



TRABAJO TEORICO EXPERIMENTAL

Tendencias en la consideración de la depreciación luminosa de las lámparas empleadas en alumbrado viario

Trends in the consideration of lighting depreciation of lamps used in road lighting

Israel Omar - Mockey Coureaux
Eduardo Roberto - Manzano

Recibido: Julio del 2012

Aprobado: Octubre del 2012

Resumen/ Abstract

La producción luminosa de las lámparas en alumbrado viario disminuye a un ritmo que depende del tipo de lámpara y balasto así como los parámetros de explotación. Esta causa de depreciación se considera desde la etapa de diseño a partir del factor de mantenimiento. El presente trabajo realiza una revisión de las diferentes fuentes de información disponible, a la vez que valora los resultados de las principales investigaciones que las han utilizado en los últimos tiempos. La información suministrada por los fabricantes de lámparas son la fuente más confiable. Los avances tecnológicos de las lámparas convencionales han permitido extender su vida útil e incrementar el mantenimiento del flujo luminoso lo cual potencialmente permite elevar la eficiencia energética de estos sistemas. Además de otras importantes ventajas los LEDs tienen un buen mantenimiento de su flujo luminoso. Se ofrecen los modelos matemáticos para la estimación de este tipo de depreciación.

Palabras clave: alumbrado viario, depreciación luminosa, flujo luminoso, lámpara, mantenimiento.

The luminous output of the lamps in road lighting decreases at a rate that depends on the type of lamp, the ballast system and operating parameters. This cause of depreciation is considered from the design stage from the maintenance factor, once established maintenance program. This paper reviews the different sources of information available, while valuing the outcomes of the major investigations that have been used in recent times. It recognizes the data provided by lamp manufacturers as the most reliable source. Technological advances introduced into the manufacturing process of these lamps in addition to extending its useful life also deliver higher lumen maintenance which potentially can increase the energy efficiency of these systems. In addition to other important advantages, LEDs has a good maintenance of their luminous flux The authors approach the trial elements and techniques for the use of curve fitting tool. Mathematical models to predict this depreciation rate are offered.

Key Words: flux, lamp, luminous depreciation, maintenance, road lighting.

INTRODUCCIÓN

Durante la vida de cualquier instalación de alumbrado, la luz disponible disminuye progresivamente y de forma gradual. La velocidad de la reducción está en función de las condiciones ambientales, las características de los dispositivos utilizados, las condiciones de operación y el tiempo de explotación.

En el caso de los sistemas de alumbrado viario esta depreciación se acentúa por estar más expuestas a la contaminación ambiental y la intemperie, así como por el tiempo de funcionamiento. En el diseño de estas instalaciones se debe tomar en cuenta esta reducción luminosa a través del uso del "Factor de mantenimiento", y el establecimiento de un programa de mantenimiento apropiado para limitar esta reducción.

Las principales causas que influyen en el deterioro de las características de las instalaciones de alumbrado viario, su funcionamiento y por tanto, algunas de ellas, en el valor de la iluminación y luminancia mantenida sobre la vía, según los Reportes Técnicos de la CIE (Commission Internationale de l'Eclairage) CIE 33-1996, [1] y CIE 154-2003, [2] son:

- A) Reducción progresiva del flujo luminoso emitido por las lámparas.
- B) Acumulación de suciedad sobre las lámparas.
- C) Envejecimiento de los componentes (reflectores, refractores, etc.)
- D) Acumulación de suciedad sobre las partes ópticas de las luminarias.
- E) Fallo prematuro de las fuentes.
- F) Las vibraciones del conjunto estructura-luminaria-lámpara.
- G) La corrosión de las estructuras de las unidades luminosas.
- H) Cambios de las propiedades reflectantes del pavimento.

Además existen otras causas, que no se producen de forma acumulativa:

- I) El uso de balastos.
- J) Excesivo incremento o disminución de la temperatura dentro de las luminarias.
- K) Falla prematura de los dispositivos auxiliares.
- L) Tensión incorrecta en los terminales de las luminarias.

De estas causas las que más influyen en la depreciación de la iluminación en la vía son las A, D y E y son a la vez las que se logran revertir a través de las acciones de mantenimiento de estos sistemas

Según [3], en emplazamientos uniformes de luminarias, como sucede en aplicaciones de alumbrado en interiores, el fallo aleatorio y prematuro de las lámparas puede afectar la iluminación media. Sin embargo, en el alumbrado de vías públicas, el fallo de una lámpara produce mucho más que la afectación de la iluminación media, produce toda una zona oscura lo cual provoca una reducción crucial de la calidad del sistema de alumbrado. Además, [4] plantea que cuando se establece como política de mantenimiento el reemplazo individual de lámparas falladas se minimiza el efecto del fallo prematuro de las lámparas.

Por su parte, [2] establece que para fines de los cálculos del diseño, solo sean considerados la depreciación del flujo luminoso de las lámparas y la depreciación de la luminaria por suciedad acumulada.

En su trabajo [5] recalcan el beneficio de trabajar con lámparas que posean mejor mantenimiento del flujo luminoso, con lo cual se podría utilizar mayores factores de mantenimiento durante el diseño de estas instalaciones y potencialmente lograr un incremento del espaciamiento entre unidades luminosas. Este mejoramiento tiene una implicación directa en el incremento de la eficiencia energética de estas instalaciones ya que se instalarían una menor cantidad de unidades luminosas en la vía y con ello se reduciría el consumo eléctrico de estos sistemas.

