



Diseño de una metodología de evaluación técnico-económica de nuevas tecnologías para la iluminación de espacios exteriores de uso peatonal

Design of a technical-economical evaluation methodology of new lighting technologies for outdoor spaces of pedestrian use

Gerardo Antonio Cardozo Méndez¹, Luis Antonio Noguera Vega²

Fecha de recepción: 18 de febrero de 2015

Fecha de aceptación: 18 de agosto de 2015

Cardozo Méndez, G. A., & Noguera Vega, L. N. (2015). Diseño de una metodología de evaluación técnico-económica de nuevas tecnologías para la iluminación de espacios exteriores de uso peatonal. *Revista Tecnura*, 19, 25-40. doi: 10.14483/udistrital.jour.tecnura.2015.SE1.a02

Resumen

Este documento presenta una metodología propuesta de comparación técnico-económica entre luminarias de montaje horizontal para alumbrado público en las tecnologías de vapor de sodio de alta presión (VSAP) y de estado sólido (LED) empleadas en instalaciones de uso peatonal. En primer lugar, se formula un procedimiento propuesto para determinar la equivalencia entre luminarias de ambas tecnologías, y seleccionar luminarias de tecnología LED como remplazo de luminarias de VSAP. Después, se presenta un caso de estudio en el que se aplica este procedimiento a un escenario real que corresponde a un parque público con áreas de recreación pasiva y circulación exclusiva de peatones. La utilidad del procedimiento se valida mediante cálculos fotométricos realizados con información de luminarias disponibles en el mercado local. Finalmente, se desarrolla un análisis económico del eventual remplazo de las luminarias existentes en el escenario del caso de estudio por luminarias LED seleccionadas a partir del procedimiento propuesto en la primera parte

Palabras clave: Iluminación LED, alumbrado público, evaluación económica, eficiencia energética.

Abstract

This document presents a proposed methodology of technical-economical comparison between streetlight luminaires of horizontal mounting type in High Pressure Sodium (HPS) and Solid State (LED) technologies used in pedestrian lighting systems. First, a proposed procedure to determine equivalence between luminaires of both technologies, and choose LED technology luminaires as replacement of HPS luminaires is formulated. Then, a case study is presented in which the proposed procedure is applied to a real scenario, such as a public park with passive recreation spaces and exclusive pedestrian use. The usefulness of the procedure is validated by means of photometric calculations performed with information of luminaires available in the local lighting market. Finally, an economic analysis of the possible replacement of the existing HPS luminaires in the case study scenario for LED luminaires chosen by means of the initially proposed method is carried out.

Keywords: LED street lighting, economical assessment, energy efficiency.

¹ Ingeniero Eléctrico, especialista en Iluminación Pública y Privada. Bogotá, Colombia. Contacto: gcardozo88@yahoo.com

² Ingeniero en Distribución y Redes Eléctricas, especialista en informática y Automática Industrial. Docente de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Bogotá, Colombia. Contacto: lanoguera@udistrital.edu.co

INTRODUCCIÓN

La incursión de la tecnología de estado sólido en el mercado de la iluminación general en los últimos años ha generado grandes expectativas en cuanto al uso eficiente de la energía, la calidad de la luz y el costo de operación de las instalaciones.

Algunos fabricantes y múltiples investigaciones sostienen que la implementación generalizada de sistemas de alumbrado público con luz blanca de tecnología LED (de CCT cálidas) como remplazo de los sistemas actuales de sodio de alta presión causarían un impacto positivo en la apariencia de los centros urbanos, el desempeño visual de los peatones y la percepción de seguridad.

La prolongada vida útil de las fuentes de tecnología LED, así como su menor consumo de energía permiten una reducción significativa del costo global de operación de los sistemas de alumbrado público, en comparación con los sistemas convencionales de sodio de alta presión, que requieren labores de mantenimiento más intensivas en el remplazo de fuentes y accesorios deteriorados.

La primera dificultad que se encuentra al buscar luminarias LED que funcionen como remplazo o equivalentes a las existentes en tecnología de VSAP radica en las diferencias existentes entre ambas tecnologías en cuanto a su forma constructiva e indicadores de desempeño. La forma constructiva de las luminarias de descarga se caracteriza por la separación entre fuente (bombilla) y luminaria; cada luminaria tiene sus parámetros propios de desempeño, tanto eléctricos como fotométricos. Por el contrario, en las luminarias LED tal separación no existe, ambos componentes están integrados de manera que constituyen un solo elemento y es a este único elemento al que se le deben analizar todas las variables eléctricas y fotométricas.

El segundo obstáculo para la implementación de la tecnología LED en los sistemas de alumbrado público es el alto costo de inversión que significa ejecutar el remplazo de luminarias de una instalación existente o la construcción de una instalación nueva. No obstante, el uso de herramientas

de análisis económico que contemplen el tiempo de vida de la instalación permite identificar si este tipo de inversiones son económicamente atractivas.

Con este documento se espera que, a partir de la integración de ambos factores, el técnico y el económico, en una misma metodología de análisis, se facilite la toma de decisiones a la hora de considerar la implementación de la tecnología LED en la aplicación particular de la iluminación de espacios públicos exteriores de uso peatonal o en situaciones similares.

DISEÑO Y DESARROLLO DE LA METODOLOGÍA

A partir de la aplicación de esta metodología se seleccionan dos luminarias de diferente fabricante en tecnología LED como candidatas a remplazo de las luminarias de VSAP existentes, y mediante análisis económico se determinará si la inversión en alguna de estas dos opciones es atractiva para implementar un remplazo de luminarias en espacios similares al analizado en un caso de estudio.

Caracterización del caso de estudio

En la ciudad de Bogotá se utilizan de manera generalizada luminarias del tipo horizontal, instaladas en postes de concreto en alturas de 8,4 m y 10,2 m para la iluminación de los parques vecinales, principalmente por motivos de seguridad de la infraestructura y facilidad de integración de las redes de alumbrado con las redes aéreas de distribución local en baja tensión. Por esta razón el aspecto y forma constructiva del sistema de iluminación para estos espacios públicos es más utilitario (orientado a satisfacer la necesidad de iluminación) que estético, lo cual limita el uso de faroles o luminarias decorativas a baja altura.

En la Figura 1 se presenta un plano esquemático con la ubicación de los puntos luminosos tanto del parque como de las zonas aledañas, mientras que en la Figura 2 se aprecian fotografías de las

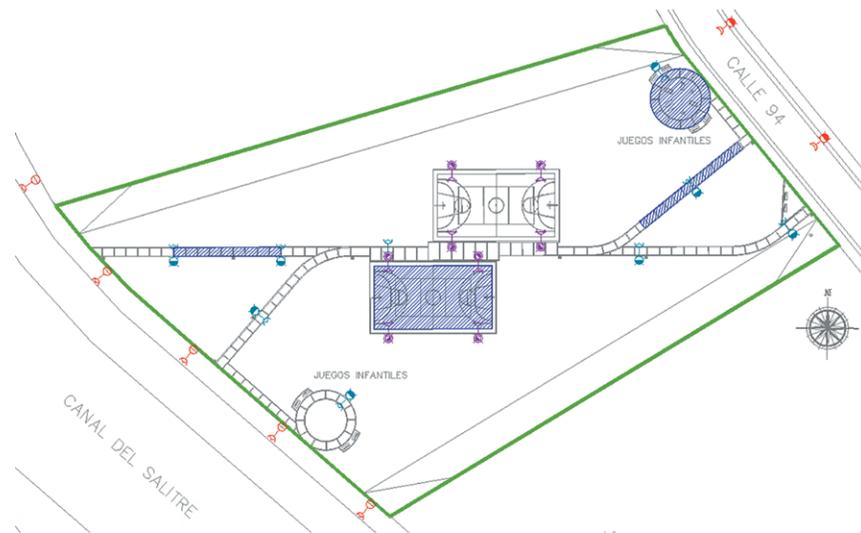


Figura 1. Plano esquemático del parque seleccionado como caso de estudio, en donde se localizan los puntos de luz existentes.

