
**Análisis comparativo de pre-factibilidad técnica y económica del LED
en el alumbrado público conforme a RETILAP**

Cindy M. OSORIO

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniera Electricista

Director

*Juan Pablo Castañeda Duque
Ingeniero Electricista*

**Universidad Pontificia Bolivariana
Escuela de Ingeniería
Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica
Ingeniería Eléctrica
Medellín
2015**

Dedicatoria

A ...

Mis padres por su gran esfuerzo de brindarme siempre lo mejor, por hacer de mí una persona íntegra, responsable, capaz, y sobre todo por darme la oportunidad de ser profesional. A mi hermana por sus explicaciones, apoyo y motivación incondicional. A los tres, gracias por su esfuerzo, apoyo, dedicación, amor, cariño y motivación constante a lo largo de esta carrera...

Los Amo con todo mi corazón

Agradecimiento

Al director de este proyecto, el Ingeniero Juan Pablo Castañeda por su apoyo, dedicación, paciencia, enseñanzas y aportes que permitieron el desarrollo de este trabajo de grado.

A Emilio Tamayo, Edison García, Alejandro Páez, Carlos Campo y demás compañeros de CELSA S.A.S por sus valiosos aportes a este trabajo.

A mis profesores los cuales con paciencia y dedicación me hicieron amar mucho más esta carrera, son ellos a quien les debo la mayoría del conocimiento adquirido a lo largo de estos años.

A Camila Duque y Carolina Amado por su aporte en este trabajo, y porque esta experiencia no hubiese sido la misma sin su compañía.

A las amigas que adquirí a lo largo de la carrera, las cuales compartieron su conocimiento, alegrías y preocupaciones conmigo, Maria Elisa Briñon, Paula Restrepo, Tatiana Jimeno, Estefanía Giraldo, y a todas las demás personas que acompañaron y apoyaron a lo largo de ella.

A mis amigos de la vida Mauricio Agudelo, Lorena Martínez, Carlos Ramírez, que me acompañaron y motivaron a lo largo de este trabajo.

A las mujeres más hermosas de mi vida, mi Minina, mi tía Pina y mis Abuelas; porque sé que mis logros también son su alegría.

A mi muñeca por llenar mi corazón de alegría y siempre subirme el ánimo cuando lo necesito.

A ese hombre que desde la distancia sé que siempre desea lo mejor para mí, y que durante tantos años me apoyo y motivo en mi carrera.

Contenido

INTRODUCCIÓN	11
1. FUENTES DE LUZ TÍPICAS EN EL ALUMBRADO PÚBLICO.....	12
1.1. Evolución del alumbrado público	12
1.2. Fuentes luminosas	12
2. ANÁLISIS TÉCNICO ENTRE EL LED, SAP Y CMH.....	15
2.1. Características de la radiación luminosa	15
2.2. Curva de sensibilidad del ojo humano	15
2.3. Características generales de las fuentes luminosas	18
2.4. Análisis fotométrico de las luminarias	20
3. REQUISITOS PARA EL DISEÑO DE ILUMINACIÓN DE ALUMBRADO PÚBLICO	29
3.1. Metodología y Reglamentación	30
4. DISEÑO DE ILUMINACIÓN AV 3 ^{era} NORTE-SAMECO, CALI.....	35
5. ANÁLISIS ECONÓMICO	38
6. BENEFICIOS E INCONVENIENTES DEL LED	44
6.1. Beneficios medioambientales	44
6.2. Beneficios técnicos	45
6.3. Inconvenientes de la tecnología LED	46
7. CONCLUSIONES	48
REFERENCIAS.....	50
AUTOR 52	
ANEXO 52	

Lista de Figuras

Figura 1. Características de la radiación luminosa.....	15
Figura 2. Espectro de luz de diferentes fuentes luminosas.....	16
Figura 3. Curvas de sensibilidad del ojo humano	17
Figura 5. Índice de reproducción del color	19
Figura 6. Temperatura del color.....	20
Figura 7. Curvas de depreciación luminosa	21
Figura 8. Curvas Isocandela. Reproducida con permiso de (CELSA S.A.S, 2014) (CELSA S.A.S, 2014b).....	22
Figura 9. Área de estudio, clasificación por apantallamiento	23
Figura 10. Coeficiente de utilización	24
Figura 11. Distribución del flujo en el CU.....	24
Figura 12. CU luminaria VENUS SAP - P1. Reproducida con permiso de (CELSA S.A.S, 2014c).....	25
Figura 13. Coeficiente de utilización luminaria VENUS y DELTA-LED. Reproducida con permiso de (CELSA S.A.S, 2014) (CELSA S.A.S, 2014b) (Qtest, 2013)	26
Figura 14. Curva polar luminaria VENUS y DELTA-LED. Reproducida con permiso de (CELSA S.A.S, 2014) (CELSA S.A.S, 2014b) (Qtest, 2013).....	26
Figura 15. Coeficiente de utilización luminaria DELTA LED. Reproducido con permiso de Celsa (2013) (Qtest, 2013)	27
Figura 16. CU luminaria VENUS SAP - P2. Reproducido con permiso de (CELSA S.A.S, 2014d)	28
Figura 17. Proceso diseño de iluminación vial	32
Figura 18. Ubicación de luminarias Software <i>litestar</i>	35
Figura 19. Análisis económico a 363,22 \$/kWh	41
Figura 20. Análisis económico a 300 \$/kWh	42
Figura 21. Análisis Económico a 260 \$/kWh	43
Figura 22. Toneladas de CO2 emitidas por cada tecnología.....	45
Figura 23. Módulo y lente LED	45

Lista de Tablas

Tabla 1. Factor S/P para diferentes fuentes de luz	18
Tabla 2. Características generales de las luminarias. Tomado de (CELSA S.A.S, 2014) (CELSA S.A.S, 2014b)	22
Tabla 3. Requisitos fotométricos mantenidos para vías motorizadas, con base en la luminancia de la calzada	31
Tabla 4. Clases de iluminación para las vías vehiculares.....	31
Tabla 5. Clases de iluminación en áreas críticas	33
Tabla 6. Requisitos fotométricos para áreas críticas	33
Tabla 7. Valores máximos de densidad de potencia eléctrica	34
Tabla 8. Áreas Críticas C2, (20lx-40% de Umed)	36
Tabla 9. Áreas Críticas C1, (30lx-40% de Umed)	36
Tabla 10. Resumen de resultados cálculo 4, vía M2	36
Tabla 11. Resumen de resultados cálculo 8, vía M2	37
Tabla 12. Resumen de resultados cálculo 10, vía M4	37
Tabla 13. Resumen análisis económico	40
Tabla 14. Energía consumida y emisiones de CO2 anuales	45

Glosario¹

Adaptación: Proceso mediante el cual el sistema visual se adapta a mayor o menor cantidad de luz o a la luz de un color, diferente al que estaba expuesto durante el periodo inmediatamente anterior. La adaptación resulta en un cambio en la sensibilidad del ojo a la luz.

Alcance: Característica de una luminaria que indica la extensión que alcanza la luz en la dirección longitudinal del camino. Las luminarias se clasifican en: de alcance corto, medio o largo.

Altura de montaje (en una vía): Distancia vertical entre la superficie de la vía por iluminar y el centro óptico de la fuente de luz de la luminaria.

Candela (cd): Unidad del Sistema Internacional (SI) de intensidad luminosa. Una candela se define como la intensidad luminosa, en una dirección dada y es igual a un lumen por estereorradián.

CMH: Fuente de luz de halogenuro metálicos cerámicos.

Depreciación lumínica: Disminución gradual de emisión luminosa durante el transcurso de la vida útil de una fuente luminosa.

Deslumbramiento: Sensación producida por la luminancia dentro del campo visual que es suficientemente mayor que la luminancia a la cual los ojos están adaptados y que es causa de molestias e incomodidad o pérdida de la capacidad visual y de la visibilidad.

Diagrama polar: Gráfica que representa en coordenadas polares la distribución de las intensidades luminosas en planos definidos. Generalmente se representan los planos $C=0^{\circ}$ - 180° , $C=90^{\circ}$ - 270° y plano de intensidad máxima. Cada plano C está compuesto por ángulos verticales Γ (γ), los cuales empiezan desde la vertical hacia abajo (0°) respecto al centro óptico de la luminaria hasta la horizontal $\gamma=90^{\circ}$

¹Debido a que son palabras técnicas éste glosario es tomado en su mayoría textualmente de RETILAP: Reglamento técnico de iluminación y alumbrado público. Resolución No. 180540 página 15-23 (Ministerio de Minas y Energía, 2010)

Difusor: Elemento que sirve para dirigir o esparcir la luz de una fuente.

Driver: Dispositivo de alimentación y control electrónico. Se ocupa de transformar la tensión que recibe de la red eléctrica adaptándola a los parámetros exigidos para un correcto funcionamiento del sistema, además ofrece una corriente constante y protección térmica a la luminaria.²

Factor de mantenimiento (FM): Factor usado en el cálculo de la luminancia e iluminancia después de un período dado y en circunstancias establecidas. Tiene en cuenta la hermeticidad de la luminaria, la depreciación del flujo luminoso de la bombilla, la clasificación de los niveles de contaminación del sitio y el período de operación (limpieza) de la luminaria.

Factor de uniformidad de iluminancia: Medida de la variación de la iluminancia sobre un plano dado, expresada mediante alguno de los siguientes valores:

- a) Relación entre la iluminancia mínima y la máxima.
- b) Relación entre la iluminancia mínima y la promedio

Factor de uniformidad general de la luminancia (U_o): Relación entre la luminancia mínima y la luminancia promedio sobre la superficie de una calzada. $U_o = L_{\min}/L_{\text{prom}} [\%]$. Es una medida del comportamiento visual que no puede ser inferior a 40 % para L comprendido entre el rango de 1 cd/m^2 a 3 cd/m^2 , con el fin de que un objeto sea perceptible el 75 % de los casos en un tiempo no mayor a 0,1 s.

Factor de uniformidad longitudinal de luminancia (UL): La menor medida de la relación L_{\min}/L_{\max} sobre un eje longitudinal paralelo al eje de la vía que pasa por la posición del observador y situado en el centro de cada uno de los carriles de circulación.

²Comité español de iluminación. (14 de Enero de 2014). Requerimientos Técnicos Exigibles para luminarias con Tecnología LED de alumbrado Exterior. Recuperado el 8 de Agosto de 2014 (Comite español de iluminación , 2014)

Flujo luminoso (Φ): Cantidad de luz emitida por una fuente luminosa en todas las direcciones por unidad de tiempo. Su unidad es el lumen (lm).

Illuminancia (E): Densidad del flujo luminoso que incide sobre una superficie, su unidad es el lux (lx).

Illuminancia promedio o mantenida (E_{prom}): Valor por debajo del cual no debe descender la iluminancia promedio en el área especificada. Es la iluminancia promedio en el período en el que debe ser realizado el mantenimiento.

LED: Light emitting diode o diodo emisor de luz.

Lumen (lm): Unidad de medida del flujo luminoso en el Sistema Internacional (SI).

Luminancia (L): En un punto de una superficie, en una dirección, se interpreta como la relación entre la intensidad luminosa en la dirección dada producida por un elemento de la superficie que rodea el punto, con el área de la proyección ortogonal del elemento de superficie sobre un plano perpendicular en la dirección dada. La unidad de luminancia es candela por metro cuadrado (Cd/m^2).

Luminaria: Aparato de iluminación que distribuye, filtra o transforma la luz emitida por una o más bombillas y que incluye todas las partes necesarias para soporte, fijación y protección de las bombillas.

Lux (lx): Unidad de medida de iluminancia en el Sistema Internacional (SI). Un lux es igual a un lumen por metro cuadrado ($1 \text{ lx} = 1 \text{ lm}/\text{m}^2$).

Plano de trabajo: Es la superficie horizontal, vertical u oblicua, en la cual el trabajo es usualmente realizado, y cuyos niveles de iluminación deben ser especificados y medidos.

Reflectancia de una superficie: Relación entre el flujo radiante o luminoso reflejado y el flujo incidente sobre una superficie.

SAP: Fuente de luz de vapor de sodio a alta presión.

Resumen

En éste proyecto se realizó un análisis comparativo entre las tecnologías LED, SAP y CMH, aplicado al diseño de iluminación de la Av 3^{era} Norte-Sameco de Cali. Se analizó técnica y económicamente cual era la mejor fuente a utilizar, basado en el desempeño fotométrico, la calidad lumínica, ahorro energético, mantenimiento y operación, y en su impacto medioambiental, siguiendo los lineamientos del Reglamento Técnico de Iluminación y Alumbrado Público (RETILAP). *Copyright ©UPB 2015*

Palabras clave: LED, RETILAP, Alumbrado Público, Iluminación.

Abstract

In this project a comparative analysis between LED, SAP and CMH have been made, applied to the lighting design of the 3era Norte-Sameco Avenue, located in Cali-Colombia. It was analyzed technically and economically which one was the better option to use, based in photometric performance, light quality, energy saving, maintenance, operation and environment impact, following the guidelines of the Reglamento Técnico de Iluminación y Alumbrado Público (RETILAP).

Keywords: LED, RETILAP, public lighting, lighting.

INTRODUCCIÓN

Este proyecto hace parte del mejoramiento de la ciudad de Cali, donde la administración cambiará la luz amarilla del alumbrado público por tecnología LED, con una temperatura de color fría, buscando hacer de Cali una “ciudad blanca”, más amigable con el medio ambiente, más segura y principalmente para disminuir el consumo de energía eléctrica, contribuyendo así a promover el Programa del Uso Racional y Eficiente de la energía eléctrica PROURE, basado en la ley 697 de 2001.

Debido a que el alumbrado público, genera una gran demanda al sistema eléctrico nacional, es importante buscar una mejor alternativa para reducir el consumo de energía, cambiando la tecnología actual por una más eficiente y de menor potencia, que garantice mejores niveles de iluminación, mayor vida útil, y que contribuyan al medio ambiente no solo desde el punto de vista energético, sino también desde la reducción de gases de efecto invernadero y la disposición final de sus elementos (reciclaje).

Objetivo:

Analizar comparativamente las tecnologías de iluminación convencional respecto a la tecnología LED para alumbrado público, desde el punto de vista técnico y económico de acuerdo a los requerimientos exigidos por el reglamento técnico de iluminación y alumbrado público RETILAP y el uso racional y eficiente de la energía eléctrica (URE).

Objetivos específicos:

- Comparar las características técnicas de la tecnología LED respecto a las fuentes convencionales de iluminación en alumbrado público.
- Estudiar el reglamento técnico de iluminación y alumbrado público RETILAP.
- Realizar diseños de iluminación usando diferentes fuentes luminosas para alumbrado público vial, cumpliendo con los criterios exigidos por RETILAP.
- Realizar un análisis económico del uso de la tecnología LED respecto a las fuentes convencionales de iluminación en alumbrado público.
- Mostrar los beneficios de la calidad lumínica y el cuidado del medio ambiente al usar tecnología LED.