En el presente trabajo se realiza una reseña de las fuentes que brindan la información de la depreciación de las lámparas por envejecimiento y su empleo en investigaciones recientes en este campo. Contar con estos datos y utilizarlos adecuadamente permite diseñar los sistemas y establecer sus programas de mantenimiento con una mayor precisión lo cual tendría impacto en el desempeño energético de esos sistemas. Además se obtienen los modelos matemáticos del comportamiento de dicha depreciación para el caso de uno de los fabricantes líderes a nivel mundial.

MATERIALES Y MÉTODOS

Depreciación del flujo luminoso de las lámparas

La depreciación del flujo luminoso de la lámpara toma en cuenta la reducción progresiva y gradual del flujo luminoso de la lámpara por el deterioro y envejecimiento de los componentes que la forman, es inherente al tipo de lámpara y balasto utilizado y lo establece el fabricante, sobre la

base del desempeño de la lámpara desde que inicia su operación a través del tiempo a lo largo de su vida. Este efecto de depreciación se recupera con el reemplazo de las lámparas.

Las lámparas de descarga presentan una depreciación del flujo luminoso acentuado durante las primeras 100 horas de vida que puede llegar a ser del 10%. El flujo luminoso publicado por el fabricante es el valor medio después de esas primeras horas de encendido. A partir de dicho tiempo la disminución es mucho más gradual durante el resto de la vida de la lámpara, [6]. Es por ello que este factor se define como la relación entre el flujo luminoso de la lámpara al final de su vida respecto al flujo luminoso inicial, una vez transcurrido 100 horas de funcionamiento.

Causas

En las lámparas de descarga la depreciación se debe fundamentalmente al deterioro de los electrodos por la evaporación del material de emisión y la acumulación de este sobre las paredes o regiones inmediatamente adyacentes del tubo de descarga, con lo cual se produce un oscurecimiento gradual del tubo de descarga. A ello se suma la reducción en la transmitancia del tubo de descarga y/o del bulbo exterior. En lámparas provistas de un recubrimiento interior de polvo fluorescente, al oscurecerse el tubo de descarga el polvo fluorescente recibe menos radiación ultra violeta con lo cual es menor la producción de luz visible a lo cual se suma el deterioro propio del material fluorescente, [7]. En las lámparas de halogenuros metálicos se suma a estas causas el efecto del cambio en el balance químico por la reacción entre los aditivos metálicos y el material emisor de los electrodos [8]. En ellas el mantenimiento de los lúmenes mejora cuando la lámpara opera en largos períodos por arranques y para la posición de operación vertical (cerca de 5 % mayor que en la posición horizontal). Las lámparas de Vapor de Sodio de Alta Presión, por su parte, poseen una depreciación más gradual debido a la elevada temperatura de trabajo de la pared del tubo de arco, por poseer un menor diámetro y a la ausencia de polvos fluorescentes que con el tiempo se deterioran. En ellas cuando la lámpara comienza a apagarse y encenderse de forma cíclica indica que ha llegado al final de su vida, [9]. La principal causa de la depreciación de las lámparas LED (Acrónimo del Inglés Light Emitting Diode) es el calor generado en el interfaz de unión del LED. Al no emitir radiación infrarroja (IR), el calor producido en el proceso de generación de luz, debe ser disipado por conducción o convección. Un aumento continuo de la temperatura de funcionamiento provocará la depreciación del flujo emitido y una depreciación permanente del flujo máximo, según [10]. La influencia de esta depreciación en la frecuencia de sustitución de las lámparas debe ser considerada si se desean mantener ciertas condiciones mínimas de iluminación durante el transcurso de la vida útil de la instalación. En la etapa del proyecto de una instalación, además de considerar aspectos económicos de la misma, los costos de su gestión determinarán también las estrategias a seguir [11].

Datos disponibles

Una primera fuente para obtener los factores de depreciación de las lámparas son los manuales. El manual de la IESNA (Illuminating Engineering Society of North America), en su 10^{ma} edición, [8] ofrece como información la representada en la figura 1, para las lámparas de descarga de alta intensidad, específicamente para la potencia de 400 W. Como se puede observar solo se presentan los datos correspondientes a tres tipos de lámparas, en todos los casos de 400 W que suele ser una potencia inusual para el alumbrado viario, por lo que esta información apenas es útil para visualizar el mejor comportamiento de las lámparas de sodio de alta presión.

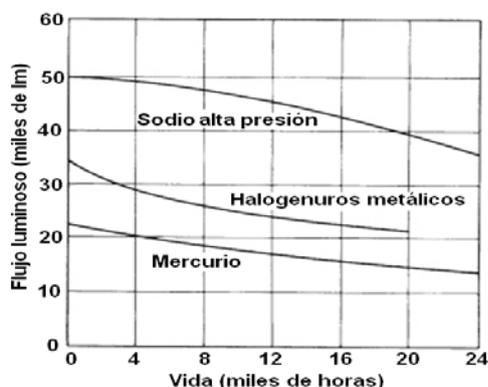


Fig. 1. Curvas típicas de depreciación de lámparas de descarga de alta intensidad de 400 W.