Fuente: elaboración propia.



Figura 2. Luminarias. Izquierda: luminaria de 150 W. Derecha: luminaria de 250 W.

Fuente: elaboración propia.

luminarias instaladas, tomadas por el autor durante la recopilación de información para la caracterización del parque.

Mediciones de iluminancia en la instalación existente

Para conocer el estado de la instalación existente se registraron cuatro mediciones de iluminancia en las grillas indicadas con sombreados de color azul en la Figura 1. Dos de ellas son para senderos peatonales, la tercera para una de las canchas múltiples y la cuarta para la isla de juegos infantiles

localizada en el costado nororiental del parque. En las grillas de los senderos se tomaron once puntos de medida en sentido longitudinal y tres puntos en sentido transversal, según lo recomendado en la sección 540.2.2 del *Reglamento Técnico de Iluminación y Alumbrado Público (en adelante, RETI-LAP)* (Ministerio de Minas y Energía, 2010). En la cancha múltiple se tomaron once puntos en sentido longitudinal y cinco puntos en sentido transversal, mientras en la isla de juegos infantiles, que son de forma circular, se tomaron tres puntos en forma radial y ocho puntos en sentido perimetral. Las

mediciones se llevaron a cabo con un luxómetro de marca EXTECH, referencia 407026, en el modo de medición "S=Sodio" y en la escala de medición de 0 a 2.000 lx.

Los resultados de las cuatro mediciones se muestran en la Tabla 1, expresados en términos de la iluminancia promedio y del factor de uniformidad U_0 . Asimismo, se muestran los valores mínimos de referencia que exige el RETILAP para espacios de este tipo, en su tabla 510.3 b (Ministerio de Minas y Energía, 2010). A partir de la Tabla 1 se puede advertir que la grilla 4 está por fuera de los parámetros mínimos exigidos por el RETILAP al no cumplir con el valor de uniformidad general U_0 .

Procedimiento propuesto de selección de luminarias led como remplazo de luminarias de vsap

El procedimiento propuesto para seleccionar una luminaria LED como remplazo de otra de VSAP se describe en la Figura 3. Al final de la descripción se presenta un diagrama de flujo que resume el procedimiento propuesto.

Paso 1. Obtención de los datos fotométricos de la luminaria de VSAP

Para este primer paso se requiere contar con el reporte de laboratorio en que se haya registrado la matriz de intensidades de la luminaria. En su defecto, se podrá utilizar la matriz de intensidades en un formato digital, como el .ies, o cualquier otro

formato normalizado similar, de modo que se pueda conocer la información fotométrica de la luminaria al importar la matriz digital en un visor de este tipo de archivos o en un software de cálculo de iluminación. Para el desarrollo de este trabajo se utilizaron el software *Litestar 4D Photoview* en su versión de uso libre y la herramienta en línea de uso libre *Visual Photometric Tool*.

De la matriz de intensidades es necesario obtener los siguientes datos puntuales:

- Eficiencia de la luminaria
- Flujo luminoso de la bombilla
- Diagrama polar de la luminaria
- Curvas de coeficiente de utilización

Siendo la eficiencia de la luminaria la relación entre el flujo total emitido por esta y el flujo de la bombilla.

Paso 2. Análisis de los documentos fotométricos de la luminaria de VSAP

Mediante herramientas informáticas como las mencionadas en el paso 1 se pueden obtener el diagrama polar de la luminaria de VSAP y/o su sólido fotométrico, con el propósito de identificar características distintivas como el ángulo de apertura del haz de luz en los ejes 0° - 180° y 90° - 270° (referidos al sistema de coordenadas C- γ) y el ángulo C de mayor intensidad lumínica. Igualmente se puede determinar el flujo luminoso de la luminaria, que está dado como el producto entre el flujo nominal de la bombilla y la eficiencia de la

Tabla 1. Comparación entre valores medidos y valores mínimos requeridos por el RETILAP.

Grilla	Descripción del área	Valores medidos		Valores de referencia (RETILAP)		Diferencia porcentual	
		Eprom [lux]	U_0	Eprom [lux]	U_0	Eprom [%]	U_0 [%]
1	Sendero peatonal 1	24,1	0,37	15	0,33	+60,7	+12,1
2	Sendero peatonal 2	23,8	0,38	15	0,33	+58,7	+15,2
3	Cancha múltiple	68,7	0,61	50	0,40	+37,4	+52,5
4	Juegos infantiles	16,8	0,24	15	0,33	+12,0	-27,3

Fuente: los autores.

luminaria. Este dato se emplea como punto de partida para identificar el flujo luminoso aproximado que deberá tener la luminaria LED equivalente.

Paso 3. Definición de los parámetros deseados en la luminaria LED equivalente

A partir del análisis de los documentos fotométricos de la luminaria de VSAP se puede elaborar un listado de parámetros fotométricos que se desea encontrar en la luminaria LED para que brinde un desempeño equivalente o superior al de la luminaria de VSAP. En este contexto, un conjunto de parámetros deseados puede ser el que se lista a continuación:

- Flujo luminoso
- Plano C y ángulo γ de máxima intensidad
- Relación entre coeficientes de utilización K1 y K2 para la altura de montaje dada
- Temperatura del color
- Índice de reproducción del color

La temperatura del color deberá definirse conforme al tipo de espacio que se va a iluminar, e igualmente se debe definir la temperatura de color entre cálida y neutra, con un índice de reproducción del color entre medio ($IRC > 60$) y alto ($IRC > 80$).