1. FUENTES DE LUZ TÍPICAS EN EL ALUMBRADO PÚBLICO

1.1. Evolución del alumbrado público

La necesidad creciente del ser humano de obtener seguridad en la oscuridad, lo llevo a iluminar los lugares habitados. Inicialmente las antorchas fueron las primeras forma de iluminación, las cuales surgieron de las fogatas, utilizadas para calentarse y protegerse de los animales salvajes. Durante el medioevo, las antorchas ancladas en soportes metálicos de las calles y plazas, se convirtieron en el primer ejemplo de alumbrado público, estas antorchas, utilizaban mechas vegetales y quemaban aceites de olivo o nuez (Giménez, 2005).

A principios del siglo XIX la incursión del gas como fuente de iluminación desplazo las antorchas, y a pesar del temor público por la seguridad de éste, las ciudades empezaron a ser iluminadas con gas. Frederick Albert Windsor en 1807 instalo por primera vez luminarias a gas en las vías públicas de Londres. Este sistema de alumbrado público, se adoptó en muchas ciudades de países europeos y americanos, pero finalmente fue sustituido por las lámparas eléctricas a finales del siglo XIX.

Las lámparas eléctricas fueron perfeccionadas por Thomas A. Edison. En 1878 inventó la bombilla incandescente de filamento de carbono que se podía comercializar, llevando así la luz cómoda y limpia, hasta los hogares más modestos. Al introducir la lámpara incandescente en el alumbrado público, el parlamento de

Londres impuso una legislación prohibiendo el uso de lámparas sin reflectores; debido al temor expresado de la gente a que pudiera ser dañina a la vista (Vellegas, 2004).

La necesidad por aumentar la eficacia de las lámparas siguió creciendo constantemente a través de los años, innovando con nuevos materiales e introduciendo gases inertes dentro del cristal de la lámpara; el cual, logra retardar la evaporación del filamento y mejorar su eficacia. A principios del siglo XX la investigación en el uso de gases nobles para la iluminación era continua, desarrollando así las lámparas de descarga eléctrica, e incursionando en 1931 con la lámpara de alta presión de sodio, utilizada en el alumbrado público, debido al color amarillo de su luz.

Después de la segunda guerra mundial se han desarrollado nuevas lámparas y numerosas tecnologías en búsqueda de una mejor eficacia, mejores características técnicas y visuales. Entre los desarrollos se incluye la utilización de halogenuro metálico que mejoran la reproducción cromática de la luz. En la actualidad, se ha dado una incursión creciente de la tecnología LED gracias a su eficiencia, eficacia, vida útil y sus características amigables con el medio ambiente (Quiroga, 2010).

1.2. Fuentes luminosas

Lámparas de vapor de sodio a alta presión (SAP). Son las más utilizadas actualmente en alumbrado público, debido a su larga vida, baja depreciación luminosa, y costo reducido.

La lámpara está compuesta por una ampolla de vidrio duro, resistente a la intemperie que sirve de protección, aislamiento eléctrico y térmico al tubo de descarga. Debido a la agresividad de las sales que componen el tubo de descarga, este es de material cerámico, a base de óxido de aluminio translúcido que soporta la temperatura de funcionamiento de 700 °C. Al conectar la lámpara a la red de alimentación, los impulsos transmitidos de tensión excita el gas xenón, ésta descarga aumenta la temperatura, que va evaporando el mercurio y el sodio, produciendo la emisión de luz amarilla, hasta alcanzar su potencia nominal después de 10 minutos aproximadamente (Chapa, 2004).

La descarga producida por la diferencia de potencial entre los dos electrodos, provoca un flujo de electrones libres que al colisionar con los átomos del gas son acelerados a enormes velocidades, modificando momentáneamente la estructura atómica de estos, generando luz por la energía desprendida cuando los átomos alterados vuelven a su estado natural (García, 2007).

Para el encendido adecuado de estas lámparas es necesario aplicar una tensión pico entre 2.8 kV y 5.5kV, por lo que es ineludible colocar arrancadores capaces de generar los impulsos de encendido. Además las lámparas requieren de un balasto para regular el flujo continuo del arco y proporcionar el voltaje apropiado a la lámpara, y un condensador para corregir el factor de potencia (O'Donnell, Sandoval, & Paukste, 2002).

Lámparas de haluros metálicos. Son lámparas de descarga de alta presión, caracterizadas por tener una luz neutra y buena reproducción del color.

Al igual que la lámpara de vapor de sodio, está constituida por una ampolla de vidrio que protege el tubo de descarga encontrado en su interior y evita que salgan los rayos ultravioleta, dañinos a los seres vivos. El tubo de descarga contiene una mezcla de gases de argón, mercurio y haluros metálicos. La adición de haluros metálicos afecta la naturaleza de la luz producida, mejorando la reproducción cromática, la temperatura de color y el rendimiento luminoso. El gas argón se ioniza fácilmente, favoreciendo el paso de arco voltaico pulsante a través de dos electrodos, cuando se le aplica cierto voltaje a la lámpara. El calor generado por el arco comienza a vaporizar los haluros metálicos y el mercurio, produciendo luz a medida que la presión y la temperatura aumentan (Morente, sin año).

El tubo de descarga puede ser de cuarzo o cerámico, sin embargo es preferible el uso del tubo cerámico; ya que éste evita la migración del sodio a través de sus paredes, contribuyendo a que la luz emitida se mantenga estable durante la vida útil de la lámpara. El tubo de cuarzo, permite la migración de sodio a través de sus paredes, la pérdida de componente roja, provoca un cambio en el color de la luz, quedando azulado o verdoso al final de su vida útil. Además, las partículas de sodio desprendidas, se depositan en el interior de la ampolla provocando ennegrecimiento (Uribe, 2000).

Para el correcto funcionamiento de la lámpara es necesario un arrancador que proporcione tensiones de pico del orden de 1.5 kV a 5 kV, un balasto para regular el flujo continuo del arco y proporcionar el voltaje apropiado a la lámpara, y un condensador para compensar el factor de potencia (Salomone, 2004).

Diodo emisor de luz (LED). Light-emitting diode o diodo emisor de luz, es un dispositivo fabricado con materiales semiconductores, que emite luz cuando se polariza de forma directa, circulando por él corriente eléctrica. La estructura básica del LED, es una unión P-N comúnmente encapsulado en una cubierta de plástico, que al ser polarizado directamente, hay un intercambio de cargas en las zonas, donde las cargas positivas de la zona P se mueven hacia la zona N y las cargas negativas o electrones libres de la zona N se mueven hacia la zona P; iniciando la circulación de corriente (Boylestad & Nashelsky, 2003).

Los electrones y las cargas negativas, se re-combinan si están en la misma región, esta recombinación requiere que la energía de los electrones libres sea transferida a otro estado, desprendiéndose una parte en forma de calor y otra en forma de fotones, generando así luz visible (Sanchis & Ejea, 2008).

El color de la luz emitida depende de los materiales semiconductores utilizados, variando desde el espectro visible hasta el ultravioleta y el infrarrojo. Por ejemplo, el LED blanco a tratar en este proyecto está constituido por un chip semiconductor a base de nitruro, cubierto por una capa de fosforo amarillo. Al

aplicar varios voltios sobre el dispositivo, hace que el chip emita luz azul que al pasar a través de la capa de fosforo produce luz blanca. En la actualidad, los LEDs de alta potencia son una variante de este tipo de construcción (Martin, sin año).

Para el correcto funcionamiento de una luminaria LED su estructura debe estar compuesta básicamente por un driver, que convierte los niveles de corriente alterna desde una fuente de alimentación estándar, a niveles controlados de corriente directa, adicionalmente debe poseer un disipador de calor, el cual ayuda a mantener la temperatura de la luminaria dentro de un rango adecuado; al disipar el calor generado en el punto de unión de los diodos LED hacia el ambiente exterior.

Más adelante se profundiza en las especificaciones técnicas de las luminarias de LED, SAP y CMH.

2. ANÁLISIS TÉCNICO ENTRE EL LED, SAP Y CMH

2.1. Características de la radiación luminosa

La luz es una radiación que se propaga en forma de ondas electromagnéticas a una velocidad de 299×10^3 km/s, ésta velocidad es la misma en el espacio libre, pero la longitud de onda es diferente para cada espectro electromagnético. Al pasar por un medio transparente diferente al aire, la longitud de onda y su velocidad pueden alterarse pero su frecuencia permanece fija, los rayos azules de longitud de onda más corta viajan más lentamente que los rayos rojos, lo que explica el por qué de la descomposición de colores en un prisma, fenómeno que revela el espectro de la luz y permite su estudio. (UAESP, 2004)

La luz visible que el ojo humano puede percibir, es solo una parte del espectro electromagnético. Como puede verse en la Figura 1, las ondas más cortas para las que el ojo es sensible son las violetas de 400 nm y las más largas que el ojo es capaz de apreciar, son las rojas correspondientes a longitudes de onda de 750 nm.

Colorimetría de las fuentes luminosas. Cada fuente de luz tiene un espectro de luz visible diferente. En la Figura 2 se presenta el espectro visible de las fuentes tratadas en este proyecto, partiendo del espectro del sol, como fuente primaria y referente espectral IRC.

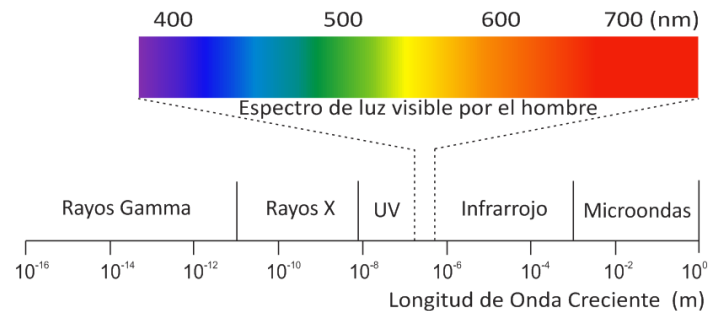
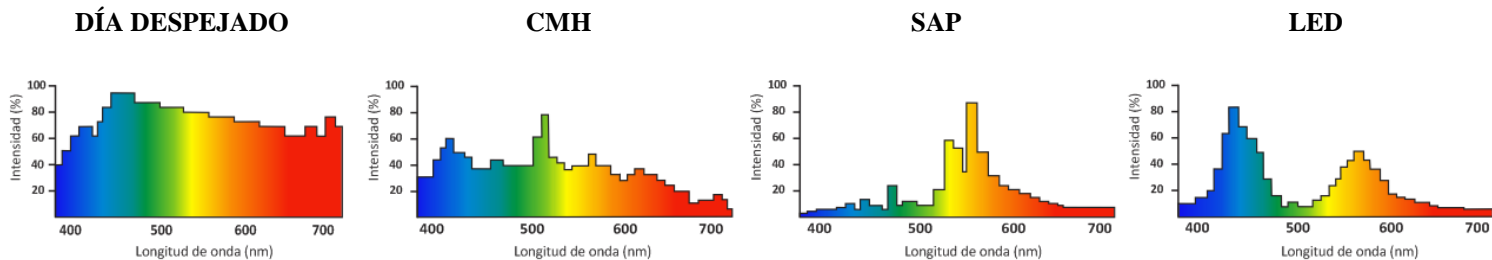


Figura 1. Características de la radiación luminosa

2.2. Curva de sensibilidad del ojo humano

Al ser la sensibilidad del ojo humano relativa para las distintas longitudes de onda, algunos colores, producen mayor sensación visual que otros, originando las curvas de los sistemas foto-receptores que tiene el ojo humano, éstas curvas se presentan en la Figura 3 y están clasificadas en fotópica, mesópica y escotópica.

Visión Fotópica. Es la percepción visual que se tiene con niveles de iluminación diurnos. Al ser elevados (mayores a 10 luxes), los conos de la retina responden a este tipo de visión, haciendo posible la correcta interpretación del rango de colores y buena discriminación de los detalles (Villafranca, 2012).



El espectro es continuo, es decir cada componente de longitud de onda tiene aproximadamente la misma intensidad, además, la radiación también es continua, ya que hacen parte de ella las radiaciones infrarrojas y ultravioleta. (UAESP, 2004)

En general el espectro es continuo al tener cada longitud de onda similar, y a pesar que presenta algunos saltos en la banda del verde, es semejante al espectro de luz solar y posee una buena reproducción del color. (UAESP, 2004)

Presenta bandas de mayor energía radiada en forma de luz, produciendo así, un espectro discontinuo, la intensidad de la radiación está concentrada en las bandas amarillas y naranja donde presenta saltos de elevada potencia. Se puede considerar que el sodio de alta presión es una fuente de luz con elevada eficacia lumínica, ya que su radiación ésta concentrada dentro del espectro visible. (UAESP, 2004)

Es una fuente muy eficaz, ya que su radiación está concentrada dentro del espectro visible, evitando el desperdicio de energía en la radiación ultravioleta. También se puede observar que su espectro contiene abundante radiación en la zona del azul, lo cual favorece la visión nocturna. Además, al ser bien distribuidas todas las longitudes de onda, posee una buena reproducción del color. (Gualdrón & Rico, 2011)

Figura 2. Espectro de luz de diferentes fuentes luminosas

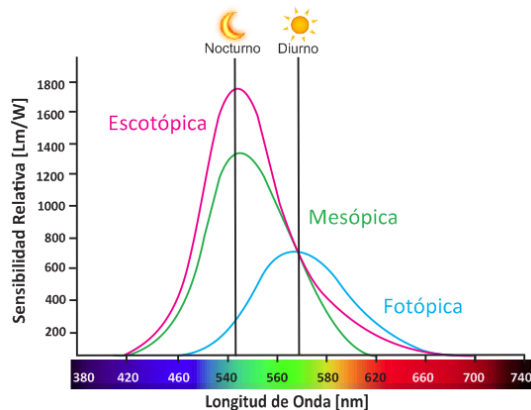


Figura 3. Curvas de sensibilidad del ojo humano

Visión escotópica. Es la percepción visual que se tiene con niveles de iluminación muy bajos o nocturnos. La recepción de la luz se realiza con los bastones de la retina, con los que es imposible distinguir los colores, y debido a que están conectados entre sí, la imagen formada a través de ellos no será muy definida, por lo tanto la agudeza visual es muy baja. Su adaptación y mayor actividad se da a niveles de luminancia entre 0.01 y 0.03 lux e inferiores (Marcet, 2008).

Visión mesópica. Es el tipo de visión en condiciones de adaptación a niveles de iluminación, donde tanto los conos como los bastones están activos. Como puede verse en la Figura 3, la sensibilidad espectral se desplaza gradualmente en la dirección de menor longitud de onda, permitiendo a través de los bastones la

adaptación de altos a bajos niveles de iluminación. La recepción de la luz se realiza por los conos y los bastones de la retina, los conos están parcialmente activados, permitiendo una visión de color disminuida y una discriminación reducida de los detalles (Bommel, 2008).

