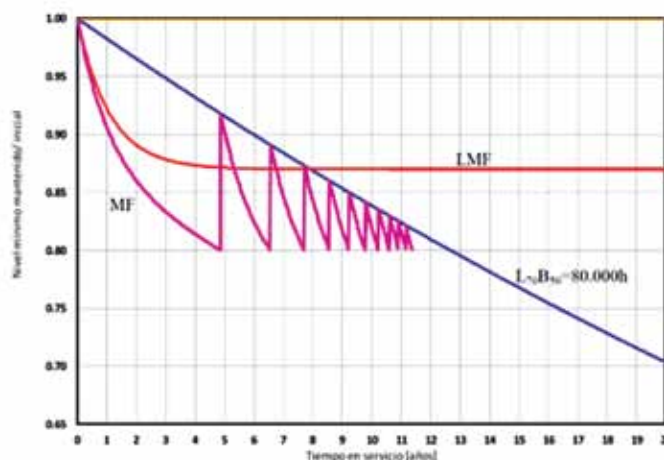


Figura 15. Estimación de operaciones de limpieza para factor de mantenimiento mayor o igual a 0,8 de luminaria led IP 65 en ambiente urbano con L70 B50 de 80.000 horas y 4.000 h/año de servicio [23].

diseño la primera limpieza debería efectuarse a los cinco años, luego al año y medio y posteriormente aproximadamente anual hasta los diez años a partir de cuando no se puede compensar con limpiezas. Más aún, limpiezas anuales hacen muy costoso el mantenimiento. Como ventaja, por tener un muy buen cierre de la parte óptica (IP mayor o igual a 65), no sería necesario abrir la luminaria para limpieza (ni para cambio de módulos al tener un Z% muy bajo, LSF muy alto) con lo cual el mantenimiento se facilita y los costos se reducen.

Conclusiones

Las luminarias con leds, debido a sus características intrínsecas, son diferentes a las luminarias con tecnología convencional de lámparas de descarga desde el punto de vista del mantenimiento. Indicadores relacionados a la vida y la depreciación luminosa, la eficiencia luminosa, la estabilidad del color de la luz, la disipación del calor, el factor de mantenimiento

y las operaciones de mantenimiento son discutidos. Dado que la antigüedad de las instalaciones no ha permitido tener datos suficientes para caracterizar estos parámetros, solo es posible estimar posibles resultados. ❖

Agradecimientos

Agradezco por el apoyo financiero para la realización de este trabajo a la Universidad Nacional de Tucumán, al proyecto PIUNT E523 y al CONICET.

Referencias

- [1] Manzano E. (2001). "Estudio de una metodología para la evaluación del alumbrado urbano. Tesis doctoral" en <http://www.tdcat.cesca.es/TDCat-0402101-074606/>, Barcelona, Universitat Politècnica de Catalunya, abril 2001
- [2] Manzano E., Deco F., Gagliardi I. (2007). "Considerations about quality management for urban lighting" en *Actas del 26 th Session of the CIE*, Commission Internationale de L'Éclairage, Beijing, julio 2007
- [3] Illuminating Engineering Society, *IES LM-80-08 (2008). Measuring lumen maintenance of LED light source*
- [4] IEC 62722-2-1 (2014). *Luminaire performance - Part 2-1: Particular requirements for LED luminaires*
- [5] Illuminating Engineering Society. TM-21-11 (2011). *Projecting Long Term Lumen Maintenance of LED Light Sources*
- [6] "Guía sobre tecnología LED en el alumbrado" (2015), en <https://www.fenercom.com/pdf/publicaciones/Guia-sobre-tecnologia-LED-en-el-alumbrado-fenercom-2015.pdf>
- [7] Zentralverband Elektrotechnik und Elektronikindustrie e.V. Lighting Division. (2013) *Guide to reliable planning with LED lighting*
- [8] Cooper J. (2007) "Driving LED lamps – some simple design guidelines" en <http://www.ledsmagazine.com/articles/print/volume-4/issue-8/features/driving-led-lamps-some-simple-design-guidelines.html>.
- [9] Manzano E. Manzano C. (2013) "Eficiencia y valoración económica de la luz blanca (LED, CMD, inducción, plasma) en iluminación urbana" en *Luminotecnica* 116 Marzo-Abril. Págs. 43-48, Buenos Aires, Editores SRL, 2013
- [10] Tapia Garzón J., Manzano E., Gao S., Rojas M., De Nobrega M. (2009), "Eficiencia energética en el alumbrado público" en *Energías Renovables y Medio Ambiente*, Vol. 23, págs. 35-39, Buenos Aires, 2009
- [11] Departamento de Energía de Estados Unidos (2014). "Solid-State Lighting Technology Fact Sheet. LED Color Stability" en http://apps1.eere.energy.gov/buildings/publications/pdfs/ssl/color-shift_fact-sheet.pdf.
- [12] IES (2014). "LED Color Stability Is Still a Question" en <http://www.ies.org/lda/HotTopics/LED/20.cfm>
- [13] MacAdam Ellipses (2016). https://en.wikipedia.org/wiki/MacAdam_ellipse.
- [14] Keeping S. (2015). "Hot Binning Improves LED Consistency at Higher Operating Temperatures" en <http://www.digikey.com/en/articles/techzone/2015/may/hot-binning-improves-led-consistency-at-higher-operating-temperatures>. Visitado 5-5-2015
- [15] Lee P. (2015). "Advancements in UV led curing technology and solutions for print" en http://www.excelitas.com/Downloads/UV_EB_Technology_Article.pdf. Visitado 20-9-2016
- [16] CIE 154 (2003). *The maintenance of outdoor lighting systems*. Commission Internationale de L'Éclairage
- [17] CEN EN 13201-2 (2003). *European Standard. Road lighting - Part 2: Performance requirements*
- [18] IESNA, (2005). *ANSI/IESNA RP-8-00 American National Standard Practice for Roadway Lighting*
- [19] IRAM (2009). *IRAM AADL J2022-2. Alumbrado público. Vías de tránsito. Clasificación y niveles de iluminación, Argentina*
- [20] Sanders A., Scott A. (2008). *Review of luminaire maintenance factors*. CCS Street lighting project SL3 2007
- [21] CIE 126 (1997). *Guidelines for minimizing sky glow*. Commission Internationale de L'Éclairage
- [22] Mockey Coureaux I.O., Manzano E. (2013). "The energy impact of luminaire depreciation on urban lighting" en *Energy for Sustainable Development*, Volumen 17, Issue 4, Elsevier, Agosto 2013, págs 357-362
- [23] Manzano E. (2016). "El mantenimiento y las luminarias led en iluminación urbana" en *Memorias del XIII Congreso Panamericano de Iluminación, La Serena, Chile, 23-25 Noviembre 2016*, Págs. 276-283.