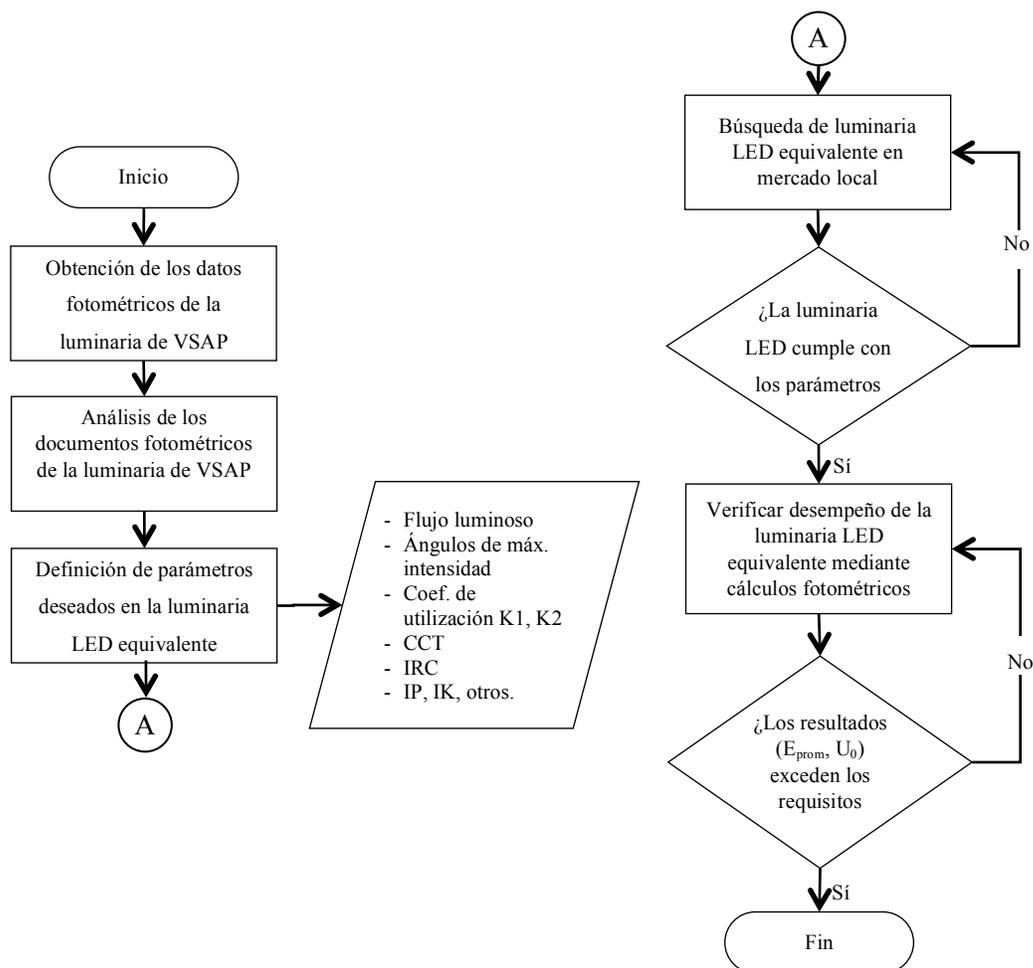


Figura 3. Diagrama de flujo que ilustra la metodología propuesta de selección de luminarias de tecnología LED como remplazo de luminarias de VSAP.

Fuente: elaboración propia.

Paso 4. Búsqueda y selección de la luminaria LED equivalente

Teniendo en cuenta los parámetros deseados que se listaron en el punto anterior, se deberá buscar, para una línea de luminarias determinada, cuál es el modelo que puede suplir las necesidades planteadas por estos parámetros deseados. Como existe la posibilidad de que varios modelos puedan suplir estas necesidades, se deberá pensar en qué característica es más importante para la instalación, una alta eficiencia (mayor cantidad de LEDs, mayor costo inicial) o un costo inicial más bajo (menor cantidad de LEDs, menor eficiencia).

Paso 5. Verificación del desempeño de la luminaria LED equivalente mediante cálculos fotométricos

Después de seleccionar una o más luminarias LED candidatas al remplazo se deberá validar su elección mediante la elaboración de cálculos fotométricos en un software adecuado para ello. Según los resultados obtenidos en los cálculos se podrá evaluar si es necesario modificar parámetros de la luminaria LED seleccionada, como su flujo luminoso o distribución fotométrica.

CÁLCULO DEL FACTOR DE MANTENIMIENTO EMPLEADO EN LOS CÁLCULOS FOTOMÉTRICOS

Un parámetro determinante dentro de la realización de cálculos fotométricos en un diseño de iluminación es el factor de mantenimiento, pues permite estimar el descenso en los niveles de iluminación debido a la contaminación ambiental y a la depreciación del flujo luminoso, propia de todas las fuentes de luz artificiales, entre otros factores.

En el ámbito de la reglamentación local, en (Ministerio de Minas y Energía, 2010) se establece: “La periodicidad de la limpieza del conjunto óptico de la luminaria y del cambio de las bombillas debe ser tal que garanticen que la instalación de alumbrado público no va a estar funcionando con

valores de iluminancia promedio por debajo de los mínimos mantenidos”.

De aquí se destaca la importancia de calcular el factor de mantenimiento aplicado a los cálculos fotométricos de tal manera que se satisfaga esta condición. La fórmula empleada para calcular el factor de mantenimiento es la que se muestra en la ecuación (1).

$$FM = DFL \times FE \quad (1)$$

Donde DFL corresponde a la depreciación del flujo luminoso de la luminaria y FE corresponde al factor de ensuciamiento producido por la contaminación del ambiente. Según (Comisión de Regulación de Energía y Gas, 2011), se establece que el período de vida de una instalación de alumbrado público es de 30 años; entendida esta como el período de vida del componente más durable del sistema. Allí se establece también que el período de vida máximo para las luminarias es de 15 años en zonas con niveles de contaminación normales. Por tanto, para efectos de los análisis económicos y de vida esperada de las luminarias LED que se hacen en este documento, se partirá del supuesto de que la carcasa, vidrio de cierre y demás componentes mecánicos de la luminaria pueden sobrevivir al tiempo estimado de vida de la instalación de 30 años sin necesidad de remplazo.

Con relación a la fuente luminosa (módulo LED), los dos fabricantes analizados en el caso de estudio ofrecen una vida útil (L70) de hasta 100.000 horas, con una tasa de uso de 12 horas/día (equivalentes a 22,83 años). Esto significa que un solo módulo LED no alcanza a cubrir la duración del período de vida estimado de la instalación y, por tanto, durante el transcurso de esos 30 años deberá remplazarse al menos una vez el módulo LED de cada luminaria.

Según (Ministerio de Minas y Energía, 2010) el factor de ensuciamiento FE para parques como el caracterizado en el caso de estudio, corresponde a un valor de 0,95 para luminarias con el conjunto óptico completamente sellado, como es el caso de

las luminarias LED analizadas, y para un período de limpieza externa de la luminaria de 36 meses. De este modo el descenso máximo que se experimentaría en los niveles de iluminación del parque sería el que arroja el cálculo del FM a partir de los factores DFL y FE determinados anteriormente.

$$FM = 0,80 \times 0,95 = 0,76$$

A partir de lo expuesto, el factor de mantenimiento utilizado en los cálculos fotométricos es 0,76. En la Figura 4 se presenta una gráfica del comportamiento de los tres factores, DFL, FE y FM; la curva de este último representa la variación temporal que tendrían los niveles de iluminación en el parque a lo largo de los 30 años de vida de la instalación.

Procedimiento empleado en la comparación económica

Dentro de este análisis se tienen en cuenta los costos iniciales o de inversión del proyecto de remplazo, así como los costos de operación proyectados a futuro, que se dividen en costos de mantenimiento y costo de la energía consumida por la instalación.

Durante el paso 5 del procedimiento de selección se pretende recopilar información técnica y fotométrica de las luminarias LED candidatas para remplazo de la instalación existente, aunque también se requiere obtener de los fabricantes información comercial, principalmente en lo referente al precio de las luminarias y sus accesorios individuales, vida útil estimada, probabilidad de fallos en el tiempo, periodicidad de mantenimiento recomendada, entre otros.