Todos los estudios de iluminación se basan en esquema de sensibilidad fotópica o diurna. Sin embargo, las fuentes lumínicas utilizadas en la iluminación de las vías, proporcionan luz a nivel de la región mesópica. Éste nivel puede medirse a través del factor S/P donde se relaciona la visión fotópica y escotópica, logrando convertir lúmenes tradicionales en lúmenes reales percibidos por el ojo humano, obteniendo así una estimación más precisa de la cantidad de luz percibida y el brillo visual aparente de una fuente de luz (Rea & Freyssinier, 2009).

En la Figura 4 se muestra el factor S/P típico para las fuentes de iluminación CMH, SAP y LED respecto al sol como referente de los sistemas de iluminación, basado en los datos proporcionados en el artículo Energy Efficiency Consequences of Scotopic Sensitive de S.M Berman (1992). (Berman S. , 1992)

$$\text{Flujo pupilar} = P(S/P)^{0.78} \quad (1)$$

Donde,

P: Luminancia fotópica por vatio.

S/P: Factor de relación entre la luminancia escotópica y fotópica.

En la Tabla 1 se muestra un comparativo entre flujo luminoso y flujo pupilar, para tres diferentes fuentes de luz. El flujo pupilar es hallado mediante la ecuación (1), y es el flujo luminoso por vatio de la lámpara multiplicado por el factor S/P elevado a 0.78.

Debido a que la dilatación de la pupila es controlada principalmente por el nivel de luminancia escotópica, hay un pequeño pero significativo aporte de la luminancia fotópica, esta diferencia es considerada dentro del error expresado en el exponente (0.78), además dicho error también considera la dependencia de la lámpara a las condiciones de funcionamiento, el cual causa variación en el factor S/P (Berman S. , 1992).

Los resultados de la Tabla 1 indican que la luz con un mayor contenido espectral de longitud de onda más corta (azul-verde), es decir con una mayor cantidad de energía en la región de sensibilidad escotópica como el CMH y el LED, son más eficaces, ya que son más sensibles al ojo humano, permitiendo una mejor visión y mayor agudeza visual en condiciones de oscuridad.

Tabla 1. Factor S/P para diferentes fuentes de luz

Fuentes de luz	Flujo luminoso (Lm)	Lúmenes (Lm/W)	Lúmenes Pupilar (Lm/w)	Flujo pupilar (<i>Percepción</i>) (Lm)
SAP-250W	33.200	132,8	94,9	21.580
CMH-250W	28.300	113,2	201,9	59.430
LED-197W	18.800	95,4	173,32	40.420

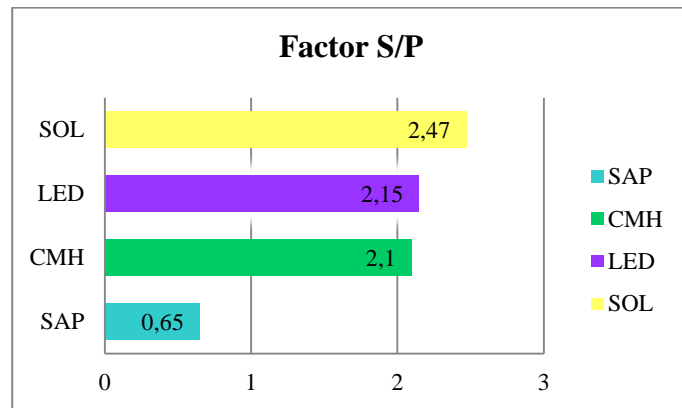


Figura 4. Factores S/P típicos

2.3. Características generales de las fuentes luminosas

Reproducción del color. Es la capacidad de una fuente de luz de reproducir los colores de los objetos. Se dice que un objeto es azul porque refleja la radiación luminosa azul y absorbe todos los demás colores del espectro, esto se da si la fuente luminosa produce suficiente radiación en la zona azul del espectro visible. Por lo cual, para que una fuente de luz sea considerada con buena reproducción de color, debe emitir todos los colores del espectro visible; si falta uno de ellos, éste no podrá ser reflejado (UAESP, 2004).

La propiedad de reproducción de color, es medido a través del Índice de Reproducción del Color (IRC). Este factor se determina comparando la apariencia de color que presentan los objetos

iluminados por una fuente bajo prueba y la apariencia de color de esos mismo objetos iluminados por una fuente de luz de referencia, el sol. (Taboada, 1983).

En la Figura 5 se presenta el índice de reproducción del color para las fuentes de luz analizadas, basada en los datos brindados por el fabricante de las lámparas y el modulo LED (Philips, 2013) (Phillips, 2012) (Vossloh-Schwabe Ibérica S.L, 2014). En dicha figura se puede apreciar que el LED y el CMH tienen una buena reproducción del color por su cercanía con el IRC del sol, en comparación con el SAP, por lo tanto bajo estas fuentes de luz el ojo humano es capaz de percibir los colores con claridad mientras que bajo el SAP no se podrán distinguir y todos tendrán tonos cafés o rojizos.

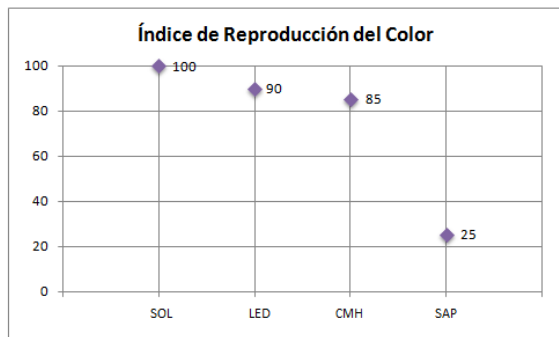


Figura 5. Índice de reproducción del color

Temperatura de color. Es la referencia para indicar el color de las fuentes luminosas que no tengan un color señalado. Éste es

medido en grados kelvin; porque el color de la fuente analizada es definido mediante una comparación respecto al color que toma una barra de tungsteno al ser calentada (UAESP, 2004).

En la Figura 6 se presenta la temperatura del color para las fuentes de luz estudiadas, basado en los datos suministrados por el fabricante de las lámparas y el modulo LED (Philips, 2013) (Phillips, 2012) (Vossloh-Schwabe Ibérica S.L, 2014). Se puede observar que el CMH ofrece una luz neutra, el SAP una luz cálida; ya que es de una tonalidad amarillosa y el LED una luz fría (blanca) cercana a la luz de sol de mediodía, ofreciendo mayor sensación de seguridad en la vía. Sin embargo, el LED puede ser construido en diferentes temperaturas, desde colores cálidos cercanos al sodio hasta temperaturas frías mayores a los del sol, e incluso fuentes monocromáticas.

Depreciación luminosa. El flujo de las fuentes luminosas disminuye en función del tiempo de operación, por el deterioro y envejecimiento de los componentes que la forman.

En la Figura 7 se muestra un comportamiento aproximado de la curva de depreciación luminosa para las fuentes de luz CMH, SAP y LED suministrados por los fabricantes, Philips de las lámparas convencionales y Vossloh del módulo LED. En la figura se pone en evidencia que la fuente de luz CMH sufre una depreciación del flujo luminoso mucho más rápida que las otras dos fuentes, siendo su vida útil aproximadamente de 21.000 horas. El SAP muestra un desempeño medio, con una vida útil aproximada de 25.000 horas, por su parte el LED muestra una preservación buena del flujo luminoso, siendo este aun mayor al

70 % antes de las 40.000 horas de operación, demostrando una vida más duradera que las otras dos fuentes (Philips, 2013) (Phillips, 2012) (Vossloh-Schwabe Ibérica S.L, 2014).

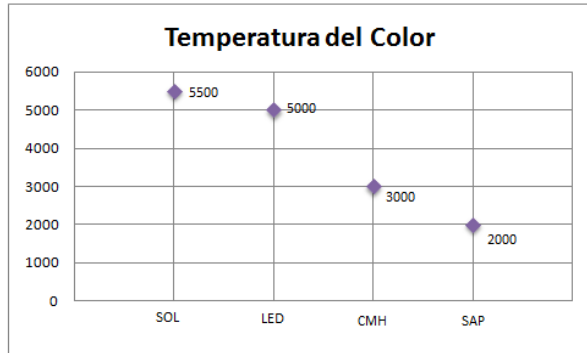


Figura 6. Temperatura del color

2.4. Análisis fotométrico de las luminarias

La fotometría es la ciencia encargada de la medición de la intensidad luminosa de una fuente de luz, como el brillo percibido por el ojo humano o la cantidad de flujo luminoso que incide sobre una superficie. Es decir, estudia la capacidad que tiene la radiación electromagnética de estimular el sistema visual.

Al realizar la fotometría de una luminaria mediante el fotogoniómetro, éste llena una matriz con los datos del flujo

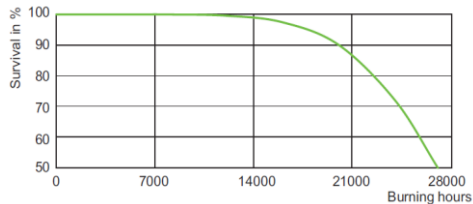
luminoso para cada punto alrededor de una esfera. Dichos datos permiten caracterizar y clasificar la luminaria.

Las pruebas fotométrías se realizan con el fin de conocer la forma de la distribución luminosa y la medida de las intensidades luminosas alrededor de la fuente bajo prueba. Por medio del análisis de la matriz de distribución de intensidades luminosas, es posible determinar el alcance del flujo proporcionado por la luminaria, el coeficiente de utilización, la eficiencia, la eficacia, entre otros, que permiten su clasificación, así como también estimar la calidad de la iluminación sobre un área especificada al utilizar una determinada luminaria.

En la Tabla 2 se presentan las características fotométricas de las luminarias que sobresalen en el proyecto, que son VENUS 250 W en SAP y CMH, y la luminaria DELTA-LED 197 W, las cuales son homologas entre sí.

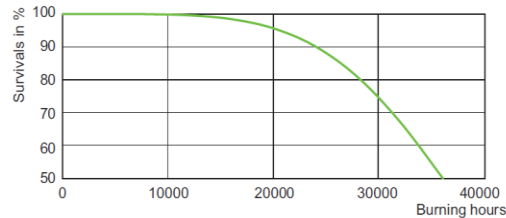
Distribución vertical. Éste parámetro clasifica el alcance del flujo luminoso entregado por una luminaria a lo largo de la vía, siendo clasificada dependiendo del lugar geométrico donde se encuentre el punto de máxima intensidad respecto a las líneas transversales de la vía. Al ubicar el punto de máxima candela en la plantilla de clasificación de luminarias IES encontrado en la Figura 6.19 del Manual de Alumbrado Público (2004) se puede obtener la clasificación vertical de las luminarias.

CMH



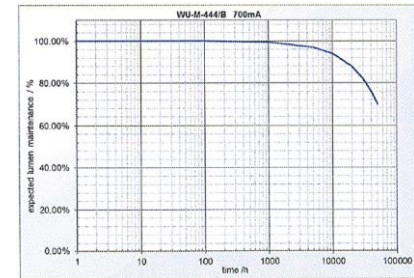
Reproducida con permiso de (Philips, 2013)

SODIO



Reproducida con permiso de (Phillips, 2012)

LED



Reproducida con permiso de (Vossloh-Schwabe Ibérica S.L, 2014)

Figura 7. Curvas de depreciación luminosa

Distribución lateral. Esta clasificación muestra que tanta apertura tiene la luminaria, es decir, que tanto flujo se distribuye hacia el frente de la luminaria, estando ésta ubicada de forma perpendicular a la vía. Dicha clasificación indica el tamaño de la vía donde es adecuado utilizarla. La clasificación lateral de la luminaria puede obtenerse al ubicar el 50 % de la máxima intensidad en la plantilla de clasificación de luminarias IES encontrado en la Figura 6.19 del Manual de Alumbrado Público (2004).

Clasificación por apantallamiento. Esta dado por la cantidad de flujo que se encuentra en los ángulos de elevación mayores a $\gamma=80^\circ$ en el plano $C=90^\circ-270^\circ$ (parte sombreada en la Figura 9). Esta clasificación determina que tanta capacidad tiene la luminaria para controlar el deslumbramiento del conductor en

la vía, a menor flujo para los ángulos $\gamma=80^\circ$ y 90° menor posibilidad de deslumbramiento (UAESP, 2004).

En la Tabla 2 se puede observar que las tres luminarias utilizadas en este proyecto, tienen la misma clasificación IES y basado en los lineamiento que da la UAESP (2004) se tiene que: son Tipo II, es decir que su apertura es media, ya que la mitad de la máxima intensidad, representada en la Figura 8 por la línea roja punteada, alcanza su máximo respecto a las líneas longitudinales de la vía entre 1 y 1.75. Son de distribución vertical corta porque la máxima intensidad se encuentra entre 1 y 2.25 respecto a las líneas transversales de la vía como puede verse en la Figura 8. Son *cut-off* puesto que el flujo luminoso para ángulos γ mayor a 90° es inferior a 2.5 % del flujo de la lámpara y para los ángulos γ entre 80° y 90° es inferior a 10 %, como puede verse en la Tabla 2 dicho concepto se cumple a cabalidad.

Tabla 2. Características generales de las luminarias. Tomado de (CELSA S.A.S, 2014) (CELSA S.A.S, 2014b)

Características	VENUS 250 W- SODIO	VENUS 250 W-CMH	DELTA- LED 197 W
IES			
Clasificación Lateral	Tipo II	Tipo II	Tipo II
Clasificación vertical	Corto	Corto	Corto
Clasificación por apantallamiento	<i>Cut-off</i>	<i>Cut-off</i>	<i>Cut-off</i>
Flujo por lámpara	33200	28289	-
Flujo total de la luminaria	21609	18412	18800
Eficiencia de la luminaria	65 %	65 %	100 %
Eficacia de la luminaria	86 lm/W	74 lm/W	95 lm/W
Max. Cd	9443.74 (85H, 60V)	8046.806 (85H, 60V)	12574.61 (75H, 65V)
Max. Cd (<90° vert)	9443.74 (85H, 60V)	8046.806 (85H, 60V)	12574.61 (75H, 65V)
Max. Cd (90° vert)	195.88 (0.6% Lamp)	166.905 (0.6%Lamp)	39.09 (0.2%Lamp)
Max. Cd (80° a 90° vert)	2675.92 (8.1%Lamp)	2280.093 (8.1%Lamp)	1383.74 (7.4%Lamp)

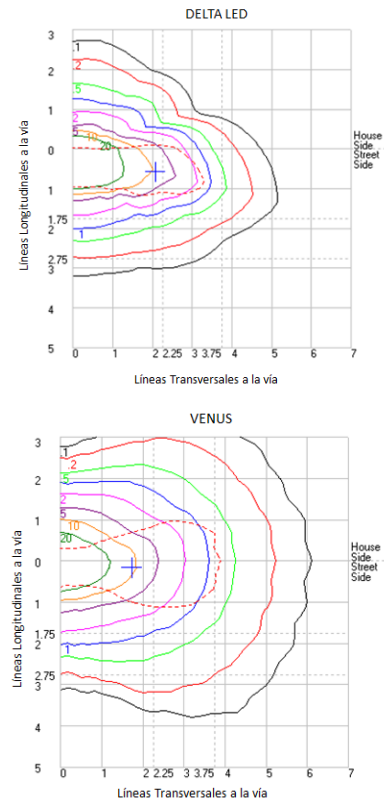


Figura 8. Curvas Isocandela. Reproducida con permiso de (CELSA S.A.S, 2014) (CELSA S.A.S, 2014b)

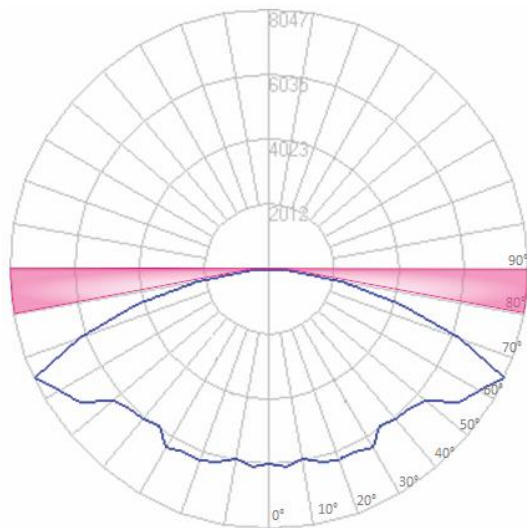


Figura 9. Área de estudio, clasificación por apantallamiento

Las lámparas de SAP y CMH dirigen el flujo luminoso en todas las direcciones, por lo tanto es necesario redirigirla con el fin de cumplir el objetivo de iluminar adecuadamente la vía. Éste se logra a través del reflector y el difusor. La luminaria VENUS utilizada en este proyecto para las fuentes luminosas de SAP y CMH, poseen una fotometría relativa, es decir independientemente de la marca de la lámpara utilizada, dicha luminaria entrega la misma proporción de flujo luminoso.