Los manuales de fabricantes líderes mundiales como Philips [6] y Holophane [12] aun cuando abordan los referentes teóricos de este aspecto no ofrecen ningún tipo de información que permitan determinar esta depreciación. De este análisis se puede resumir que en general es imprecisa o inexistente la información requerida para una estimación de la depreciación del flujo luminoso de las lámparas a partir de los manuales al alcance de la comunidad técnica de este campo. Al revisar los reportes técnicos referidos al tema de la CIE se encontraron las siguientes precisiones:

CIE 33-1996, [1], plantea que en la práctica existe gran incertidumbre de los datos en este campo por lo que se recomienda obtener estos datos directamente de los fabricantes y en lo posible corroborarlos con estudios de campo.

CIE 154-2003, [2] al referirse a la depreciación del flujo luminoso de las lámparas expresa: "la producción luminosa de la lámpara disminuye durante su uso. La tasa exacta, sin embargo, depende del tipo de lámpara y sistema de balasto". En la tabla 1, se muestran los datos típicos de esta depreciación aunque precisa que es importante actualizar los datos de los fabricantes particularmente para nuevos tipos de lámparas.

Tabla 1. Factores de depreciación del flujo de la lámpara.					
Tipo de lámpara	Tiempo de operación (horas)				
	4000	6000	8000	10 000	12 000
Sodio Alta Presión	0,98	0,97	0,94	0,91	0,90
Halogenuros metálicos	0,82	0,78	0,76	0,74	0,73
Mercurio	0,87	0,83	0,80	0,78	0,76
Sodio Baja Presión	0,98	0,96	0,93	0,90	0,87

Como se puede observar esta referencia ofrece un mismo comportamiento para cada tipo de lámpara sin discriminar diferencias por potencias.

De las investigaciones realizadas más recientes en este campo, se pueden referir las siguientes:

En su trabajo, [7] utiliza datos de lámparas del fabricante Philips de 1995. Precisa que los fabricantes de lámparas proveen datos de reducción de flujo luminoso para distintos tipos y potencias, obtenidos bajo condiciones de funcionamiento controladas, según el estándar IESNA LM-47-1995 [13], que se refieren a tensión de operación constante, ciclos de apagado y encendido fijos (11 hs encendido y 1 hora apagado), y posición de funcionamiento definida.

Cabe destacar que en la práctica las condiciones reales de operación pueden desviarse de las de ensayo, alterando las características de funcionamiento por ejemplo a mayor tensión que la nominal las lámparas producen en general mayor flujo luminoso y a mayores ciclos de encendido, menor duración. En los comportamientos de la figura 2, se muestra el efecto del envejecimiento o reducción del flujo luminoso de las lámparas de descarga utilizadas por [7] a partir de los datos provistos por Philips en 1995.

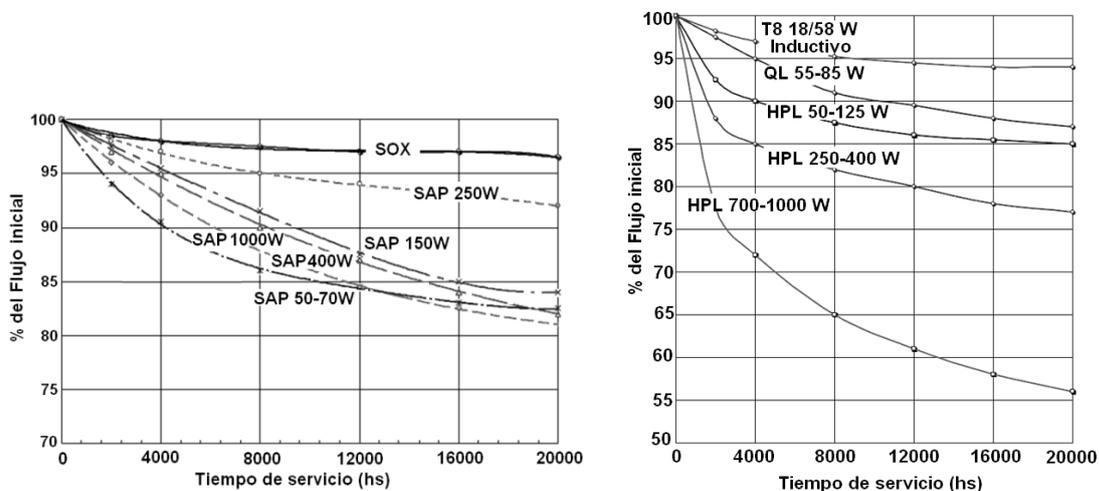


Fig. 2. Depreciación del flujo luminoso para lámparas de descarga.

En lámparas de sodio, el efecto de la depreciación en el flujo es menor a medida que aumenta la potencia, tendencia que se manifiesta hasta 250 W para las de alta presión; valor a partir del cual aumenta. Se evidencia un mejor comportamiento de las lámparas de sodio baja presión (SOX). En contraste, para las lámparas de mercurio (HPL) el efecto de la depreciación del flujo aumenta con la potencia. En general, estas presentan una depreciación mayor a las de sodio.

Por su parte [3], en su trabajo, aunque hace referencia a los valores de depreciación definidos por [2], utiliza para los diferentes escenarios analizados los valores de las hojas de datos suministrados por los fabricantes Philips y Osram sin hacer referencia a la fecha de dichos datos.

A partir de los criterios expuestos y tomando especial consideración a las recomendaciones de [2-3; 5; 7] resulta más conveniente trabajar con los datos suministrados por los fabricantes de las lámparas.

Para los LEDs es escasa la información disponible sobre el mantenimiento de su flujo luminoso y los fabricantes no publican esta información. Un comportamiento obtenido por ensayos en las primeras 6000 h y extrapolados hasta las 36000 horas es publicado por [10].