Para plasmar la comparación económica se diseñó una hoja de cálculo que se compone de cuatro secciones; en la primera sección se recopila la información básica del proyecto, en la segunda se calculan los costos anualizados de instalación y consumo de energía, en la tercera se calculan los costos anualizados de operación y mantenimiento, mientras en la cuarta se presenta un resumen de resultados. Para dicha comparación se emplearon indicadores de evaluación como el retorno simple de la inversión (RSI), el valor presente neto (VPN), la tasa interna de retorno (TIR), costo anual de equivalente (CAO) y el costo total de propiedad (CTP) para cada opción de inversión y con ayuda de la información encontrada en (Universidad Nacional de Colombia, 2014).

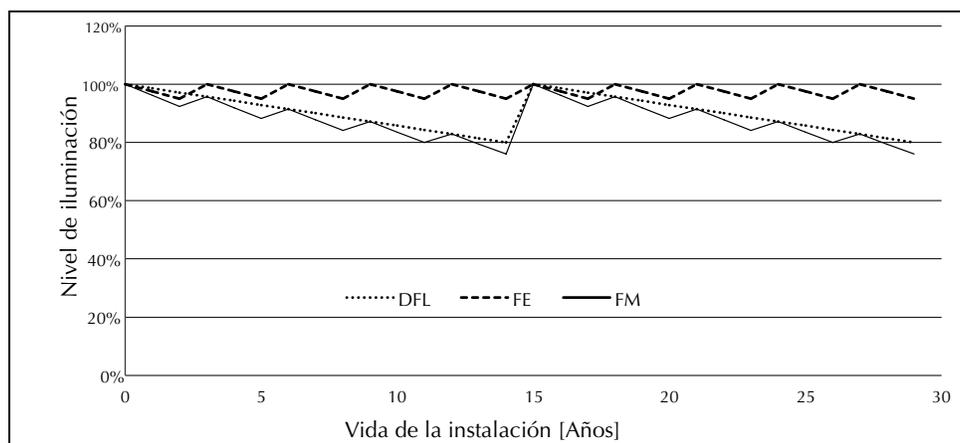


Figura 4. Nivel de iluminación relativo esperado a lo largo del tiempo de vida de la instalación, de acuerdo con los factores DFL y FE determinados previamente.

Fuente: elaboración propia.

Formulario de comparación económica

El formulario de comparación económica se describe en cuatro secciones:

Sección 1. Datos básicos del proyecto: En esta sección del formulario se ingresan los parámetros básicos del proyecto: precio del kilovatio-hora y su tasa de incremento anual, impuesto a las ventas aplicado a la adquisición de equipos nuevos, costo de la mano de obra empleada en las labores de instalación y mantenimiento, y la tasa de descuento empleada en la proyección del valor de la instalación a futuro.

Según (Unidad de Planeación Minero Energética, 2014), el valor promedio del kWh suministrado al mes de julio de 2014 para el sector oficial por el operador de red encargado de abastecer a la ciudad de Bogotá es de 338 \$/kWh, y su tasa de variación anual promedio, basada en información semestral de los últimos 10 años, es de 6%. El valor del impuesto a las ventas aplicado a la adquisición de equipos nuevos de este tipo es de 16%.

Los costos de mano de obra y equipo empleados en el mantenimiento e instalación se manejan en forma distinta para las dos tecnologías, puesto que los sistemas de alumbrado público basados en la tecnología de VSAP ya cuentan en Colombia con una metodología reglamentada para establecer los costos máximos por concepto de administración, operación y mantenimiento (AOM). Según esta metodología descrita en (Comisión de Regulación de Energía y Gas, 2011), el valor anual máximo que debe pagar un distrito o municipio a su operador de servicio de alumbrado público por concepto de AOM de cada activo perteneciente al sistema de alumbrado público corresponde a una tasa de 10,3% del costo de reposición a nuevo del activo.

Para calcular los costos de mano de obra y equipo necesarios para la instalación y mantenimiento de luminarias sobre infraestructura existente (redes eléctricas y postes), se estimó que una cuadrilla típica para labores de mantenimiento de alumbrado público tiene un costo aproximado de 60.000,00 \$/hora. Con relación a la tasa de descuento para el cálculo de valor presente neto de los flujos de caja

dados por cada opción de inversión, se empleó la tasa de 13,9% establecida en (Comisión de Regulación de Energía y Gas, 2011) para el cálculo de costos máximos de administración, operación y mantenimiento en el servicio de alumbrado público en Colombia.

Sección 2. Costos anualizados de operación y mantenimiento: Se calculan los costos de operación y mantenimiento de las dos alternativas en tecnología LED, dada la imposibilidad de aplicar el esquema existente en (Comisión de Regulación de Energía y Gas, 2011) para estimar estos costos en sistemas de alumbrado público con luminarias de VSAP.

Para determinar estos costos se involucran los datos de vida útil, costo unitario y duración de la labor de remplazo para cada uno de los accesorios susceptibles de sustitución a lo largo de la vida de las luminarias LED, a saber: módulo LED, driver y fotocontrol. A partir de estos datos se calcularon una tasa de remplazo anual y un costo anual estimado por el remplazo de cada repuesto.

Sección 3. Costos anualizados de instalación, energía y mantenimiento: Se consolidan los costos de operación y mantenimiento encontrados en la sección anterior, junto con los de instalación y demanda de energía. Para contabilizar los costos de instalación se utilizaron los precios de adquisición de las luminarias en ambas tecnologías y el tiempo promedio de instalación, datos obtenidos de los fabricantes. El costo de la energía se calculó a partir de los consumos globales (fuente + elementos auxiliares) de las luminarias reportados en sus fichas técnicas y asumiendo una tasa de uso de 12 horas al día, es decir, 4.380 horas al año.

Sección 4. Resumen de resultados: Se presentan los diagramas de flujo de caja anual y acumulados construidos para las dos opciones de remplazo con tecnología LED, así como el resultado de los indicadores de comparación económica para cada opción. Se muestra una representación gráfica del costo total de propiedad de cada opción, en el que se puede identificar la preponderancia de cada tipo de costo sobre el total.

RESULTADOS DE APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA

Para aplicar la metodología se seleccionó como caso de estudio un parque vecinal situado en la calle 92 con carrera 80 de la ciudad de Bogotá. Se escogió este espacio porque tiene las características requeridas planteadas en los objetivos de la investigación. El parque cuenta con tres tipos de zonas, senderos peatonales, dos canchas múltiples y dos islas de juegos infantiles. Su área total limita por el oriente y occidente con bloques de edificios residenciales, por el norte con la calle 92 –una vía local que puede asumirse de clase M5 por su función como acceso a edificios residenciales de la zona-, y por el sur con una alameda peatonal. El sistema de iluminación del parque está compuesto por diecisiete (17) luminarias, distribuidas en nueve (9) luminarias de VSAP de 150 W y ocho (8) luminarias de VSAP de 250 W.

Selección de luminarias LED como remplazo de luminarias de VSAP

Aquí se muestra el resultado de la aplicación del método de selección de luminarias LED como remplazo de luminarias de VSAP descrito en la

segunda parte de la metodología. A continuación se describe el desarrollo de cada paso de la metodología, así como sus resultados.

Paso 1. Obtención de las variables fotométricas de las luminarias de VSAP encontradas en la instalación existente

En la Figura 5 y la Figura 6 se muestran los diagramas polares y curvas de coeficiente de utilización de las dos luminarias instaladas en el sitio, correspondientes a las posiciones de bombilla que el fabricante recomienda para este tipo de aplicaciones. En los diagramas se indican las curvas polares 0°-180°, 90°-270° y la curva de máxima intensidad.