Por otra parte las luminarias LED poseen una fotometría absoluta, ya que está compuesta por módulos LED, a su vez conformados por chips, por consiguiente en la cantidad de flujo que emite cada chip se incluye el uso del reflector y el difusor, siendo definido dicho flujo por el fabricante del módulo LED. Por lo tanto el flujo luminoso de la luminaria DELTA-LED es la suma total del flujo proporcionado por cada módulo.

Flujo luminoso por lámpara. Es la cantidad de luz que emite una fuente luminosa en todas las direcciones por unidad de tiempo (UPME, 2007). En el caso de la fuente luminosa de SAP y CMH, éste flujo se ve afectado al ser instalada la lámpara en la luminaria, por las pérdidas causadas por el reflector y el difusor, encargados de dirigir y distribuir la luz. Como puede verse en la Tabla 2, para las luminarias utilizadas en este proyecto, la disminución del flujo de las fuentes luminosas SAP y CMH es del 35%, mientras que la luminaria LED al tener una fotometría absoluta, su flujo permanece constante.

Eficiencia de una luminaria. Es una medida del aprovechamiento que se hace del flujo luminoso total de la lámpara instalada en una luminaria (UPME, 2007). Éste valor se halla mediante la relación entre el flujo luminoso emitido por el conjunto luminaria + lámpara y el emitido sólo por la lámpara en su interior, con el fin de tener en cuenta las pérdidas por reflector y difusor. Como puede verse en la Tabla 2, para la luminaria VENUS que poseen una fotometría relativa, la eficiencia es del 65 %, mientras que al poseer una fotometría absoluta y no tener que hacer una relación entre lámpara y luminaria, la eficiencia de la luminaria DELTA LED es del 100 %.

Eficacia de la luminaria. Es la relación que existe entre el flujo luminoso que emite una luminaria y la potencia eléctrica consumida. Un elevado valor implica mejor aprovechamiento del recurso energético eléctrico (UPME, 2007). Como se ha mencionado anteriormente, la necesidad de usar difusor y reflector disminuye notablemente el flujo de la luminaria y por consiguiente su eficacia, consumiendo así más energía. Debido a esto, las luminarias de SAP y CMH utilizadas en este proyecto tienen una eficacia inferior a la luminaria LED como puede verse en la Tabla 2, esto se debe a que las pérdidas de la luminaria DELTA LED están asociadas principalmente al driver, ya que las pérdidas del reflector y el difusor están incluidos en cada chip del módulo LED.

Coefficiente de utilización (CU). Las curvas de coeficiente de utilización expresan el porcentaje del flujo luminoso emitido por la luminaria que cae sobre la superficie de la calzada, hacia adelante, y el porcentaje de flujo luminoso que cae sobre el andén, hacia atrás, en función del ancho de la vía (UAESP, 2004). Dicho concepto es mostrado en las Figura 10 y Figura 11.

W: Ancho de la vía

Hm: Altura de montaje

FC: Flujo luminoso hacia la calzada

FA: Flujo luminoso hacia el andén

FL: Flujo Luminoso

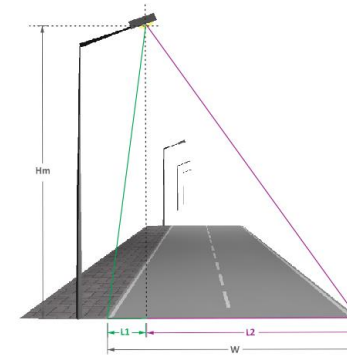


Figura 10. Coeficiente de utilización

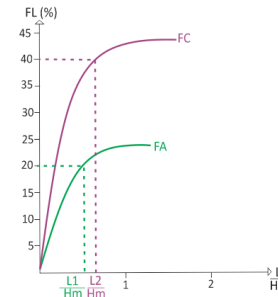


Figura 11. Distribución del flujo en el CU

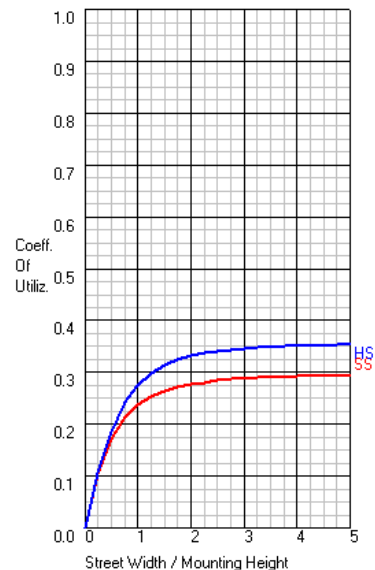
En la Figura 13 se muestra el coeficiente de utilización para las luminarias analizadas, ubicadas sin inclinación. Se puede observar que la luminaria DELTA-LED, distribuye más flujo (77.4 % de la luminaria) hacia la vía en comparación con la

VENUS, la cual distribuye su flujo aproximadamente en igual cantidad hacia adelante y hacia atrás, esto también se puede apreciar en la gráfica roja de la Figura 14.

Sin embargo, se debe tener en cuenta que el porcentaje del flujo emitido hacia adelante o hacia atrás, varía dependiendo del grado de inclinación de la luminaria, como se puede observar en la Figura 15, donde se presenta la distribución de coeficiente de utilización para la luminaria DELTA-LED según el grado de inclinación.

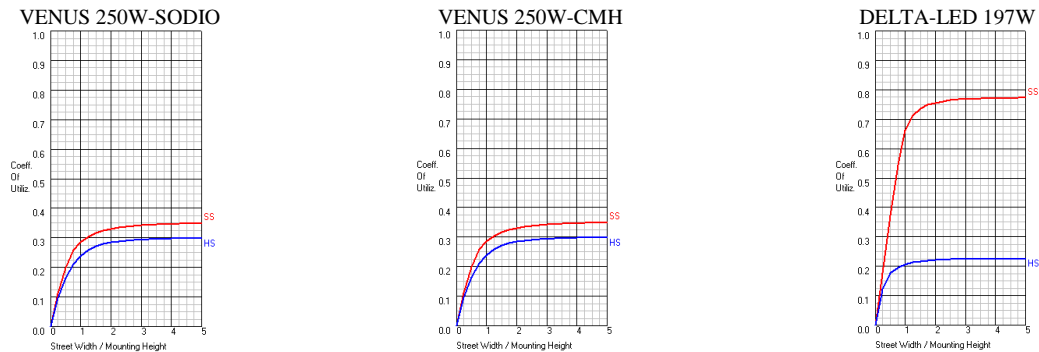
En el caso de la luminaria VENUS, también influye en el coeficiente de utilización la posición de la lámpara, la cual se refiere a la ubicación de la lámpara respecto al reflector de la luminaria, es decir más adentro o afuera de este. Al variar este factor, se puede obtener mayor cantidad de flujo luminoso hacia atrás o hacia adelante, dependiendo de la necesidad que se requiera cumplir. En la Figura 13 es presentado el coeficiente de utilización para la posición P3 de la lámpara y una inclinación de 0° de la luminaria VENUS. En la Figura 12 y Figura 16 se presenta el CU para las posiciones P1 y P2 de la lámpara respectivamente.

Las gráficas presentadas en las Figura 12 y Figura 16 son solo para VENUS SAP, para VENUS CMH sería la misma distribución del CU pero con una menor relación de flujo.



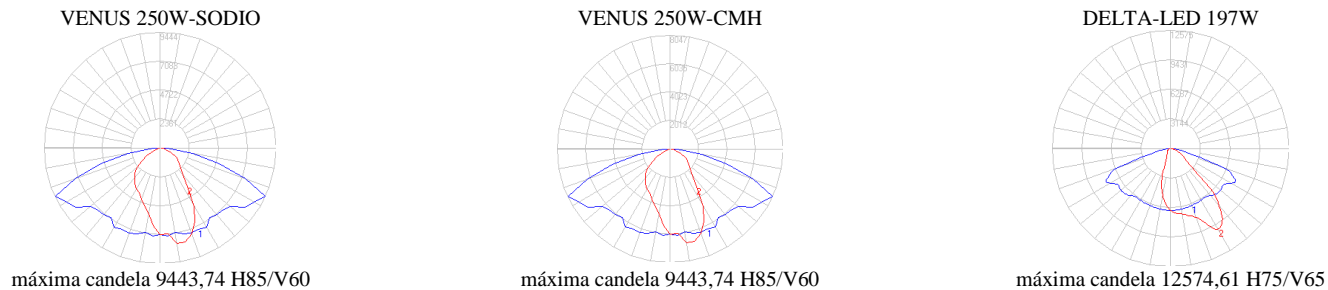
Distribución de Flujo	Lúmenes	Porcentaje de la lámpara (%)
Hacia la calle	8380,8	29,6
Hacia la casa	10111,3	35,7
total	18492,1	65,4

Figura 12. CU luminaria VENUS SAP - P1.
Reproducida con permiso de (CELSA S.A.S, 2014c)



Distribución de Flujo	Lúmenes	Porcentaje de la lámpara (%)	Lúmenes	Porcentaje de la lámpara (%)	Lúmenes	Porcentaje de la luminaria (%)
Hacia la calle	11634,6	35,0	9913,6	35	14550,2	77,4
Hacia la casa	9974,3	30,0	8498,9	30	4250,2	22,6
total	21608,9	65,1	18412,5	65,1	18800,4	100

Figura 13. Coeficiente de utilización luminaria VENUS y DELTA-LED. Reproducida con permiso de (CELSA S.A.S, 2014) (CELSA S.A.S, 2014b) (Qtest, 2013)



máxima candela 9443,74 H85/V60

máxima candela 9443,74 H85/V60

máxima candela 12574,61 H75/V65

Figura 14. Curva polar luminaria VENUS y DELTA-LED. Reproducida con permiso de (CELSA S.A.S, 2014) (CELSA S.A.S, 2014b) (Qtest, 2013)

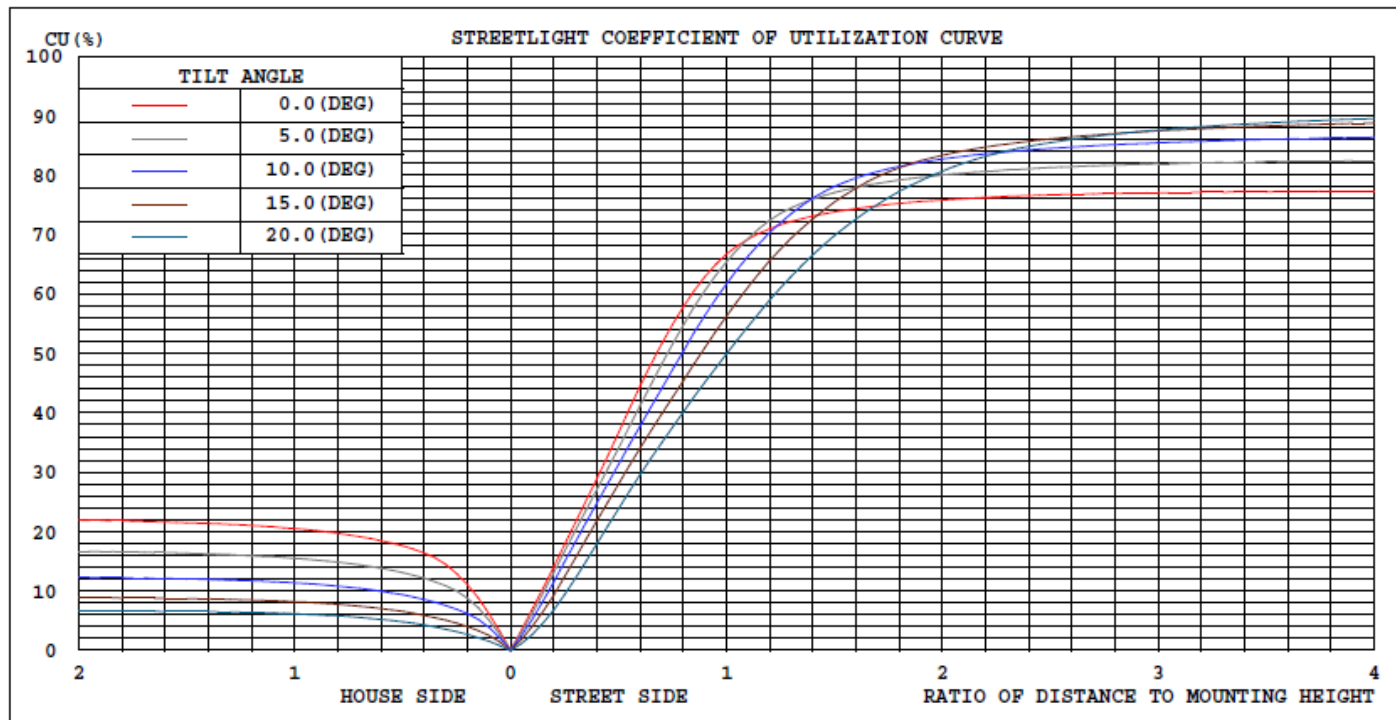
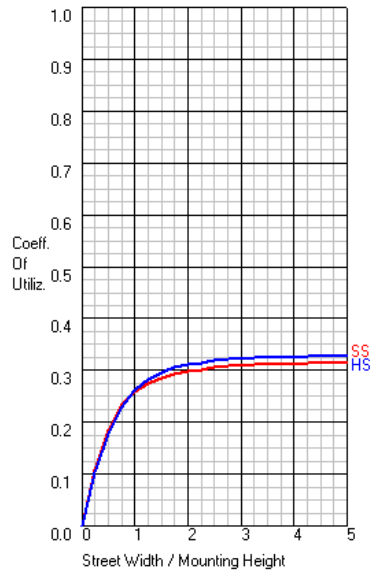


Figura 15. Coeficiente de utilización luminaria DELTA LED. Reproducido con permiso de Celsa (2013) (Qtest, 2013)



Distribución de Flujo	Lúmenes	Porcentaje de la lámpara (%)
Hacia la calle	8929,9	31,6
Hacia la casa	9335,3	33,0
total	18265,2	64,6

Figura 16. CU luminaria VENUS SAP - P2.
Reproducido con permiso de (CELSA S.A.S, 2014d)

3. REQUISITOS PARA EL DISEÑO DE ILUMINACIÓN DE ALUMBRADO PÚBLICO

El alumbrado público tiene como objetivo proporcionar la visibilidad adecuada y de calidad, para el normal desarrollo de las actividades, tanto vehiculares como peatonales, garantizando seguridad a los usuarios. Así como también facilitar la preservación del orden público y brindar un aspecto estéticamente atractivo para las vías.