Ajuste de curvas

A menudo en la práctica se quiere resolver problemas que incluyen conjuntos de variables cuando se sabe que existen algunas relaciones inherentes entre ellas. Por ejemplo, se conoce que la depreciación de la iluminación en las vías públicas está relacionada con el tiempo entre acciones de mantenimiento (t). En ocasiones resulta de interés desarrollar un método de predicción o análisis de tendencia. Los análisis de tendencia se pueden usar para predecir o pronosticar valores de la variable dependiente. Por ejemplo, en el caso mencionado anteriormente se podría estimar el Factor de mantenimiento del flujo de la lámpara, LLMF (Acrónimo del inglés, Lamp Lumen Maintenance Factor) para diferentes valores de la variable independiente "tiempo" para el establecimiento de programas de mantenimiento.

En ocasiones se cuenta con las curvas de dichos comportamientos pero es de interés del investigador obtener las ecuaciones matemáticas que lo rigen a través de técnicas de "Ajuste de curvas". El aspecto estadístico del problema se convierte entonces en lograr la mejor estimación de la relación entre las variables, [14].

El ajuste de curvas a través de regresión es un proceso mediante el cual, dado un conjunto de n pares de puntos (x_i, y_i) , se determina una función matemática $f(x)$ de tal manera que la suma de los cuadrados de la diferencia (ε) entre la imagen real (y_i) y la correspondiente obtenida mediante la función ajustada, $f(x_i)$ en cada punto sea mínima (Método de los Mínimos Cuadrados).

$$\varepsilon = \text{mín} \left[\sum_i^n (y_i - f(x_i))^2 \right] \quad (1)$$

Siempre será preferible escoger un tipo de regresión cuya curva funcional tenga un comportamiento acorde con el fenómeno físico en estudio. El flujo luminoso que entregan las lámparas parte de un valor nominal máximo al inicio de su uso y a partir de dicho momento va disminuyendo de forma progresiva a un ritmo mayor en los primeros tiempos y luego va siendo más gradual con una tendencia asintótica cuando la lámpara alcanza su vida útil para la mayoría de los casos. Por ello las curvas de depreciación poseen la peculiaridad de partir de un valor en las ordenadas igual a 1 y tienen un comportamiento exponencial decreciente pero con rasgos asintóticos hacia un cierto valor mayor que 0.

En la tabla 2, se precisan las características de algunos modelos exponenciales. En ella se evidencia la versatilidad de modelos exponenciales existentes y donde cada uno de ellos tendría un uso específico. Sin embargo, el modelo exponencial decreciente básico, según las características descritas por [15], no se adapta a las particularidades de los datos de las curvas de depreciación luminosa.

Nota: A, B y C son los coeficientes resultantes del ajuste de curva

Tabla 2. Particularidades de varios modelos exponenciales decrecientes.		
Nº	Forma funcional	Características
1	$Y = A \cdot e^{-B \cdot t}$	Es la función exponencial decreciente básica. Siempre presenta características asintóticas hacia $Y = 0$. Resulta difícil establecer una familia de curvas con diferentes ritmos de decrecimiento que partan de un mismo valor de $Y = 1$. Resulta difícil ajustar los ritmos de decrecimiento manteniendo constante el valor de Y para $t = 0$.
2	$Y = A \cdot e^{-B \cdot t} + C$	Se logra ajustar un comportamiento asintótico hacia el valor de C . Resulta fácil ajustar para $t=0$ un valor de $Y = 1$ a partir de la combinación de $(A+C)$ para ciertos valores de B .
3	$Y = A + (B - A) \cdot e^{-C \cdot t}$	Se logra ajustar un comportamiento asintótico hacia el valor de A . Resulta fácil ajustar para $t = 0$ un valor de $Y = 1$ cuando $B = 1$.
4	$Y = A \cdot e^{\left(\frac{(t-B)^2}{C}\right)}$	Resulta fácil ajustar los ritmos de decrecimiento manteniendo constante el valor de Y para $t = 0$. Para valores de $t > B$ el comportamiento se convierte en exponencial creciente.
5	$Y = A \cdot e^{\left(\frac{(\ln t + B)^2}{C}\right)}$	Es fácil ajustar el ritmo de decrecimiento manteniendo constante el valor de Y para $t = 0$. Se logra reducir el comportamiento asintótico. El modelo solo está definido para $t > 0$.

La elección del modelo obtenido por regresión siempre partirá de una suposición, en la cual el conocimiento acerca del sistema analizado y la experiencia del investigador ayudarán de forma significativa. Se recomienda comenzar siempre con graficar los datos para poder evaluar su comportamiento y características, [16].