Paso 2. Análisis de los documentos fotométricos de las luminarias de VSAP

En la Figura 5 y la Figura 6 se indican para los dos tipos de luminarias el flujo luminoso de la fuente y la eficiencia de la luminaria. Estos datos permiten determinar el flujo neto de cada luminaria, que es de 12.514 lúmenes para la luminaria de 150 W y de 27.977 lúmenes para la luminaria de 250 W. Estos valores de flujo luminoso se tendrán como primer objetivo durante la selección de las luminarias equivalentes en tecnología LED.

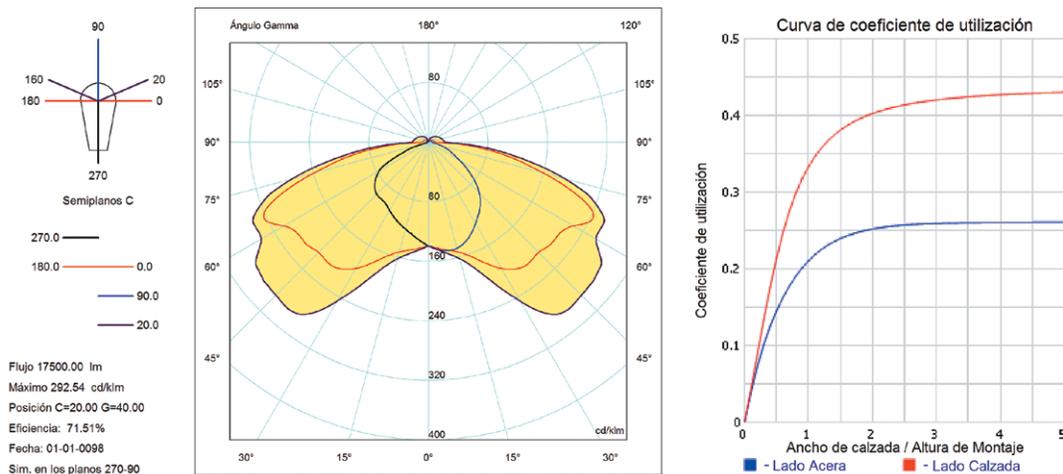


Figura 5. Diagrama polar y curvas de coeficiente de utilización de luminaria de VSAP de 150 W.

Fuente: Software Litestar 4D PhotoView en su versión de uso libre y de la herramienta en línea de uso libre Visual Photometric Tool™.

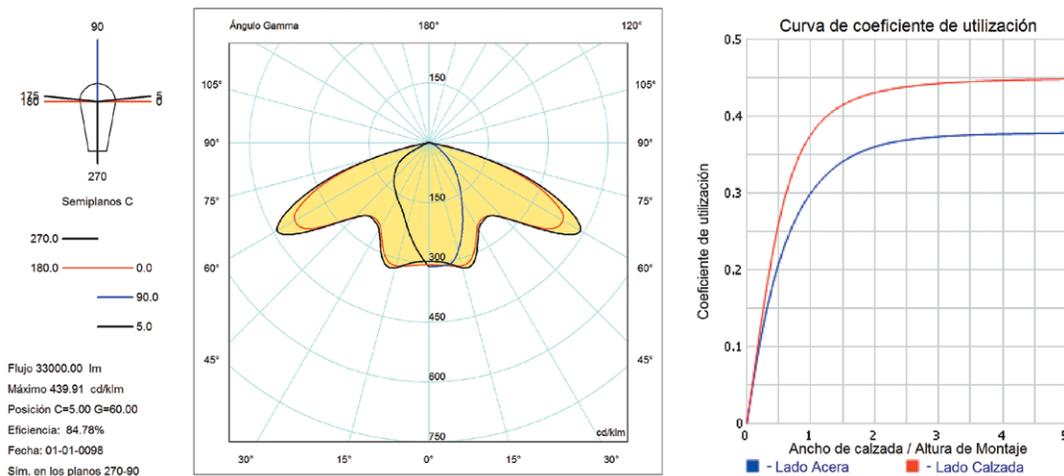


Figura 6. Diagrama polar y curvas de coeficiente de utilización de luminaria de VSAP de 250 W.

Fuente: Software Litestar 4D PhotoView en su versión de uso libre y de la herramienta en línea de uso libre Visual Photometric Tool™.

Como se pudo observar en la figura 6 los valores de iluminancia promedio provistos por la instalación existente exceden con gran diferencia los valores mínimos requeridos por la reglamentación aplicable.

La luminaria de 150 W se emplea para dos aplicaciones diferentes: una es la iluminación de senderos peatonales, que son franjas lineales de 2,4 m de ancho; la otra es la iluminación de islas de juegos infantiles, que son áreas circulares con un diámetro mayor que la altura de montaje de las luminarias y para las cuales se está utilizando una sola luminaria localizada en el perímetro del área que se va a iluminar. Por lo anterior, es recomendable utilizar dos distribuciones fotométricas distintas, una para cada aplicación. La primera para los senderos, con máxima intensidad cercana al eje de simetría $C0^{\circ}$ - 180° , y otra para las islas de juegos, con máxima intensidad proyectada hacia delante de la luminaria, situada en torno a los planos $C45^{\circ}$ - 135° . Con esto se pretende maximizar la eficiencia del haz de luz proyectado por las luminarias según la forma de las áreas por iluminar.

La luminaria de 250 W se utiliza para iluminar las canchas múltiples, que cuentan cada una con cuatro luminarias dispuestas en los dos lados largos del rectángulo, como se mostró en el plano esquemático de la Figura 1. En este caso, como cada

luminaria ilumina un cuadrante del rectángulo es deseable que el haz de luz de la luminaria esté moderadamente proyectado hacia adelante y hacia los lados, con la intensidad máxima ubicada en torno a los planos $C25^{\circ}$ - 165° , aproximadamente.

En cuanto a los ángulos γ de máxima intensidad, es recomendable en este tipo de aplicaciones conservar ángulos inferiores a 65° para evitar el exceso de luz dirigida a zonas que no son de interés, tales como zonas verdes y fachadas de edificaciones vecinas. Puesto que la altura libre de los postes es relativamente grande (8,4 y 10,2 m) para el tipo de uso del espacio, se descarta que haya problemas por deslumbramiento a los usuarios del parque.

En los tres casos descritos es deseable que la relación entre coeficientes de utilización $K1/K2$ esté en un rango de 1,5 a 2,5, favoreciendo una mayor emisión de luz de las luminarias hacia adelante, conservando un poco de emisión de luz hacia atrás, suficiente para iluminar parcialmente el entorno verde de las zonas duras. Aunque las zonas verdes no tienen un requisito específico de iluminación, es conveniente que cuenten con algo de iluminación para brindar un contexto a las áreas de interés y minimizar los posibles riesgos que plantean las zonas no iluminadas.

Paso 3. Definición de los parámetros deseados de las luminarias LED equivalentes

De acuerdo con la información obtenida en los pasos anteriores, se define un tipo de luminaria LED para cada uno de los tres tipos de área analizados en el caso de estudio (senderos, juegos infantiles, canchas múltiples), y que funcionarán como remplazo de las luminarias existentes en tecnología de VSAP. Al mismo tiempo se define un conjunto de parámetros deseados para cada tipo de luminaria, los cuales se muestran en la Tabla 2. Allí se observa que el flujo luminoso y la eficacia luminosa deseados corresponden inicialmente a los de las luminarias existentes (en VSAP), aunque se espera que este valor pueda ser menor en el primer caso y mayor en el segundo, dada la mayor utilización del flujo luminoso que permitirá la cuidadosa selección de la distribución fotométrica.