Para el correcto desarrollo del diseño de iluminación, es fundamental tener en cuenta los requerimientos de visibilidad, con el fin de garantizar que tanto conductores como peatones puedan percibir de manera cómoda, rápida y segura el contorno de la vía, y los obstáculos fijos o móviles que puedan presentarse en ella. Para esto, se debe tener en cuenta de manera conjunta, la confiabilidad de la percepción y la comodidad visual, las cuales están resueltas en la medida que haya la cantidad y calidad de luz adecuada sobre el área observada de acuerdo con la actividad prevista.

Confiabilidad de la percepción. Para que un objeto sea percibido, éste debe tener un contraste superior al mínimo requerido por el ojo. Este valor depende del ángulo con el que se vea y de la distribución de la luminancia en el campo visual del observador.

El criterio de seguridad se consigue cuando el alumbrado permite a los usuarios evitar un obstáculo cualquiera. El concepto se basa en medir la visibilidad de un objeto referencia de 0.2 m x 0.2 m

con un factor de reflexión de 0.15. Donde se obtiene seguridad cuando:

- Un peatón puede distinguir un objeto a 10 m de distancia.
- Un automovilista puede percibir un obstáculo a una distancia hasta de 100 m si su velocidad es de 60 km/h. Y para velocidades mayores, la distancia debe oscilar entre 100 m y 200 m.

El sistema de iluminación depende de la densidad, naturaleza y velocidad de circulación, afectando con ellos la noción de seguridad. Para las carreteras, donde la velocidad es generalmente superior a 60 km/h y los obstáculos no son muy frecuentes, la iluminación se concentra en proveer una guía visual del camino. Mientras que para la iluminación de cascos urbanos, donde los obstáculos son más frecuentes y la velocidad es reducida, ésta debe enfocarse en una percepción rápida de los objetos.

Para garantizar una buena confiabilidad en la percepción, la iluminación debe proveer un elevado nivel de luminancia promedio mantenido en el fondo, un bajo nivel de luminancia para el obstáculo y un límite de deslumbramiento fisiológico desde las fuentes de luz.

Comodidad visual. Es una importante característica en la seguridad del tráfico vehicular. La ausencia de comodidad, provoca falta de concentración en los conductores, reduciendo velocidad de reacción debido al cansancio que se produce en sus ojos.

La instalación de alumbrado público proporciona un mejor grado de comodidad visual, si el ojo del conductor tiene mejores niveles de adaptación. Por lo tanto la iluminación debe brindar una elevada luminancia promedio sobre la vía y garantizar una buena uniformidad longitudinal, con el fin de no tener sectores transversales a la vía bien iluminados seguidos de otros con poca iluminación, lo cual provoca el efecto cebrá y por ende fatiga visual del conductor.

Una instalación urbana necesita mayores niveles de comodidad visual a fin de reducir la tensión nerviosa de los conductores, y debe considerar la iluminación de aceras y fachadas, creando un ambiente más agradable. Para la instalación de alumbrado público de una carretera, la iluminación debe centrarse en la vía con el fin de mantener la concentración del conductor sobre el carril de circulación y la geometría de la vía, elevando la seguridad por la velocidad de circulación.

Es importante crear una superficie clara sobre la vía y los alrededores, con el fin de obtener una buena visibilidad de las señales de tránsito y los objetos al borde de la vía. Esto se logra con la **relación de alrededores** que consiente en controlar el contraste de iluminación para una percepción segura en el tiempo requerido por el conductor, facilitando la apreciación adecuada del entorno y permitiendo al conductor realizar las maniobras necesarias de manera segura.

Todos los proyectos de alumbrado público deben incluir el costo inicial, costo de operación y mantenimiento asociado y el valor de reposición al final de la vida útil del proyecto. Además es

importante definir cargas operativas, ahorros energéticos por diferentes fuentes utilizadas y niveles de pérdidas en el alumbrado público. Dichos costos son realizados en la **evaluación económica y financiera**.

Un proyecto de alumbrado público está obligado a aplicar el **uso racional y eficiente de la energía**, con el fin de lograr la mayor eficiencia energética, el desarrollo sostenible y la protección del consumidor. Para alcanzar dicho propósito, se requiere el uso de fuentes de alta eficacia lumínica y luminarias de mayor eficiencia.

Por otra parte, un diseño de alumbrado público debe considerar también aspectos como los requerimientos estéticos basados en el mobiliario urbano, donde se debe tener en cuenta el estilo arquitectónico predominante en el sector y las condiciones particulares del medio (agentes corrosivos y facilidad de mantenimiento), en especial los niveles de contaminación atmosférica que determinan las características de hermeticidad y protección de las luminarias (Ministerio de Minas y Energía, 2010) (UAESP, 2004).

3.1. Metodología y Reglamentación

Para el adecuado desarrollo de un diseño de iluminación de vías vehiculares, se debe seguir el procedimiento mostrado en la Figura 17. Todo diseño de iluminación debe empezar con el **análisis del proyecto** donde se estudian los datos suministrados, con el fin de conocer cuáles son las necesidades y estética de iluminación.

Basado en los datos de velocidad y flujo vehicular de la vía a iluminar, y utilizando la Tabla 4 se asigna la clase de iluminación necesaria según RETILAP (2010). Conocida la clasificación de la vía, se seleccionan los requisitos fotométricos mínimos mantenidos a través del tiempo, los cuales ya están definidos en el reglamento y se presentan en la Tabla 3.

Hay tramos viales como son las glorietas, cruces, entradas a divergencias o convergencias, rampas etc. En general áreas diferentes a los tramos típicos de la vía, que requieren de unos niveles más elevados de iluminación para una mayor seguridad en las vías vehiculares. Estas áreas son consideradas según RETILAP (2010) como áreas críticas. Su clasificación está definida en la Tabla 5 y los requisitos fotométricos en la Tabla 6.

Tabla 3. Requisitos fotométricos mantenidos para vías motorizadas, con base en la luminancia de la calzada

Clase de iluminación	Zonas de aplicación				
	Todas las vías		Vías sin o con pocas intersecciones		Vías con calzadas peatonales no iluminadas
	Luminancia promedio L_{prom} (cd/m ²) Mínimo mantenido	Factor de uniformidad Uo Mínimo	Incremento de umbral TI % Máximo inicial	Factor de uniformidad longitudinal de luminancia Ul Mínimo	Relación de alrededores SR Mínimo
M1	2.0	0.4	10	0.5	0.5
M2	1.5	0.4	10	0.5	0.5
M3	1.2	0.4	10	0.5	0.5
M4	0.8	0.4	15	N.R	N.R
M5	0.6	0.4	15	N.R	N.R

NR: No requerido.

Tabla 4. Clases de iluminación para las vías vehiculares

Clase de iluminación	Descripción de la vía	Velocidad de circulación (km/h)		Tránsito de vehículos T(veh/h)	
M1	Autopistas y carreteras	Extra alta	V>80	Muy importante	T>1000
M2	Vías de acceso controlado y vías rápidas	Alta	60<V<80	Importante	500<T<1000
M3	Vías principales y ejes viales	Media	30<V<60	Media	250<T<500
M4	Vías primarias o colectoras	Reducida	V<30	Reducida	100<T<250
M5	Vías secundarias	Muy reducida	Al paso	Muy reducida	T>100

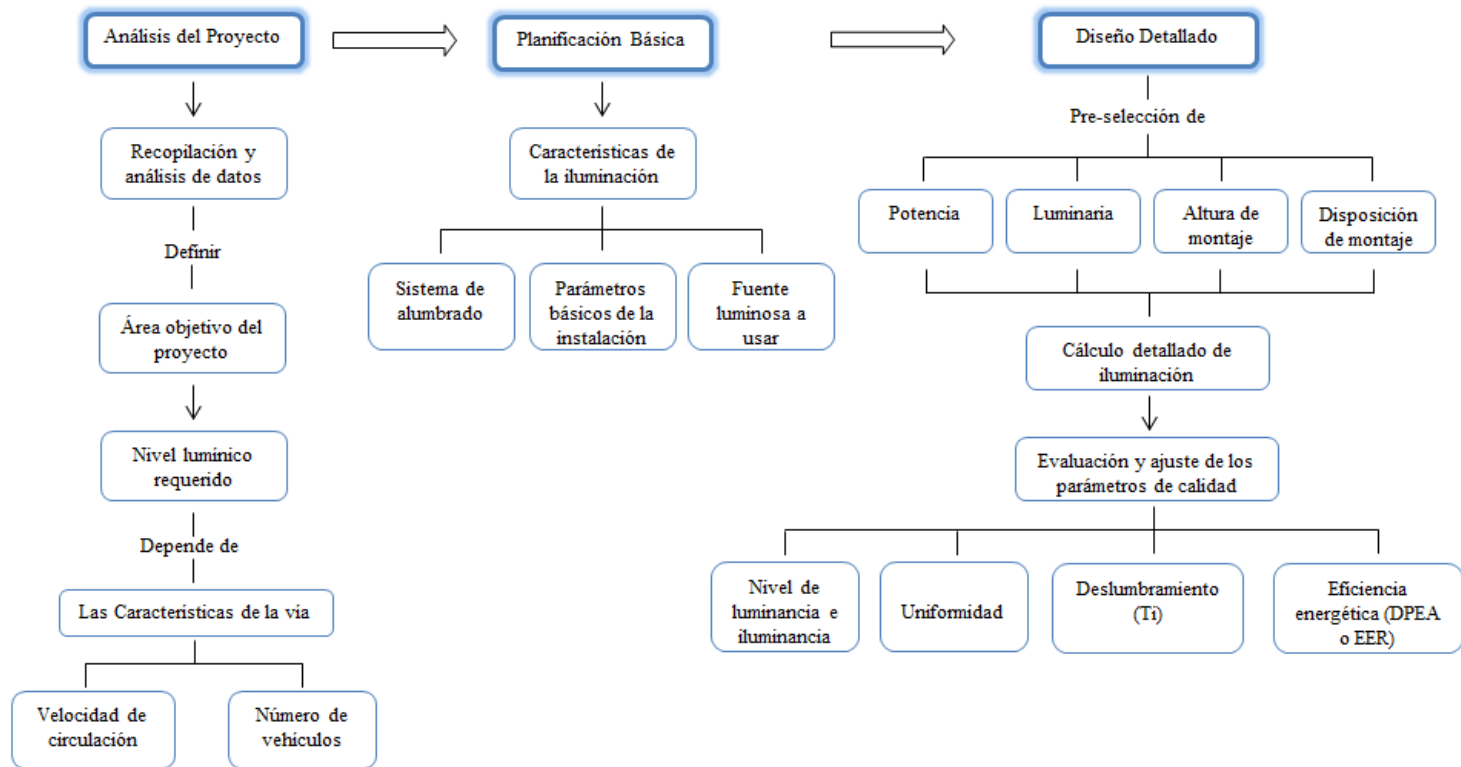


Figura 17. Proceso diseño de iluminación vial

Tabla 5. Clases de iluminación en áreas críticas

Área crítica	Clase de iluminación del área crítica (C) según clase de la vía a la que pertenece (M)
Pasos subterráneos	C(N)=M(N)
Intersecciones, cruces, rampas, puentes, entradas a divergencia o convergencias, áreas con ancho de carril restringido	C(N) si M(N)
Cruces ferroviarios	
Simples	C(N) si M(N)
Complejos	C(N-1) si M(N)
Glorietas sin señalización	
Grandes	C1
Medianas	C2
Pequeñas	C3
Área vehicular en fila de espera	
Grandes	C1
Medianas	C2
Pequeñas	C3

N: número de clase

Después de definir los niveles de iluminación requeridos, se procede a realizar la planificación básica donde se establece un perfil de las características que debe tener la instalación, se define el sistema de alumbrado, se selecciona la fuente luminosa y la estrategia para la adecuada integración de la iluminación artificial con la estética del lugar. En ésta etapa se deben aclarar todas las dudas técnicas y detalles difíciles de identificar en los planos.

Tabla 6. Requisitos fotométricos para áreas críticas

Clase de iluminación	Iluminación mínima mantenida (lx) sobre toda la superficie	Uniformidad general $U_{0 \geq}$ (%)
C0	50	40
C1	30	40
C2	20	40
C3	15	40
C4	10	40
C5	7.5	40

Por último se realiza el **diseño detallado** donde se definen los aspectos específicos del proyecto como: la potencia, la luminaria, altura de montaje y disposición de los postes más adecuados según el nivel requerido y el perfil de la vía. Se debe tener en cuenta que la luminaria y fuentes seleccionada debe estar acreditada por RETILAP (2010) y la elección de dichos productos debe estar basado en las características fotométricas, la eficacia lumínica, flujo luminoso, reproducción cromática, duración y vida útil de la fuente, todo esto acorde a las actividades y objetivos de uso de los espacios a iluminar, teniendo en cuenta las condiciones arquitectónicas y ambientales.

Luego de hacer una selección preliminar de los aspectos mencionados anteriormente, se realiza el diseño de iluminación a través del *software litestar*, con el fin de verificar el cumplimiento de los niveles requeridos en el diseño y realizar los ajustes necesarios para su cumplimiento. En esta etapa también se debe evaluar la eficiencia energética de la instalación, ya que todo diseño de alumbrado público debe tener presente el uso racional y

eficiente de la energía. Si la vía es inferior a 60 km/h dicho concepto está determinado por la densidad de potencia para alumbrado de vías (DPEA), el cual no puede exceder los valores presentados en la Tabla 7.