Cuando el objetivo es obtener el modelo matemático de una curva conocida este paso está implícito en los análisis previos pues ya se cuenta con dicha representación. Desde el punto de vista analítico un criterio de gran peso para evaluar la calidad del modelo seleccionado es el coeficiente de determinación R^2 , según [14]. El coeficiente R^2 viene dado por la relación entre la varianza de los datos estimados con el modelo y la varianza de los datos. Para el caso de evaluación de la correlación en el proceso de ajuste de curva, según [17] se determina según la siguiente ecuación:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - f(x_i))^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - y_{med})^2} \quad (2)$$

Donde n es el número total de datos, y_i los datos considerados, y_{med} es el valor medio de los n datos y $f(x_i)$ los valores estimados

El coeficiente de determinación R^2 es adimensional y toma valores entre 0 y 1. Expresa el porcentaje de la varianza de la variable dependiente que es explicado por el modelo propuesto. Brinda una idea de la bondad del ajuste, de manera que valores cercanos a 1 indican que la curva está cercana a los datos y el ajuste es bueno mientras que para valores cercanos a cero revela inexistencia de relación entre x y y con el modelo ajustado y que no se recomienda hacer pronósticos sobre su base. Cuando se comparan modelos que están anidados, es decir una serie de modelos donde uno de ellos adiciona un coeficiente respecto a un modelo previo, resulta preferible utilizar como indicador el coeficiente de determinación ajustado, R^2_{ajust} . Este indicador parte del factor R^2 definido arriba y lo ajusta sobre la base de los grados de libertad residuales. El grado de libertad residual (v) es definido como el número de respuestas (n) menos el número de los coeficientes ajustados a partir de los datos (m):

$$v = n - m \quad (3)$$

Donde ν indica el número de piezas de información independientes que involucran los n datos que se requieren para calcular la suma de cuadrados. Los grados de libertad se incrementan con el número de datos considerados.

$$R_{ajust}^2 = 1 - \frac{(n-1) \cdot \sum_{i=1}^n (y_i - f(x_i))^2}{(n-m) \cdot \sum_{i=1}^n (y_i - y_{med})^2} \quad (4)$$

Por tanto el coeficiente R^2 ajustado (R_{ajust}^2) es en general el mejor indicador de la calidad del ajuste, [18]. Este indicador también puede tomar valores entre 0 y 1. Existe una gran diversidad de herramientas computacionales para el ajuste de curva, los cuales determinan los valores de los coeficientes para los modelos matemáticos escogidos o definidos por el usuario y además brindan los elementos de juicio para seleccionar el mejor ajuste. Entre ellos se pueden mencionar los software: Curvefit, CurvExpert, Statgraphic y el Matlab el cual posee un Toolbox dedicado exclusivamente para estos fines.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Modelos matemáticos

En su trabajo [7] utiliza modelos publicados por Marsden (1993) [19] a partir de una función exponencial modificada del tipo $LLMF(t) = A + (1 - A) \cdot e^{-Ct}$ donde el coeficiente $C > 0$. En la tabla 3, se indican los parámetros de ajuste de estas curvas brindados por esta referencia, especificando en cada caso el coeficiente de determinación ajustado R_{ajust}^2 . En la figura 3, se muestran el comportamiento de la depreciación obtenida a partir del ajuste publicado por [19].

Al comparar el comportamientos de la depreciación de las lámparas Philips en 1995 mostrados en la figura 2, según [7], con los logrados al utilizar la función exponencial de Marsden que se representan en la figura 3, se pueden hacer las siguientes observaciones:

- En todos los casos la curva ajustada posee un perfil similar a la de los valores reales.
- En todos los modelos analizados existen diferencias notables de los valores correspondientes a un mismo tiempo, las cuales se hacen más acentuadas a medida que aumenta el tiempo. Como promedio las diferencias entre los valores reales y ajustados son de 0,060, llegando a ser hasta 0,176.
- En todos los casos los valores estimados por [19] son superiores a los valores suministrados por el fabricante Philips y utilizados por [7], por lo que cualquier análisis realizado sobre esa base tendría un carácter pesimista y no resultaría apropiado.

Tabla 3. Parámetros de ajuste de la depreciación del flujo de las lámparas según [20] para t en años.			
Lámpara	A	C	R_{ajust}^2
Sodio AP 50–70 W	0,83	0,22	0,9067
Sodio AP 150 W	0,80	0,078	0,9809
Sodio AP 250 W	0,91	0,10	0,9655
Sodio AP 400 W	0,78	0,079	0,9871
Sodio AP 1000 W	0,78	0,10	0,9619
Mercurio 50-125 W	0,85	0,28	0,8622
Mercurio 250-400 W	0,76	0,21	0,8552
Mercurio 700-1000 W	0,56	0,27	0,8842