Al mismo tiempo se fijaron las características cromáticas en una CCT en el rango de 3.700 K a 4.300 K, con un IRC superior a 70.

Además de los parámetros fotométricos de los pasos 2 y 3, se incluyeron también en la Tabla 2 algunos atributos típicos de las luminarias para alumbrado público que se emplean en la ciudad de Bogotá, como el rango de tensión de alimentación, índices de protección contra ingreso de partículas y agua (IP), índice de protección contra impactos mecánicos (IK) y color de la luminaria.

Paso 4. Búsqueda y selección de las luminarias LED equivalentes

A partir de los parámetros deseados consignados en la Tabla 2, se buscaron dentro del mercado local al menos dos opciones de remplazo de diferente fabricante para los tres tipos de aplicación encontrados en el escenario seleccionado como caso de estudio. En la Figura 7 y Figura 8 se presentan los diagramas polares y curvas de coeficiente de utilización de las luminarias LED seleccionadas como posibles remplazos provenientes de los fabricantes 'A' y 'B', respectivamente.

Tabla 2. Cuadro de parámetros deseados para los tres tipos de luminarias LED de remplazo en el caso de estudio.

Parámetro	Und	Luminaria 1	Luminaria 2	Luminaria 3
Uso	-	Senderos peatonales	Islas de Juegos	Canchas Múltiples
Flujo luminoso	lm	<12500	<12500	<28000
Eficacia luminosa	lm/W	>100	>100	>100
Corriente de alimentación de los LED	mA	<700	<700	<700
Vida útil	h	>100.000		
CCT ¹	K	4000 ± 300	4000 ± 300	4000 ± 300
IRC ²	-	>70	>70	>70
Plano C de máx. intensidad	°	5-175	45-135	25-165
Relación coef. K1/K2	-	1,5-2,5	1,5-2,5	1,5-2,5
Control de encendido	-	Fotocelda	Fotocelda	Fotocelda
Tensión de alimentación	V	120-277	120-277	120-277
IP ³	-	>65	>65	>65
IK ⁴	-	>09	>09	>09
Color de la luminaria	-	Gris RAL7004	Gris RAL7004	Gris RAL7004

¹ Temperatura del color, del inglés Correlated Color Temperature.

² Índice de reproducción del color.

³ Índice de protección contra el ingreso de partículas y agua, según norma internacional ANSI/IEC 60529-2004.

⁴ Índice de protección contra impactos mecánicos, según norma internacional ANSI/IEC 60529-2004.

Fuente: elaboración propia.

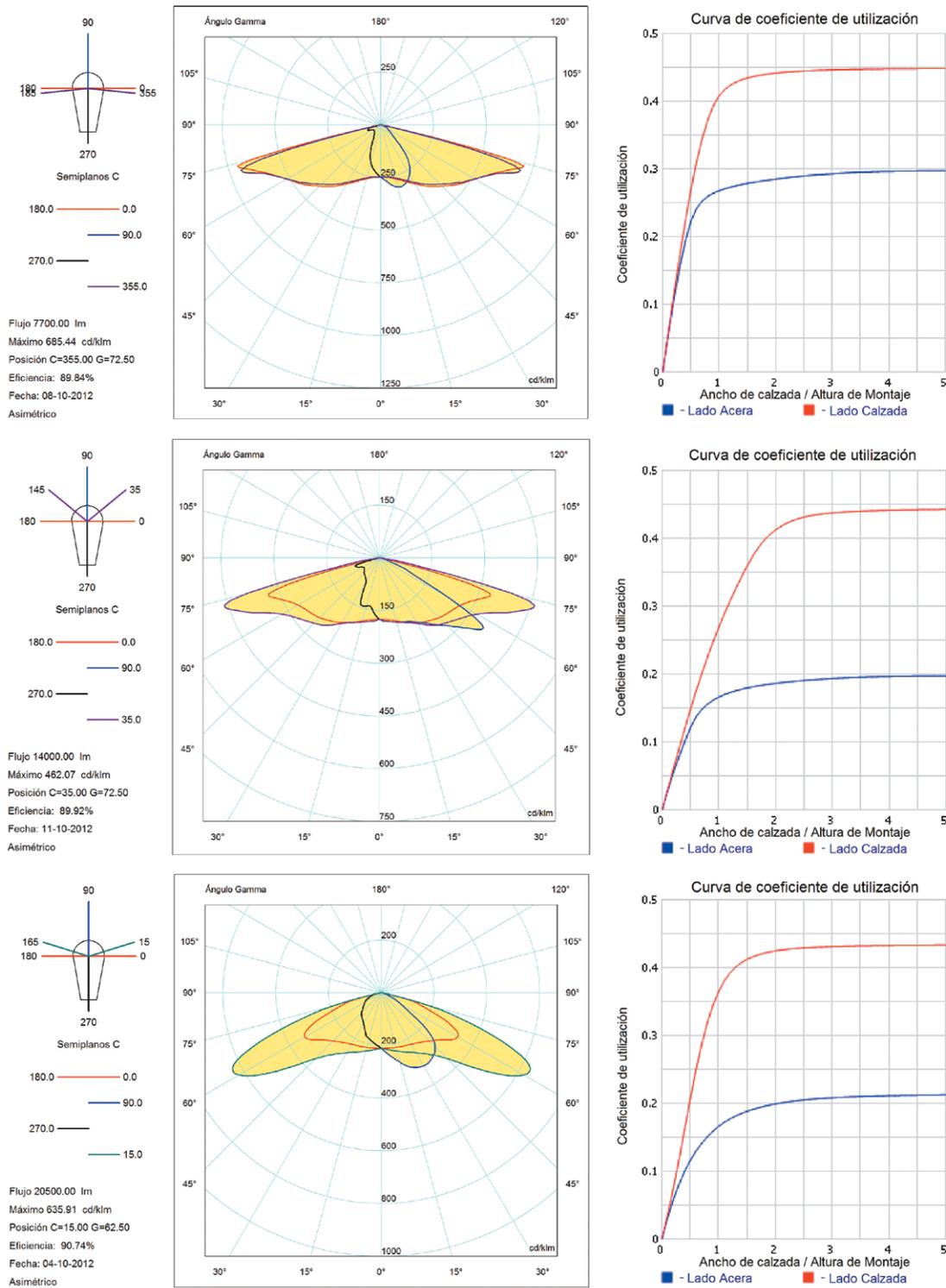


Figura 7. Diagrama polar y curvas de coeficiente de utilización de luminarias LED seleccionadas del fabricante 'A'. Arriba: luminaria para senderos. Centro: luminaria para juegos infantiles. Abajo: luminaria para canchas múltiples.

Fuente: Software Litestar 4D PhotoView en su versión de uso libre y de la herramienta en línea de uso libre Visual Photometric Tool™.