El DPEA se calcula a partir de la carga total conectada para alumbrado y del área total por iluminar sin incluir las áreas destinadas a aceras o similares, si en el diseño no los contemplan como áreas objeto de iluminación, como es mostrado en la ecuación 2. (Ministerio de Minas y Energía, 2010)

$$DPEA = \frac{\text{Carga total conectada para alumbrado}}{\text{área total iluminada}} \quad (2)$$

P: potencia en W

L: luminancia mantenida en Cd/m²

S: área en m²

Si la vía es superior a 60 km/h, la máxima densidad de potencia aceptada es 0.8 W/Cd y es determinada por el criterio de Energy Efficiency Ratio (EER), cuya fórmula es presentada en la ecuación 3.

$$EER = \frac{P}{L * S} \quad (3)$$

Tabla 7. Valores máximos de densidad de potencia eléctrica

Nivel mantenido de iluminancia promedio	Densidad de potencia (W/m ²) según ancho de la calzada (m)				
	<6	6 a 8	8,1 a 10	10,1 a 12	12,1 a 14
lx					
3	0,29	0,26	0,23	0,19	0,17
4	0,35	0,32	0,28	0,26	0,23
5	0,37	0,35	0,33	0,30	0,28
6	0,44	0,41	0,38	0,35	0,31
7	0,53	0,49	0,45	0,42	0,37
8	0,60	0,56	0,52	0,48	0,44
9	0,69	0,64	0,59	0,54	0,50
10	0,76	0,71	0,66	0,61	0,56
11	0,84	0,79	0,74	0,67	0,62
12	0,91	0,86	0,81	0,74	0,69
13	1,01	0,94	0,87	0,80	0,75
14	1,08	1,01	0,94	0,86	0,81
15	1,12	1,06	1,00	0,93	0,87
16	1,17	1,10	1,07	0,99	0,93
17	1,23	1,17	1,12	1,03	0,97
18	1,33	1,26	1,20	1,10	1,04
19	1,40	1,33	1,26	1,17	1,10
20	1,47	1,39	1,33	1,23	1,16
21	1,55	1,46	1,39	1,29	1,22
22	1,62	1,53	1,46	1,35	1,27
23	1,69	1,6	1,53	1,41	1,33
24	1,76	1,57	1,59	1,47	1,39
25	1,83	1,73	1,66	1,53	1,45
26	1,90	1,80	1,73	1,60	1,51

4. DISEÑO DE ILUMINACIÓN AV 3^{era} NORTE-SAMECO, CALI

El diseño de iluminación se realizó en el software *litestar* siguiendo los pasos presentados en el numeral 3.1.

Las vías de alto flujo vehicular deben ser evaluadas por el criterio de luminancia mediante tramos típicos, las áreas críticas son realizadas por criterio de iluminancia y se realizan en un detalle, es decir tomando todo el tramo objeto del cálculo. En la Figura 18 se presenta el montaje de uno de los tramo típico realizado en el diseño, allí se puede observar que la luminaria de SAP tiene inclinación y la de LED no, además se muestra la distribución del flujo luminoso mediante el render de colores falsos, donde se puede observar que en este tramo se obtiene una mejor uniformidad en la vía con la luminaria DELTA LED.

La clasificación de las vías fue especificada por quien solicitó el diseño del proyecto de iluminación.

Ver anexo A, donde se presentan las memorias de cálculo de los diferentes tramos analizados, cada uno realizado en LED, CMH y SAP. Adicionalmente se muestra el plano con la disposición de luminarias utilizando tecnología LED.

En las Tabla 8, Tabla 9, Tabla 10, Tabla 11 y Tabla 12 presentadas a continuación, se muestra un resumen de los resultados obtenidos de las partes más representativas del proyecto al realizar el diseño de iluminación. En cada tabla se muestran los niveles que se deben cumplir según el RETILAP (2010) y los resultados obtenidos con cada tecnología.

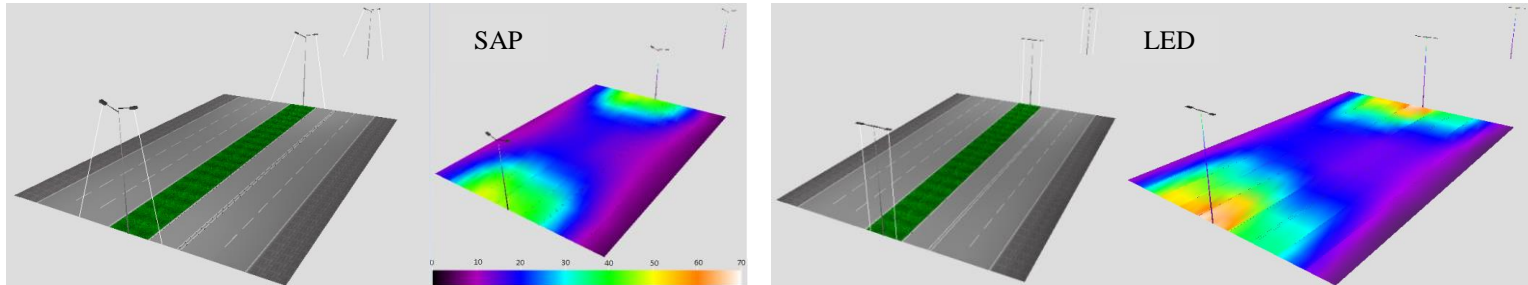


Figura 18. Ubicación de luminarias Software *litestar*

Tabla 8. Áreas Críticas C2, (20 lx – 40 % de Umed)

Cálculo 11			
Resultados	SAP	CMH	LED
Emed (Lx)	31	30	36
Umed	0.45	0.44	0.42
Cálculo 12			
Resultados	SAP	CMH	LED
Emed (Lx)	23	22	37
Umed	0.47	0.47	0.48

Tabla 9. Áreas Críticas C1, (30 lx – 40 % de Umed)

Cálculo 1			
Resultados	SAP	CMH	LED
Emed (Lx)	40	35	39
Umed	0.43	0.43	0.43
Cálculo 3			
Resultados	SAP	CMH	LED
Emed (Lx)	39	39	33
Umed	0.48	0.47	0.4
Cálculo 5			
Resultados	SAP	CMH	LED
Emed (Lx)	41	38	40
Umed	0.4	0.4	0.41
Cálculo 6			
Resultados	SAP	CMH	LED
Emed (Lx)	34	34	36
Umed	0,51	0.51	0.48
Cálculo 7			
Resultados	SAP	CMH	LED
Emed (Lx)	31	30	30
Umed	0.51	0.52	0.42

Cálculo 9

	SAP	CMH	LED
Emed (Lx)	43	38	32
Umed	0.43	0.44	0.47
Cálculo 13			
	SAP	CMH	LED
Emed (Lx)	-	30	34
Umed	-	0.52	0.43
Cálculo 14 - 1^{er} cruce			
	SAP	CMH	LED
Emed (Lx)	30	30	31
Umed	0.58	0.61	0.67

Tabla 10. Resumen de resultados cálculo 4, vía M2

Cálculo 4				
Resultados	SAP	CMH	LED	Requerimientos
Lprom (cd/m2)	1.57	1.6	1.5	1.2
Uo	0.4	0.4	0.51	0.4
Ul	0.86	0.87	0.86	0.5
Sr	0.76	0.86	0.88	0.5
Ti (%)	8.26	8.8	6.24	10
Emed Vía (Lx)	27	28	29	-
Umed Via	0.47	0.46	0.57	-
Emed Anden	12	10	13	10
Umed Anden	0.73	0.76	0.6	33
EER (w/cd)	0.36	0.42	0.31	<0.8

En el proyecto presentado, las vías están clasificadas como M2 y M4. Por lo tanto el método utilizado para el análisis de eficiencia energética es EER para las vías tipo M2 y DPEA para la vía tipo M4. Ver anexo B, donde se muestra el cálculo de la eficiencia

energética para cada tramo. En la Tabla 10, Tabla 11 y Tabla 12 se encuentran los resultados.

Tabla 11. Resumen de resultados cálculo 8, vía M2

Cálculo 8				
Resultados	SAP	CMH	LED	Requerimientos
Lprom (cd/m²)	1.57	1.55	1.6	1.2
Uo	0.4	0.41	0.51	0.4
UI	0.86	0.78	0.69	0.5
Sr	0.76	0.95	0.91	0.5
Ti (%)	8.26	9.33	6.85	10
Emed Vía (Lx)	27	26	29	-
Umed Vía	0.47	0.44	0.57	-
Emed Anden	12	10	14	10
Umed Anden	0.73	0.69	0.5	33
EER (w/cd)	0.55	0.56	0.47	<0.8

Tabla 12. Resumen de resultados cálculo 10, vía M4

Cálculo 10				
Resultados	SAP	CMH	LED	Requerimientos
Lprom (cd/m²)	1.01	0.95	1.04	0.8
Uo	0.48	0.48	0.6	0.4
UI	0.85	0.85	0.72	NR
Sr	0.84	0.84	0.96	NR
Ti (%)	7.86	7.75	7.21	15
Emed Vía (Lx)	16	15	20	12
Umed Vía	0.52	0.52	0.53	25
Emed Anden	8	8	14	6
Umed Anden	0.73	0.73	0.65	33
DPEA(w/m²)	0.70	0.70	0.76	<0.93

5. ANÁLISIS ECONÓMICO

Según el RETILAP (2010), el proyecto debe ser evaluado sobre la inversión inicial y sobre los costos de operación, mantenimiento y reposición de elementos cuya vida útil sea inferior a 30 años, a precios constantes de la fecha de presentación del proyecto.

Para realizar el análisis económico exigido por RETILAP (2010) se parte del costo inicial (CI) dado por cada propuesta, es decir el valor de cada luminaria multiplicado por la cantidad utilizada. En la Tabla 13 se puede observar que el CI de las tecnologías de SAP y CMH son solo el 13,48 % y el 15,38 % del CI de la tecnología LED respectivamente; debido a su constante desarrollo y proceso de fabricación complejo, el precio de un módulo LED es aproximadamente 10 veces más que una lámpara convencional, el driver cuesta alrededor de tres veces más que el conjunto eléctrico completo de una luminaria de SAP o CMH, además al necesitar el modulo LED un disipador, la luminaria requiere cerca de tres kilos más de material en el chasis, todos estos factores afectan directamente el valor final de la luminaria LED, que la hacen 7 veces más costosa que una luminaria de SAP o CMH.

Para continuar con el análisis, se elabora para cada propuesta el Costo Anual de Operación y Mantenimiento (CAOM), en este caso proyectado a 30 años según RETILAP (2010); dicho análisis comienza por desglosar el mantenimiento para cada luminaria, donde se realiza el cambio de: lámpara, equipos eléctricos, carcasa, y limpieza del conjunto óptico. A continuación se describe cada ítem.

La acumulación de suciedad en el conjunto óptico de las luminarias afecta la eficiencia, y por consiguiente, disminuyen los

niveles de iluminación de la instalación de alumbrado público. Con el fin de garantizar los niveles requeridos, es necesario realizar periódicamente la limpieza de la luminaria, éste tiempo es determinado según el RETILAP (2010) por las propiedades de hermeticidad de la luminaria y por las condiciones ambientales del sitio de instalación. Las luminarias utilizadas en este proyecto poseen un grado IP 66, donde el conjunto óptico es completamente sellado, para este proyecto según RETILAP (2010) el nivel de contaminación es III; ya que es un ambiente muy polucionado, por lo tanto, la limpieza debe ser realizada cada 12 meses.

El cambio de la carcasa según el RETILAP (2010) para zonas normales como en este caso, debe ser realizado a los 15 años de operación.

Al disminuir el flujo luminoso al 70 % es necesario según el RETILAP (2010) que la lámpara sea sustituida, por lo tanto, esto se realiza cada 3 años para SAP, 2 años para CMH y cada 15 años para el modulo LED; ya que después del periodo de tiempo especificado para cada tecnología, el flujo ya no cumple los requerimientos necesarios, como es mostrado en la Figura 7.

El cambio del equipo eléctrico para SAP y CMH es cada 5 años, tiempo recomendado según el fabricante de las luminarias. El driver de la luminaria LED debe ser reemplazado cada 15 años según el fabricante del mismo (CELSA S.A.S, 2014e) (Universal Lighting Technologies, 2013).

Cada tecnología tiene un consumo energético diferente, por lo tanto es necesario incluir en el CAOM el consumo anual de dichas luminarias en el periodo presupuestado de evaluación del

proyecto. Para éste análisis es obligatorio determinar el consumo total de las luminarias incluyendo las pérdidas, luego esta potencia es multiplicada por 12 horas de trabajo, 7 días a la semana, 52 semanas del año y el precio del kWh. Debido a que no se conoce la tarifa del suministro de energía eléctrica destinada para el alumbrado público, negociada entre el municipio de Cali y EPSA, para efectos de este estudio se supondrá que no ha sido pactada, por consiguiente según la CREG 123 (2011) “la tarifa será la correspondiente al usuario regulado del sector oficial en el nivel de tensión en el cual se encuentre conectado el medidor”. Por lo tanto el precio utilizado es de 363,22 \$/kWh según la tarifa para el cliente regulado no residencial en el nivel de tensión I de EPSA enero 16 de 2015 (EPSA, 2015). Sin embargo, en la Figura 20 y Figura 21 se presenta el comparativo económico al disminuir la tarifa a 300 \$/kWh y 260 \$/kWh respectivamente.

Finalmente el CAOM para cada año, es la suma de cada una de las componentes mencionadas anteriormente. Debido a que este proyecto solo genera gastos, se debe evaluar cuál es la alternativa más viable, que genere menor egreso en consumo energético y mantenimiento. Para evaluar el concepto mencionado, es necesario utilizar el Costo Anual Uniforme Equivalente (CAUE). La tecnología que dé como resultado un menor valor de CAUE será la más viable económicamente (Ramírez, 2010).

$$Pt = CI + VP(CAOM) \quad (4)$$

$$VP(CAOM) = CAOM \left(\frac{(1+i)^n - 1}{i(1+i)^n} \right) \quad (5)$$

$$CAUE = CAOM - VP(VS) + \frac{CI}{(1+i)^n} \quad (6)$$

El CAUE es el pago anualizado del valor total (Pt) con un interés del 13,9 % (tasa de descuento) en un período determinado, en este caso, 30 años (Ramírez, 2010). El Pt ecuación (4), está compuesto por el CAOM traído a valor presente neto, sumado con el costo de inversión inicial (CI). El CAOM traído a valor presente neto se halla mediante la ecuación (5), donde i es la tasa de descuento del 13,9 % según el documento CREG-102 (2011b) y n es el tiempo de evaluación en este caso 30 años.

Finalmente el CAUE está compuesto por el CAOM menos el valor de salvamento al final de la vida útil, más el valor presente total del proyecto por el factor de anualidad, como es mostrado en la ecuación (6). Se debe tener en cuenta que el valor de la vida útil remanente del sistema de iluminación (VS), es nulo para la evaluación de proyectos de alumbrado público según el RETILAP (2010), con el fin de simplificar el procedimiento sin afectar el resultado.

Ver anexo C donde se presentan las tablas de costo inicial, CAOM, CAUE y resumen.

Como puede observarse en la Tabla 13 el CAUE del LED es menor que el CAUE del SAP y el CMH en una proporción de 31 % y 34 % respectivamente, por lo tanto el LED es más viable económicamente ya que genera un menor costo de operación y mantenimiento.