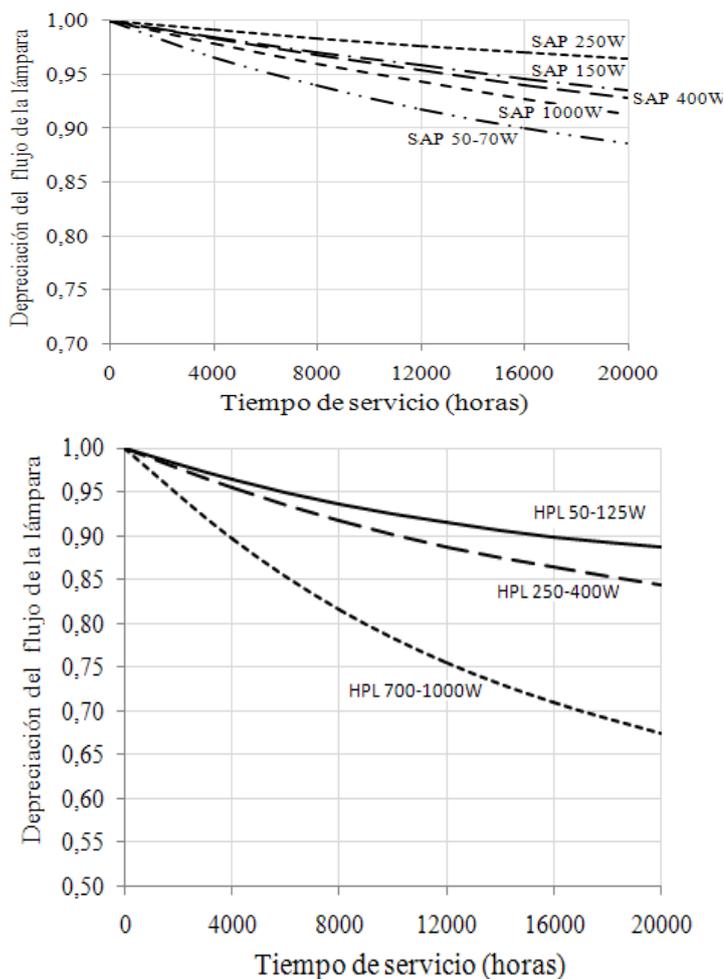


Fig. 3. Depreciación de las lámparas de sodio alta presión y mercurio según ajuste de [19].

Los resultados del trabajo de [5] demuestran, a través de la simulación de diferentes programas de mantenimiento, que variaciones del factor de mantenimiento de 0,05 pueden llegar a significar hasta casi un 10% de influencia sobre los costos por consumo de electricidad. Ello demuestra la gran sensibilidad que tiene la estimación del factor de depreciación en la eficiencia energética de las instalaciones de alumbrado público, por lo que los resultados obtenidos del ajuste realizado por Marsden (1993) no garantizarían una adecuada aproximación.

En la tabla 4, se presentan los resultados del ajuste de curva de los datos de depreciación de las lámparas producidas por PHILIPS más utilizadas en el alumbrado de las vías públicas según el catálogo 2011-2012 y de los LEDs (Light Emitting Diode), de acuerdo a la información de [20] a [26]. En las figuras 4 y 5, se muestran tanto el comportamiento de los datos ofrecidos por el fabricante de las lámparas como los valores ajustados.

Tabla 4. Resultados del mejor modelo de ajuste, considerando t en años.					
Lámpara	Modelo	Coeficientes			R ² _{ajust}
		A	B	C	
SON ¹ 150-400 W	$LLMF = A + (B - A) \cdot e^{-C \cdot t}$	0,2402	1,0000	0,0293	0,998
Master SON PIA Plus ² 150/250 W	$LLMF = A \cdot e^{-B \cdot t} + C$	0,0834	0,2222	0,9134	0,986
SON ¹ 50/70 W	$LLMF = A \cdot e^{\left(\frac{(\ln t + B)^2}{C}\right)}$	1,0065	7,6446	378,9407	0,999
Master SON PIA Plus ² 50/70 W		1,0030	7,9167	570,8792	0,999
SON Confort ³ 150/250 W		1,0368	5,5698	365,8044	0,987
SOX ⁴		1,0053	6,6355	1246,2597	0,999
HPL-N ⁵		1,0535	6,4272	148,5795	0,999
Master Cosmo White ⁶ 90/140 W		1,0703	5,5654	195,3276	0,997
Master CityWhite ⁷ 100/250 W		$LLMF = A + (B - A) \cdot e^{-C \cdot t}$	0,7665	1,0000	0,3690
LED ⁸		0,959	1,0000	1,5340	0,966
LED ⁹	$LLMF = A \cdot e^{-B \cdot t} + C$	0,6151	0,035152	0,3769	0,994

Notas:¹ Lámpara de Sodio Alta Presión estándar, Tc 2000 K, IRC ≤ 25, según [20]

² Lámpara de Sodio Alta Presión, Tc 2000 K, IRC ≤ 25, con tiempo de vida mejorado, según [21]

³ Lámpara de Sodio Alta Presión, Tc 2150K, IRC = 65, con temperatura de color e Índice de reproducción cromática mejorada, según [22]

⁴ Lámpara de Sodio Baja Presión, según [23]

⁵ Lámpara de Vapor de Mercurio estándar, según [24]

⁶ Lámpara de Halogenuros metálicos cerámicas con eficiencia mejorada y tamaño compacto, según [25]

⁷ Lámpara de Halogenuros metálicos cerámicas, según [26]

⁸ Lámparas LED, datos de ensayos hasta 6 000 h según [13]

⁹ Lámparas LED, comportamiento estimado hasta 36 000 h según [13]

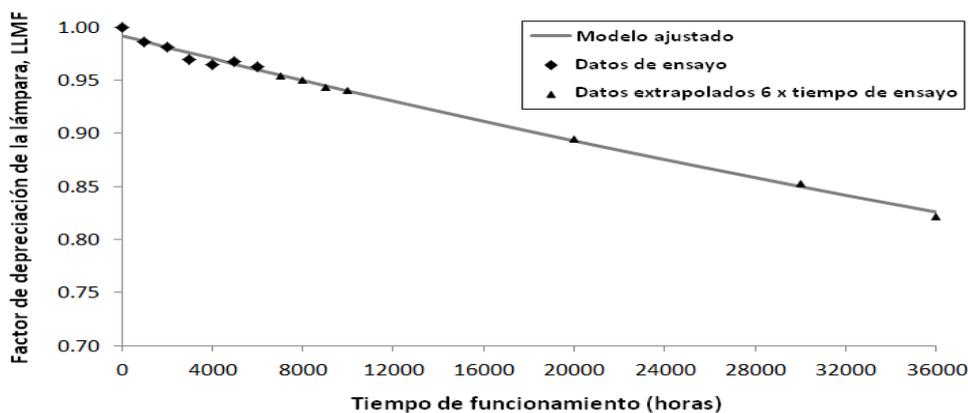


Fig. 4. Comportamiento de la depreciación del flujo luminoso de las lámparas LEDs y la curva ajustada