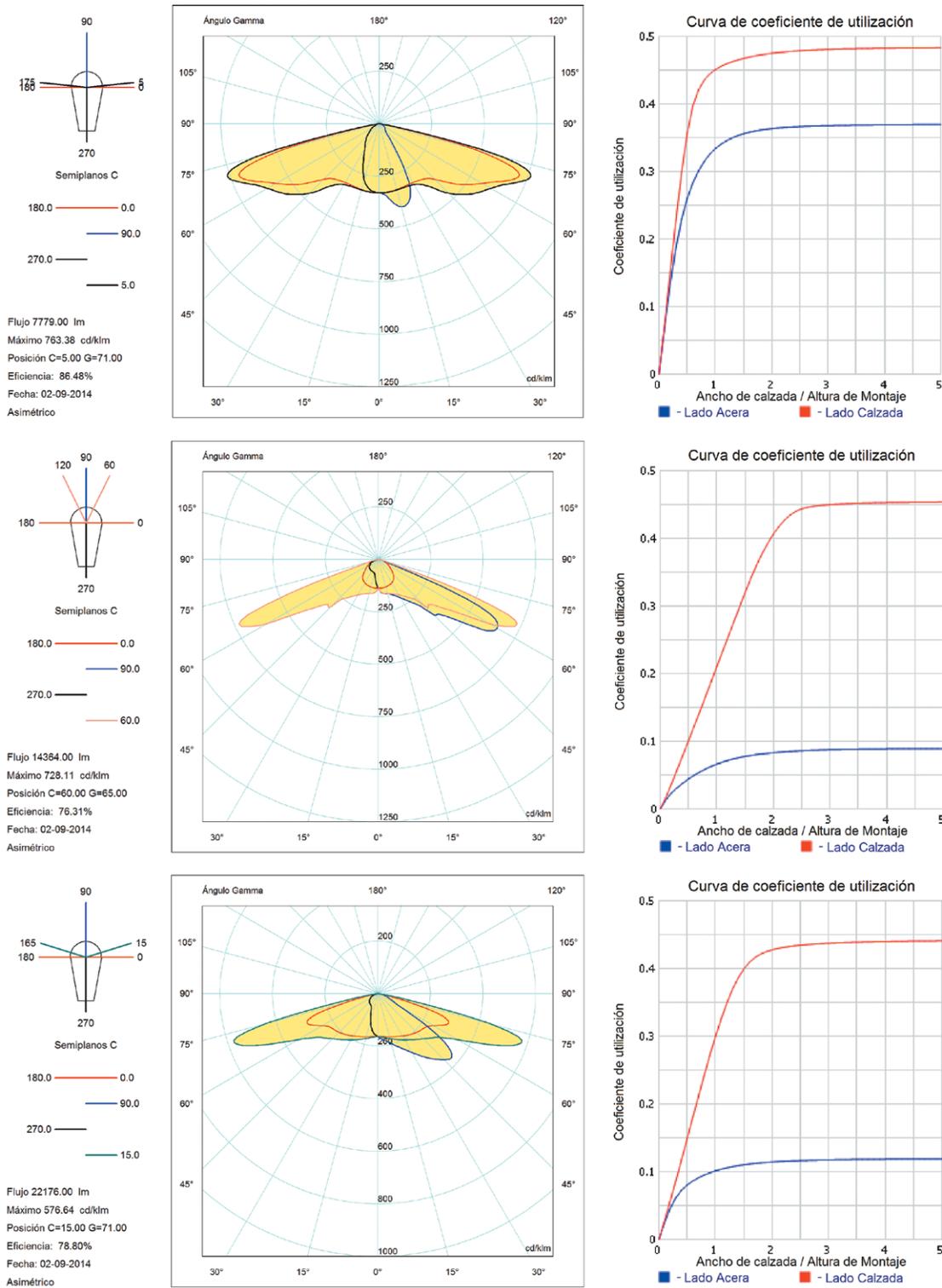


Figura 8. Diagrama polar y curvas de coeficiente de utilización de luminarias LED seleccionadas del fabricante 'B'. Arriba: luminaria para senderos. Centro: luminaria para juegos infantiles. Abajo: luminaria para canchas múltiples.

Fuente: Software Litestar 4D PhotoView en su versión de uso libre y de la herramienta en línea de uso libre Visual Photometric Tool™.

Paso 5. Verificación del desempeño de las luminarias LED equivalentes mediante cálculos fotométricos

Se verificó el desempeño de las luminarias LED seleccionadas mediante cálculos fotométricos aplicados a las zonas peatonales del caso de estudio. Estas corresponden al área total de senderos, islas de juegos infantiles y canchas múltiples. Como se mencionó antes, las zonas verdes no requieren iluminación en forma obligatoria. Dentro de cada cálculo se presentan resultados para cuatro grillas de cálculo específicas e iguales a las que se emplearon en las mediciones de iluminancia durante la caracterización inicial de la instalación existente en el caso de estudio.

Los cálculos fotométricos se ejecutaron en una primera iteración obedeciendo al cuadro de parámetros deseados de la Tabla 2. Sin embargo, fue necesario ajustar los flujos luminosos de cada luminaria con el objetivo de optimizar el desempeño del sistema de iluminación y reducir la posibilidad de sobreiluminar los espacios durante el período inicial de vida de la instalación. Aunque en el caso particular de las islas de juegos infantiles fue necesario, contrariamente a lo esperado, incrementar el flujo luminoso de la luminaria a un valor superior al límite establecido la Tabla 2.

Con el uso del factor de mantenimiento de 0,76, como se indicó antes, los resultados de los cálculos fotométricos corresponden a los niveles de iluminación esperados en el peor estado supuesto de la instalación, es decir, cuando el vidrio de las luminarias se encuentra sucio y cuando los módulos LED han cumplido su tiempo de remplazo programado.

Comparación de mediciones registradas en instalación existente y cálculos fotométricos

Los resultados de los cálculos fotométricos para las cuatro grillas seleccionadas se presentan en la Tabla 3 y se comparan con los valores de referencia del RETILAP. Allí se puede observar que la instalación propuesta tanto con luminarias del fabricante A como del fabricante B excede todos los requisitos mínimos de iluminancia y uniformidad para cada tipo de área, conforme a los requisitos aplicables a cada una según el RETILAP.

Comparación económica

En la Tabla 4 se muestran los resultados que arroja el formulario de cálculo de indicadores de evaluación económica mencionados anteriormente y de impacto ambiental, como son el consumo de energía y las emisiones estimadas de CO₂ que tendría cada escenario analizado.

Desde el aspecto económico se puede ver que, de las dos alternativas estudiadas, la que muestra los mejores indicadores en la evaluación económica es la del fabricante 'A', pues presenta un tiempo de retorno de la inversión de 6,8 años en comparación con los 9,6 del fabricante 'B'.

De la misma manera, los valores de VPN y TIR son también más favorables para el fabricante 'A'. En cuanto al CAE y el CTP, se puede observar que ambas opciones reflejan unos costos menores, aunque sigue siendo el fabricante 'A' el que exhibe un mejor desempeño, demostrando una reducción de 32% en

Tabla 3. Resultados de cálculos de iluminancia con las luminarias LED de los fabricantes A y B.

Grilla	Descripción del área	Valores de referencia (RETILAP)		Instalación existente VSAP		Cálculos con luminaria LED del fabricante A		Cálculos con luminaria LED del fabricante B	
		Eprom [lux]	U ₀	Eprom [lux]	U ₀	Eprom [lux]	U ₀	Eprom [lux]	U ₀
1	Sendero peatonal 1	15	0,33	24,1	0,37	17	0,64	19	0,67
2	Sendero peatonal 2	15	0,33	23,8	0,38	16	0,37	19	0,37
3	Cancha múltiple	50	0,40	68,7	0,61	53	0,66	52	0,70
4	Juegos infantiles	15	0,33	16,8	0,24	16	0,50	17	0,71

Fuente: elaboración propia.

el CTP con respecto al escenario de conservar la instalación existente, mientras el fabricante 'B' ofrecería una reducción de 28%. Esta observación es más evidente en la Figura 9, en donde se observa el CTP de las tres alternativas y se hace la distinción entre costos de inversión, mantenimiento y energía.