En la Figura 19 se puede observar el CAOM para cada tecnología, donde el SAP y el CMH son similares, con picos constantes ya que el cambio de lámpara y el conjunto eléctrico debe ser realizado frecuentemente. El CAOM del LED es más contante, pero presenta un sobrecosto en el año 16, ya que en ésta fecha debe ser sustituido el modulo LED y el driver. En dicha figura también se presenta la diferencia del CAOM entre las tecnologías SAP-LED y CMH-LED, se puede observar que al inicio del proyecto el LED es más costoso que las otras dos tecnologías, pero a comienzo del año 4 esta diferencia se iguala debido a los costos elevados de operación y manteniendo del SAP y CMH. A partir del quinto año se empiezan a notar los sobrecostos en operación y mantenimiento que se tienen con la tecnología convencional en comparación con los del LED.

La diferencia del CAOM entre el LED, SAP y CMH, se da principalmente por el consumo de energía eléctrica, ya que para este proyecto utilizando SAP o CMH es necesario el 57 % más de

la potencia que al utilizar tecnología LED. En segundo lugar, también se ve un gasto significativo al tener que sustituir con mayor frecuencia las lámparas y el conjunto eléctrico en la tecnología convencional.

En la Figura 20 y Figura 21, se muestra el mismo comparativo del CAOM entre las diferentes tecnologías como en la Figura 19, pero con una tarifa del suministro de energía eléctrica de 300 \$/kWh y 260 \$/kWh respectivamente. En dichas figuras se logra apreciar que debido al costo elevado del mantenimiento y alto consumo energético de las luminarias de SAP y CMH, la inversión inicial del LED es recuperada entre los años cinco y seis de operación. A pesar de que se demora más tiempo en ser recuperada la inversión, el proyecto en LED sigue siendo viable económicamente, ya que como se puede observar, los costos de operación y mantenimiento del SAP y el CMH son significativamente más altos que los del LED después de 6 años de operación.

Tabla 13. Resumen análisis económico

UBICACIÓN DEL PROYECTO	TECNOLOGÍA	INDICADOR					
		VP (CAO)	CI	VS	Pt	CAUE	CAOM
AV 3era NORTE-SAMECO,CALI	LED	\$1.500.139.374,61	\$875.050.000,00	\$0,00	\$2.375.189.374,61	-\$336.940.888,76	\$10.871.264.978,53
	SAP	\$3.329.618.385,33	\$117.986.600,00	\$0,00	\$3.447.604.985,33	-\$489.072.197,90	\$22.593.979.222,11
	CMH	\$3.456.438.231,82	\$134.614.500,00	\$0,00	\$3.591.052.731,82	-\$509.421.485,29	\$23.361.050.408,68

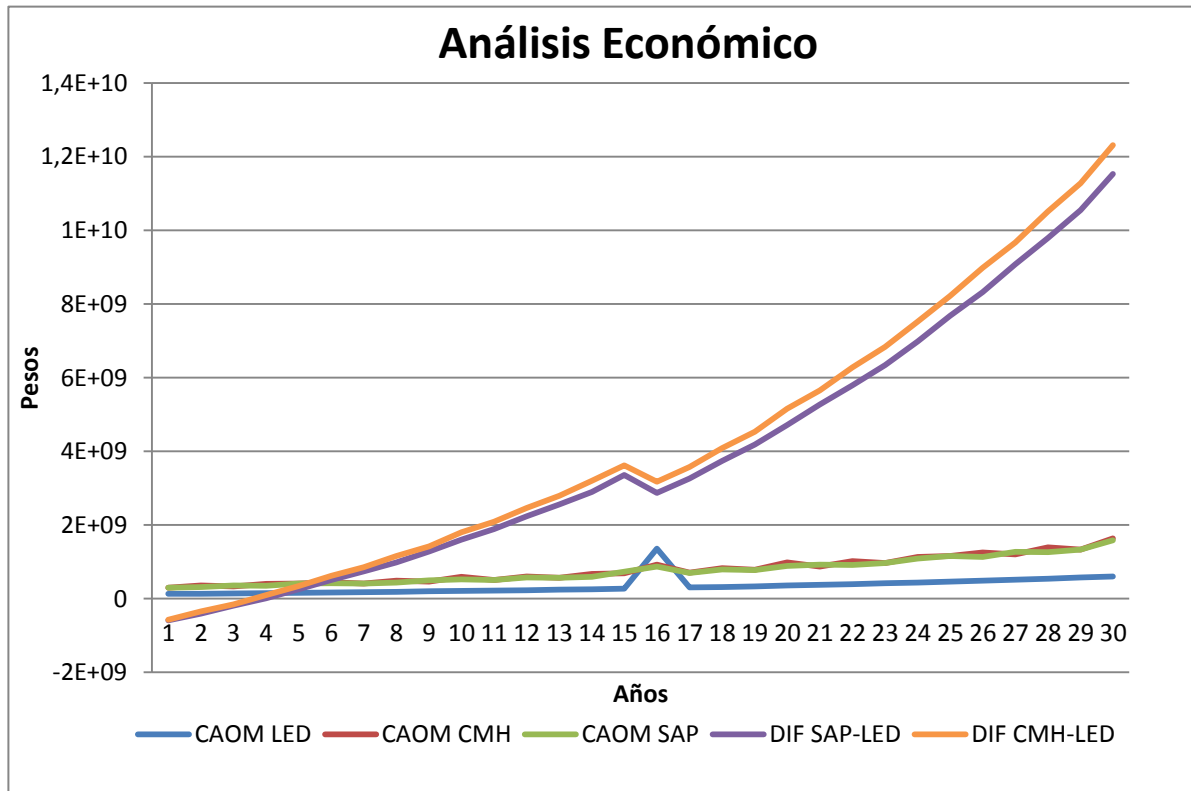


Figura 19. Análisis económico a 363,22 \$/kWh

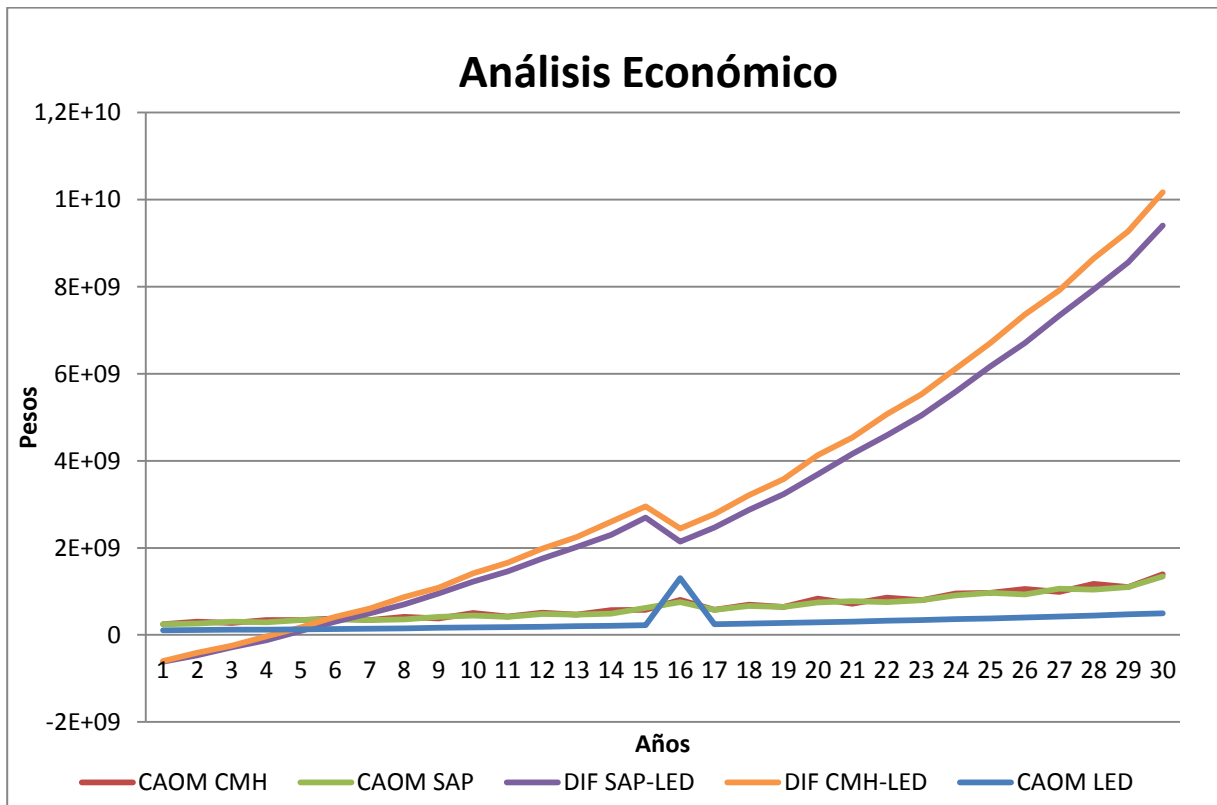


Figura 20. Análisis económico a 300 \$/kWh

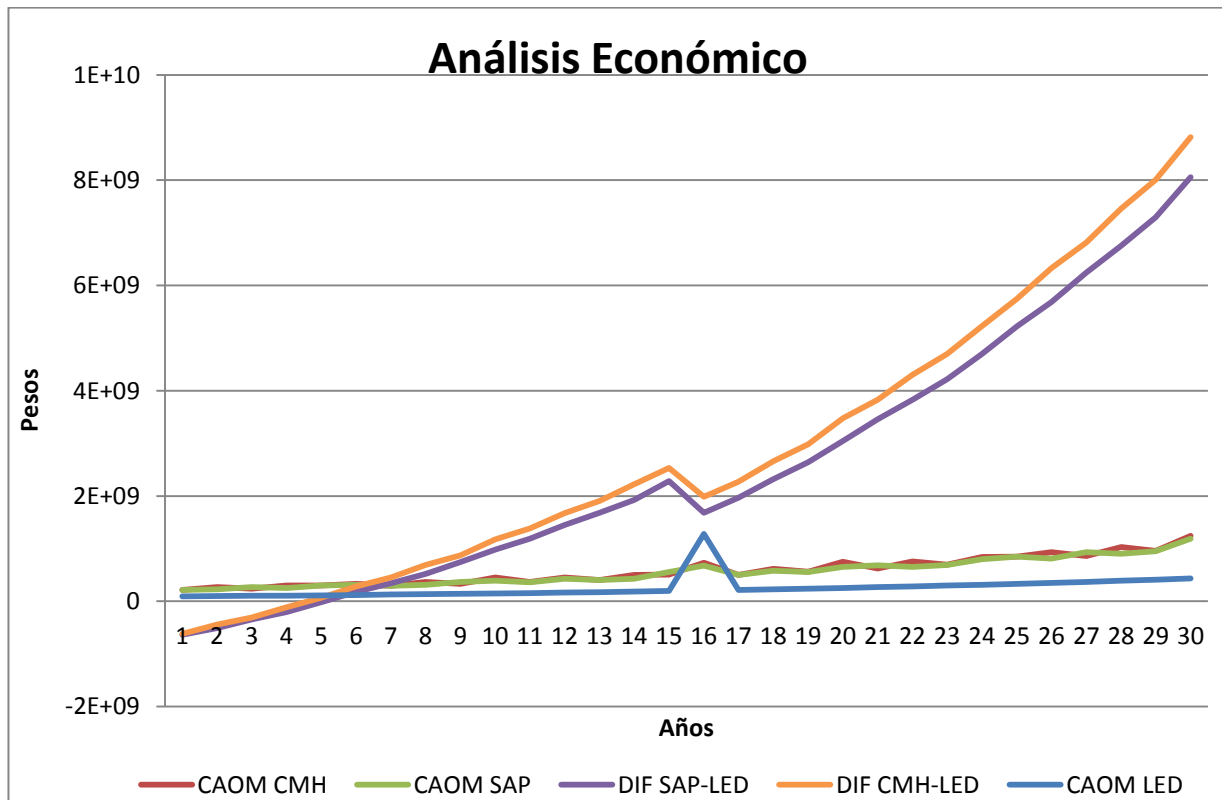


Figura 21. Análisis Económico a 260 \$/kWh

6. BENEFICIOS E INCONVENIENTES DEL LED

6.1. Beneficios medioambientales

El cuidado del planeta es algo que se debe tener en cuenta desde todas las áreas, por ello es importante conocer que impacto medioambiental genera las fuentes luminosas comparadas en este proyecto.

Según el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (2010) solo en Colombia en el año 2007, se consumieron en el mercado local 6.8 millones de lámparas de mercurio, haluros y sodio. Estas lámparas de CMH y SAP al contener mercurio y otros gases, son dispositivos considerados como residuos peligrosos por ser altamente tóxicos, muy contaminantes, y que representan un gran riesgo para la salud de los seres vivos, por lo tanto la disposición final de las lámparas debe ser realizada por personal capacitado, los tubos de descarga deben ser almacenados en contenedores de materiales que no reaccionen con el mercurio. Como material reciclable solo pueden ser destinados los elementos metálicos como el casquillo, los alambres y el vidrio (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2012). Según la resolución 0976 del 27 de noviembre de 2012 las operaciones de manejo de los residuos de lámparas, debe ser realizado siguiendo el procedimiento descrito a continuación:

- Transporte para la recolección de residuos de bombillas con un mínimo de 100 kg por recolección.
- Reducción de volumen en maquinaria trituradora.
- Almacenamiento temporal en bodega de seguridad.
- Envío al exterior de los residuos.
- Tratamiento físico químico, recuperación y destilación.
- Expedición y entrega de certificados de disposición final.

Los módulos LED por el contrario de las lámparas de descarga no poseen agentes contaminantes como el mercurio, por lo tanto solo se deben seguir la normativa correspondiente a la disposición de residuos electrónicos para re-uso y reciclaje de sus componentes, si es necesario los residuos deben ser depositados en rellenos sanitarios de seguridad (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010b).

Las emisiones de CO₂ están directamente relacionadas con el consumo energético del proyecto. Por esto es doble beneficio la tecnología que consuma menos energía en su operación.

Al tomar como factor de emisión 0,3060 kg CO₂/kWh dado por la UPME (2010), y multiplicarlo por el consumo de energía eléctrica

de cada tecnología al año, se obtienen las emisiones anuales de CO₂ generadas por el proyecto de iluminación AV 3^{era} Norte-Sameco de Cali con cada propuesta (UPME, 2009). En la Tabla 14 se presentan los resultados, donde se puede observar que el uso de la tecnología LED en comparación con las otras tecnologías consume aproximadamente 42 % menos de energía y deja de emitir este mismo porcentaje de CO₂ en un año. En la Figura 22 se puede observar que el SAP y el CMH emiten mayor cantidad de gases de efecto invernadero a la atmósfera que el LED.