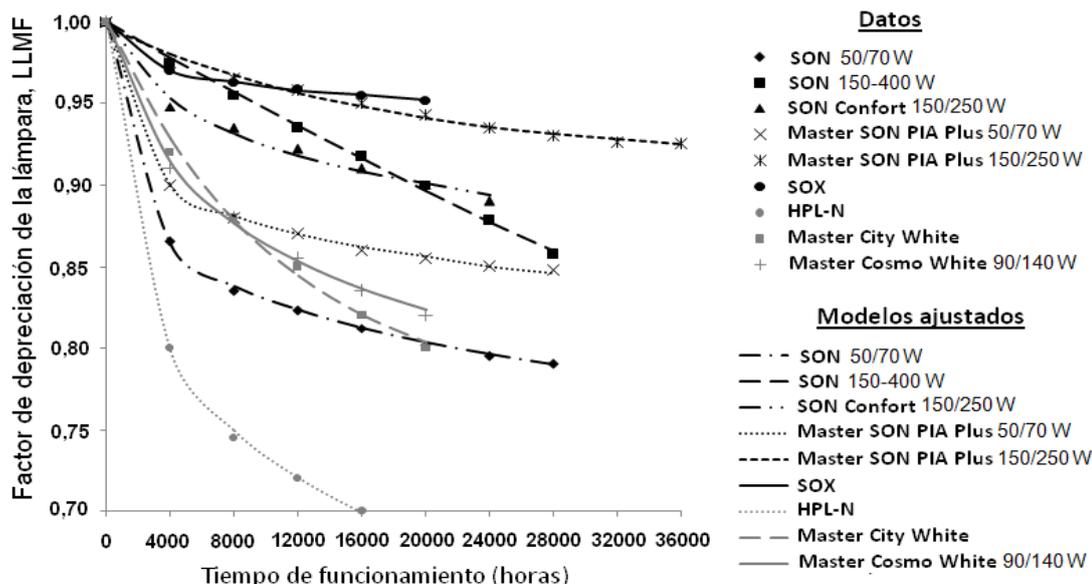


Fig. 5. Comportamiento de los datos y las curvas ajustadas de la depreciación del flujo luminoso de las lámparas HID

De estos resultados se pueden corroborar la calidad del ajuste logrado para las lámparas HID y LEDs, no solo a partir de los valores de R^2_{ajust} sino además a través de la representación gráfica de dichos resultados. Como se puede observar en 6 de los 11 tipos de lámparas analizadas el modelo que presenta un mejor ajuste es el modelo 5 de la tabla 2 por lo que en general se prefiere éste para representar la depreciación del flujo luminoso de las lámparas, aunque se recomienda tomar el modelo ajustado específico para cada caso.

CONCLUSIONES

De todo este análisis se puede arribar a las siguientes conclusiones:

1. Son los fabricantes de lámparas los que ofrecen un comportamiento más preciso del mantenimiento del flujo luminoso, llegando a detallar el comportamiento por potencias.
2. Para el establecimiento de programas de mantenimiento se recomienda tener en cuenta los datos ofrecidos por los fabricantes de las lámparas, sin embargo es preciso considerar que se pueden obtener desviaciones en dichos comportamientos a partir de la variación de las condiciones de explotación respecto a las garantizadas durante los ensayos de laboratorios.
3. Las lámparas de sodio son las que tienen un mejor desempeño en cuanto a su depreciación luminosa. Los avances tecnológicos introducidos recientemente, a la vez que han incrementado la eficiencia y duración de las lámparas de sodio de alta presión, han reducido su depreciación hasta lograr un desempeño similar a las de baja presión.
4. Los modelos propuestos para la estimación de la depreciación de las lámparas evaluadas presentan elevada calidad evidenciado en el valor de R^2_{ajust} alcanzado.
5. De los modelos matemáticos analizados el que generalmente mejor representa la depreciación del flujo de las lámparas es el modelo 5.
6. Se evidencia que los LEDs suman a otras importantes ventajas un buen mantenimiento de su flujo luminoso, solo superado por el momento por las lámparas tradicionales de mejor desempeño.