De la Figura 9 también se destaca que el rubro que hace la diferencia más grande a favor de las alternativas con tecnología LED es el costo de la energía, pues con las dos alternativas evaluadas el ahorro energético está alrededor de 40%.

Finalmente, con relación al impacto ambiental se observa que el remplazo de las luminarias existentes en el caso de estudio por luminarias de tecnología LED permitiría alcanzar una reducción de consumo energético y emisiones de CO₂ en torno a 40%, en comparación con el caso en que la instalación continuara el uso de luminarias de VSAP. Esta reducción representa que se dejarían de emitir entre 25 y 30 toneladas de CO₂ a la atmósfera durante los 30 años de vida de la instalación. Lo anterior aplica para la tasa de emisión promedio

Tabla 4. Indicadores de evaluación económica y de impacto ambiental para las dos alternativas en tecnología LED y un tercer escenario, en el que se conservará la instalación existente con luminarias de VSAP.

Indicadores de evaluación	VSAP-existente	LED-fabricante A	LED-fabricante B
Retorno simple de la inversión [años]		6,8	9,6
Valor presente neto		\$ 9.204.259	\$ 1.857.278
Tasa interna de retorno		21,25%	15,00%
Costo anual equivalente [\$]	-\$ 10.019.693	-\$ 8.713.991	-\$ 9.756.223
Costo total de propiedad	\$ 465.825.755	\$ 316.414.941	\$ 336.503.968
Reducción en CTP [%]	-	-32%	-28%
Consumo de energía [kWh]	472.120	284.481	303.665
Costo de la energía [\$]	\$ 420.527.958	\$ 253.393.551	\$ 270.481.523
Emisiones [ton CO ₂]	72,23	43,53	46,46
Reducción en costo, consumo de energía y emisiones [%]	-	-40%	-36%

Fuente: elaboración propia.

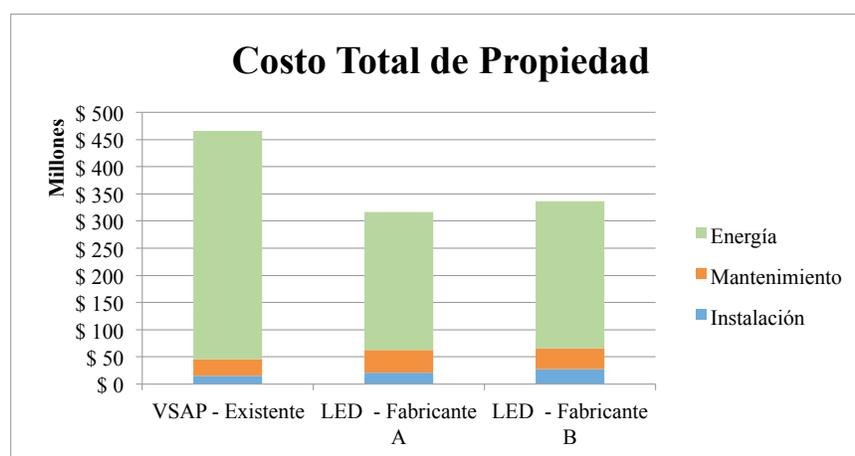


Figura 9. Representación gráfica del costo total de propiedad de la instalación existente y las dos alternativas de remplazo, obtenida del formulario de evaluación económica.

Fuente: elaboración propia.

de Colombia de los años 2009, 2010 y 2011, de 153 g de CO₂ por kWh de energía eléctrica generado, según (International Energy Agency, 2013).

CONCLUSIONES

Como la normatividad y reglamentación están sujetas a procesos prolongados en el tiempo, es difícil por su parte responder con prontitud a los rápidos avances de la tecnología de estado sólido para iluminación. No obstante, la teoría de la iluminación artificial sigue siendo aplicable a la tecnología LED, luego un estudio cuidadoso y crítico puede facilitar la selección de productos de buena calidad y la construcción exitosa de sistemas de iluminación basados en esta tecnología.

En el aspecto económico se pudo verificar que la longevidad y la reducción del consumo de energía que ofrecen los equipos de iluminación de tecnología LED son razones suficientes para promover su implementación en aplicaciones como la abordada en el caso de estudio. Si bien el escenario seleccionado para aplicar el procedimiento propuesto es de una escala pequeña, es un ejemplo muy representativo de los más de 2.000 parques vecinales y casi 100 parques zonales con que cuenta la ciudad de Bogotá, que representan entre 10 y 15% del total de luminarias que tiene el sistema de alumbrado público de la ciudad.

Aunque en el análisis económico presentado en este documento se obtuvo un retorno de la inversión entre el sexto y el séptimo año después de la inversión inicial, la realización de estudios similares pero a mayor escala e involucrando otros tipos de beneficios económicos, puede conducir a la obtención de valores aún más favorables en este indicador. Además, la reducción del precio de los equipos de iluminación LED que se espera en los próximos años y la constante mejora de la eficiencia de los chips LED provocará que a mediano plazo la inversión en esta tecnología sea económicamente más atractiva y rentable.

REFERENCIAS

- Comisión de Regulación de Energía y Gas (08 de 09 de 2011). Metodología para la determinación de costos máximos que deberán aplicar los municipios o distritos, para remunerar a los prestadores del servicio así como el uso de los activos vinculados al sistema de alumbrado público. Documento CREG-102. Bogotá, Colombia.
- Comisión de Regulación de Energía y Gas (2011). Resolución No. 123 de 2011. Bogotá.
- International Energy Agency (2013). CO₂ emissions per kWh from electricity generation. In: I. E. Agency, CO₂ Emissions from Fuel Combustion: Highlights. París.
- Ministerio de Minas y Energía (2010). Cálculo del factor de mantenimiento. En: Reglamento Técnico de Iluminación y Alumbrado Público. Bogotá.
- Ministerio de Minas y Energía (2010). Esquema de Mantenimiento de Instalaciones de Alumbrado Público. En: Reglamento Técnico de Iluminación y Alumbrado Público. Bogotá.
- Ministerio de Minas y Energía (2010). Mediciones Fotométricas de Alumbrado Público. En: Reglamento Técnico de Iluminación y Alumbrado Público. Bogotá.
- Ministerio de Minas y Energía (2010). Niveles Exigidos de Luminancia e Iluminancia en Alumbrado Público. En: Reglamento Técnico de Iluminación y Alumbrado Público. Bogotá.
- Unidad de Planeación Minero Energética (2014). www.upme.gov.co. (Sistema de Información Eléctrico Colombiano). Recuperado el 15 de 08 de 2014, de: http://www.upme.gov.co/GeneradorConsultas/Consulta_SuiConsumo.aspx?IdModulo=2&Servicio=4
- Universidad Nacional de Colombia (01 de 09 de 2014). Indicadores de evaluación económica. Obtenido de: <http://www.virtual.unal.edu.co/cursos/eLearning/dnp/2/swf/indicadores-evaluacion.swf>