REFERENCIAS

1. CIE. *Depreciation of installations and their maintenance*. Reporte Técnico CIE 33. Viena. Austria. 1996. ISBN: 3 900 734 64 X.
2. CIE. *The maintenance of outdoor Lighting Systems*. Reporte Técnico CIE 154. Viena. Austria. 2003. ISBN 3 901 906 24 X
3. SVEINSDOTTIR, A. ,“Street Lighting Design- and Maintenance Procedures. Analysis of the Maintenance Factor and Simulation of Maintenance Policies”. Department of Mechanical and Industrial Engineering, TR: IEMG674. Northeastern University. Islandia, Apr. 2007. 51 p.
4. MANZANO, E; SAN MARTÍN R., “Procedure for continue urban lighting management evaluation”. En: Actas de la Sesión 24 de la CIE, (Warsaw, Poland 1999). p. 169-180.
5. SANDERS, A.; SCOTT, A., “Review of luminaire maintenance factors”. Transport for London Road Network Development, TR: SL3. London, Dec. 2008. 90 p.
6. *Manual de Iluminación Philips*. Primera edición en español (Traducción de la 5ta edición). Buenos Aires: Philips, 1997. 467p. ISBN: 950-9050-49-0.
7. MANZANO, E., “Estudio de una metodología para evaluar la calidad del servicio del alumbrado urbano”. Director: Ramón San Martín. Tesis de doctorado. Universidad Politécnica de Catalunya. Barcelona. 2000.
8. *IES Lighting Handbook*. DiLaura David. (edit.). 10th Edition. New York: Illuminating Engineering Society of North America, 2011. 1354 p. ISBN: 9780879952419.
9. MOCKEY COUREAUX, I. O. Iluminación Artificial [CD ROM]. 1era Edición. Eustorgio Millán. Ciudad de La Habana: Cubaenergía, 2006. ISBN: 959-7136-40-6.
10. CAVALLER, F; *et al.*, “Cómo seleccionar y comparar luminarias LED’s para aplicaciones de alumbrado exterior”. Asociación Española de Fabricantes de Iluminación, TR: Comunicación 12 de ANFALUM. Madrid, Jan 2010. 16 p.
11. SAN MARTÍN, R; MANZANO, E., “Gestión y explotación de instalaciones: aspectos a considerar en la elaboración de proyectos”. En: Actas del XIII Congreso Nacional de Ingeniería de Proyectos, (Sevilla, España, 1997). p. 245-258.
12. GUTIÉRREZ SANTOS, F., “Manual de iluminación Holophane”. Ciudad México: Holophone, 1999. 273 p.
13. IESNA. *Approved method for life testing of high intensity discharge (HID) lamps*. IES LM-47. New York, EEUU. 1995.
14. FREUND, J; *et al.*, “Probabilidad y estadística para ingenieros”. Cuarta edición. Ciudad de La Habana: Félix Varela, 2006. Tomo 2, p.326-385.
15. ROMO, M. ,“Técnicas optimizadas de ajuste de curvas independientes y curvas integradas”. En: Actas del II Congreso Ciencia y Tecnología (Ecuador. 2007). p. 324-335.
16. WELTNER, K., “Mathematics for physicists and engineers”. Berlin: Springer, 2009. 581 p. ISBN 978-3-642-00172-7.
17. WALPOLE, R; *et al.*, “Probabilidad y estadística para ingenieros”. Félix Varela. Sexta edición. Ciudad de La Habana: Félix Varela, 2008. Tomo 2, p.358-445.
18. BOX, G; *et al.*, “Estadística para investigadores. Introducción al diseño de experimentos, análisis de datos y construcción de modelos”. Barcelona: Reverté S.A., 1999. 675 p. ISBN: 968-6708-40-5.
19. MARSDEN, A. ,“The economics of lighting maintenance” *Lighting Research & Technology*, 1993, vol 25, núm. 3, p. 105-112. ISSN: 1477-1535.
20. PHILIPS LIGHTING, “High pressure sodium lamp standard datasheet”. 2011-2012, [Consulta 12 de enero de 2012]. Disponible en:
http://download.p4c.philips.com/l4bt/3/323174/son_323174_ffs_aen.pdf
21. PHILIPS LIGHTING, “High pressure sodium lamp improved lifetime datasheet”. 2011-2012, [Consulta 12 de enero de 2012]. Disponible en:
http://download.p4c.philips.com/l4bt/3/323237/master_son-t_pia_plus_323237_ffs_aen.pdf
22. PHILIPS LIGHTING, “High pressure sodium lamp improved color temperature and Color rendering Index datasheet”. 2011-2012, [Consulta 12 de enero de 2012]. Disponible en:
http://download.p4c.philips.com/l4bt/3/323113/son_comfort_323113_ffs_aen.pdf
23. PHILIPS LIGHTING, “Low pressure sodium lamp datasheet”. 2011-2012, [Consulta 12 de enero de 2012]. Disponible en:
http://download.p4c.philips.com/l4bt/3/323103/sox_323103_ffs_aen.pdf

24. PHILIPS LIGHTING, "Mercury lamp datasheet". 2011-2012, [Consulta 12 de enero de 2012]. Disponible en: http://download.p4c.philips.com/l4bt/3/323184/hpl-n_323184_ffs_aen.pdf
25. PHILIPS LIGHTING, "Ceramic metal halide lamp, improved efficiency and compact size datasheet". 2011-2012, [Consulta 12 de enero de 2012]. Disponible en: http://download.p4c.philips.com/l4bt/3/322871/master_cosmowhite_cp-tw_322871_ffs_aen.pdf
26. PHILIPS LIGHTING, "Ceramic metal halide lamp datasheet". 2011-2012, [Consulta 12 de enero de 2012]. Disponible en: http://download.p4c.philips.com/l4bt/3/323051/master_citywhite_cdo-tt_323051_ffs_aen.pdf

AUTORES

Israel Omar Mockey Coureaux

Ingeniero Electricista, Máster en Ingeniería Eléctrica, Profesor Auxiliar, Facultad de Ingeniería Eléctrica. Universidad de Oriente. Santiago de Cuba, Cuba.
e-mail: iomc@fie.uo.edu.cu

Eduardo Roberto Manzano

Ingeniero Electricista, Doctor en Ciencias Técnicas, Profesor Titular, Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología. Universidad Nacional de Tucumán, Argentina.
e-mail: emanzano@herrera.unt.edu.ar