Tabla 14. Energía consumida y emisiones de CO₂ anuales

	SAP	CMH	LED
kWh	770515,2	773572,8	329958,72
Tn CO₂	235,78	236,713	100,98

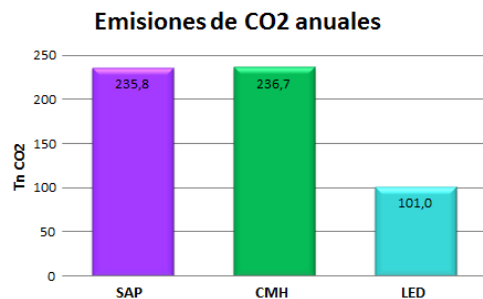


Figura 22. Toneladas de CO₂ emitidas por cada tecnología

6.2. Beneficios técnicos

Se debe destacar de las luminarias LED su estructura; cada chip LED que compone el módulo tiene integrado el lente y reflector, como es mostrado en la Figura 23, por lo tanto ya viene definido la apertura del haz de luz, obteniendo así direccionalidad del flujo luminoso, y siendo mucho más eficientes que las luminarias de SAP y CMH, las cuales para redirigir el flujo de la lámpara es necesario el uso de difusor y reflector generando pérdidas significativas en el flujo total de la luminaria.



Figura 23. Módulo y lente LED

Las luminarias LED al ser dispositivos electrónicos tienen varias ventajas respecto a las luminarias de SAP y CMH como lo son:

- Alcanzan en segundos su potencia nominal, mientras que las luminarias de SAP y CMH tardan aproximadamente 30 minutos.
- Permite dimerización, con un rango más amplio que las luminarias de SAP y CMH, variando su flujo desde 0 % hasta el 100 %. Al ser el LED un semiconductor, este puede ser ionizado con baja corriente y producir luz con una menor intensidad y menor consumo, mientras que las luminarias de SAP y CMH solo pueden ser dimerizadas de 65 % a 100 % de su potencia; ya que con una potencia nominal inferior al 65 % el mantenimiento de lúmenes y la presentación de colores pueden ser substancialmente afectadas, y con una potencia inferior al 50 % no se podría generar el arco necesario encargado de evaporar los gases para la emisión de luz (Lojana & Orellana, 2014).
- Más resistentes. Pueden soportar mucho más las vibraciones y los golpes.
- Flujo más constante. Al contrario de las luminarias de SAP y CMH, la luminaria LED gracias a la estabilidad del driver no se ven afectadas por los armónicos que hayan en la red (Carachure & Sandoval, 2011) (Hernández, 2013).

- Emiten poco calor, por lo tanto tiene un alto rendimiento luminoso. Las pérdidas por calor son inferiores al 10% de la energía consumida, mientras que las luminarias de SAP y CMH, presentan pérdidas por calor aproximadamente del 50%; ya que estas requieren esa energía térmica para poder producir el flujo lumínico necesario (Macías, Ramos, & Ulianov, 2012).

6.3. Inconvenientes de la tecnología LED

- Costo inicial elevado.
- El desarrollo tecnológico exponencial, es decir el aumento de la eficacia del LED provoca que las instalaciones realizadas hoy, probablemente estén desactualizadas antes de su amortización.
- Al ser un dispositivo electrónico es muy sensible, por lo tanto un transitorio puede provocar su destrucción.
- El buen funcionamiento del LED depende de su temperatura de trabajo, por lo tanto un aumento excesivo y mantenido en ella promoverá la depreciación del flujo emitido y disminuirá de manera significativa su vida útil. Es indispensable que la disipación térmica de la luminaria permita cumplir las especificaciones térmicas del fabricante del módulo LED.

- Para sustituir una lámpara de descarga, es necesario un arreglo de LEDs, al fallar al menos un chip LED, la uniformidad de iluminación se verá afectada, incumpliendo posiblemente la normatividad reguladora. (Herranz, Ollé, & Jáuregui, 2013) (Martinez, 2012)

7. CONCLUSIONES

Se determinó que el LED tiene mejor reproducción del color, ya que emite la cantidad suficiente de radiación luminosa en la mayoría de las bandas del espectro electromagnético, permitiendo así que los colores sean reflejados y vistos por el ojo humano. Ya que facilita la percepción y diferenciación de los colores, proporciona con mucha más facilidad reconocer personas, vehículos y detalles, lo que inhibe actos vandálicos y evita accidentes, brindando así una mayor seguridad en las vías. Además posee una temperatura de color fría ofreciendo mayor comodidad visual, un ambiente más agradable y confiable.

La tecnología LED proporciona mayor sensibilidad al ojo humano en la región mesópica, donde la visión se adapta a las condiciones del nivel de iluminación, proporcionando una mayor agudeza visual en condiciones de oscuridad, que transmiten así un mayor confort y seguridad al usuario.

Según los datos entregados por el fabricante del chip LED y las lámparas, la depreciación del flujo luminoso en la tecnología LED es más lenta que en las otras dos tecnologías, conservando su flujo para el adecuado funcionamiento de la instalación, más del doble de tiempo que las tecnologías SAP y CMH.

Según lo visto la luminaria DELTA LED distribuye mayor cantidad de flujo luminoso hacia la vía, lo que favorece la adecuada iluminación para vías anchas sin necesidad de inclinar la

luminaria, por lo tanto brinda un buen control de deslumbramiento. Las luminarias de SAP y CMH emiten aproximadamente la misma cantidad de flujo hacia adelante y hacia atrás, por lo tanto se hace necesario la inclinación de la luminaria, aumentando la posibilidad de deslumbramiento del conductor, incluso llegando a los límites establecidos por RETILAP.

Según lo visto las pérdidas de flujo luminoso para las luminarias de SAP y CMH son altas en comparación con las de la luminaria LED, lo que permite en este proyecto que la tecnología LED pueda ser equivalente al SAP y CMH, pero con menos potencia; ya que la luminaria LED es mucho más eficiente que las otras al ser comparada por los lúmenes efectivos. Esto se debe a que flujo producido en todas las direcciones de las lámparas de CMH y SAP debe ser redirigido por medio del reflector y el difusor, mientras que el haz de luz de la luminaria LED ya está definido en cada chip, permitiendo así una luminaria mucho más eficiente, y más eficaz ya que sus pérdidas solo están asociadas al driver y no a la suma de las pérdidas producidas por el reflector, difusor, balasto, arrancador y condensador, como en el caso de las luminarias utilizadas para SAP y CMH.

Basado en el diseño de iluminación de la Av 3^{era} Norte-Sameco de Cali, las tres tecnologías cumplen adecuadamente con los niveles exigidos por RETILAP, sin embargo fue necesario utilizar una mayor cantidad de luminarias, y el 57 % más de potencias al realizar el diseño con las tecnologías de SAP y CMH, para

cumplir los niveles requeridos. Además al ser inevitable inclinar las luminarias VENUS, el factor de deslumbramiento es elevado en comparación con los resultados obtenidos al utilizar luminaria DELTA-LED. Por lo tanto, al cumplir los niveles requeridos con una menor cantidad de luminarias y potencias, es más viable la implementación de tecnología LED en este proyecto.

Se puede demostrar que para este proyecto el CAUE del LED es inferior en un 31 % al del SAP y en un 34 % al del CMH. Al ser CAUE el pago anualizado del valor total del proyecto durante los 30 años traído a valor presente; una menor cifra significa mayor viabilidad, por lo tanto el LED es más rentable que las otras tecnologías; ya que posee un menor costo de operación y mantenimiento.

Basado en el estudio económico para el proyecto Av 3^{era} Norte-Sameco de Cali, los costos anuales de operación y mantenimiento de la tecnología LED son la mitad de los requeridos por la tecnología convencional, eso quiere decir que anualmente el dueño de este proyecto se está ahorrando el dinero de mantenimiento, parte de la energía, y reposición de equipos; haciendo más económico y por lo tanto viable el sistema de iluminación en tecnología LED.

Se puede observar que para este proyecto el LED a pesar de tener una inversión inicial elevada, 6.5 veces más que el CMH y 7.4 veces más que el SAP, es recuperado en un mediano plazo, en cuatro años y medio respecto al CMH y casi cinco años respecto

al SAP, posteriormente es notable el ahorro al utilizar tecnología LED; ya que el costo de operación y mantenimiento es inferior al requerido por las luminarias de SAP y CMH.

Se encontró que por cada 50 pesos aproximadamente que disminuya la tarifa de la energía eléctrica, se retrasa un año más el retorno de la inversión del LED. Sin embargo se observó que el proyecto sigue siendo viable al disminuir la tarifa dos veces en ésta cantidad, ya que el punto de equilibrio se presenta en un tiempo inferior al especificado por RETILAP de 15 años.

Al utilizar tecnología LED se contribuye al cuidado del planeta. Las luminarias LED consumen menos energía, y producen directamente una menor cantidad de CO₂ al medioambiente en comparación con las luminarias de SAP y CMH. Además al estar la luminaria LED conformada en su mayoría por partes electrónicas; se facilita el re-uso y reciclaje de las piezas, por lo tanto no se necesita tener medidas extremas a la hora de la disposición final de las luminarias. A diferencia de las lámparas de SAP y CMH que contienen mercurio y otros gases altamente contaminantes y nocivos para la salud, que requieren en su etapa final un trato especial por personal capacitado.

REFERENCIAS

- Baissetto, I. (2009). *La Luz*. Recuperado el 23 de Septiembre de 2014, de http://www.sceu.frba.utn.edu.ar/dav/homovidens/cmем_generico/baissetto/proyecto%20final/luz.html
- Berman, S. (1992). Energy Efficiency Consequences of Scotopic Sensitivity. *Illuminating Engineering Society*, 12.
- Berman, S. (1995). *The Reengineering of Lighting Photometry*. Recuperado el 25 de Septiembre de 2014, de <http://gaia.lbl.gov/btech/papers/42327.pdf>
- Bommel, W. (2008). *El espectro de las fuentes de luz y bajos niveles de iluminación: fundamentos*.
- Boylestad, R., & Nashelsky, L. (2003). Diodos Emisores de Luz. En R. Boylestad, & L. Nashelsky, *Electrónica: Teoría de circuitos y dispositivos electrónicos* (pág. 1040). Mexico: Camara Nacional de la Industria.
- Carachure, J., & Sandoval, A. (2011). *Análisis comparativo sobre luminarias de LED'S contra vapor de sodio de alta presión y aditivos metálicos en alumbrado público*. Mexico.
- CELSA S.A.S. (2014). *PRUEBA 03 LUMINARIA VENUS INY CMH 250W IP.IND P3.IES. MEDELLIN*.
- CELSA S.A.S. (2014b). *PRUEBA 03 LUMINARIA VENUS INY Na 250W IP.IND P3.IES. MEDELLIN*.
- CELSA S.A.S. (2014c). *PRUEBA 03 LUMINARIA VENUS INY 250W IP.IND P1.IES. MEDELLIN*.
- CELSA S.A.S. (2014d). *PRUEBA 03 LUMINARIA VENUS Na 250W IP.IND P2.IES. MEDELLIN*.
- CELSA S.A.S. (2014e). *FICHA TÉCNICA LUMINARIA VENUS 70W-150W-250W*. Medellín.
- Comision de Regulación de Energía y Gas. (2011). *D-102-11 METODOLOGÍA PARA LA DETERMINACIÓN DE LOS 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*. Bogotá.
- Comite español de iluminación . (14 de Enero de 2014). *Requerimientos Tecnicos Exigibles para luminarias con Tecnología LED de alumbrado Exterior*. Recuperado el 8 de Agosto de 2014
- Chapa, J. (2004). *Manual de instalaciones de alumbrado y fotometría*. (G. NORIEGO, Ed.) Baldera: LIMUSA S.A.
- EPSA. (2015). *Tarifas para el mercado No Residencial EPSA*. Recuperado el 5 de Febrero de 2015, de <http://www.epsa.com.co/clientes/empresas/informe-de-tarifas/2015/enero>
- Garcia, J. (2007). *Lámpara de dercaga, conceptos*. Recuperado el 21 de Septiembre de 2014, de <http://recursos.citcea.upc.edu/llum/lamparas/ldesc1.html>
- Giménez, P. (2005). *El miedo a la ciudad oscura. Los primeros proyectos de alumbrado público en las ciudades valencianas y catalanas*. Recuperado el 20 de Septiembre de 2014, de http://www.uib.cat/ggu/pdf_VII%20COLOQUIO/6_GIMENEZ_elmiedo.pdf
- Gualdrón, L., & Rico, M. (2011). *Estudio técnico – económico del sistema de iluminación de áreas comunes exteriores a los edificios del campus central de la universidad industrial de santander*. Bucaramanga.
- Hernández, E. (2013). *Propuesta de sistemas de iluminación por medio de tecnología LED, para un salon de clases*. México.
- Herranz, C., Ollé, J., & Jáuregui, F. (2013). *La iluminación con LED y el problema de la contaminación lumínica*. Recuperado el 26 de Abril de 2015, de <http://www.biblioises.com.ar/Contenido/600/622/iluminacion%20con%20led.pdf>
- Ledil. (29 de Enero de 2015). *LEDiL*. Recuperado el 15 de Enero de 2015, de C11425_STRADA-T-DW: <http://www.ledil.com/node/2/p/6232>
- Lojano, L., & Orellana, F. (2014). "MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DEL ALUMBRADO PÚBLICO DE UNA ARTERIA DE CIRCULACIÓN VEHICULAR DE LA CIUDAD DE CUENCA, MEDIANTE LA SUSTITUCIÓN POR TECNOLOGIA LED (LIGHT EMITTING DIODE)". Cuenca - Ecuador.

- Macías, H., Ramos, Y., & Uliyanov, Y. (2012). Estudio de los Beneficios del cambio de bombillas de sodio de alta presión por diodos emisores de luz de alto brillo. *El Hombre y la Máquina*, 8.
- Marcet, A. (2008). *LA CALIDAD DE LA IMAGEN: AGUDEZA VISUAL*. Recuperado el 25 de Septiembre de 2014, de <http://www.uv.es/afelipe/Temasof/tema3.pdf>
- Martin, G. (sin año). *Información sobre Leds, historia y tecnologías actuales*. Recuperado el 22 de Septiembre de 2014, de <http://www.todopic.com.ar/led.html>
- Martinez, A. (2012). *Iluminación LED*. Xalapa : Universidad Veracruzana.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2012). *Resolución 0976* . Bogotá.
- Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarro Territorial. (2010). *Sistema de Recolección Selectiva y Gestión Ambiental de Residuos de Bombillas y Se Adoptan otras Disposiciones*. Bogotá.
- Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (2010b). *Lineamientos Técnicos para el Manejo de Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos*. Bogotá.
- Ministerio de Minas y Energía. (2010). *Reglamento técnico de iluminación y alumbrado público RETILAP* (Resolución No. 180540 ed.). Bogota: CIDET.
- Ministerio de minas y energía. (2011). *CREG 123*. Bogotá.
- Ministerio de Minas y Energía. (2013). *CREG 043*. Bogotá.
- Morente, C. (sin año). *Curso on-line de iluminación*. Recuperado el 21 de Septiembre de 2014, de Fuentes de luz y equipos auxiliares: <http://grlum.dpe.upc.edu/manual/sistemasIluminacion-fuentesDeLuz-LamparasDeDescarga-LamparaHalogenurosMetalicos.php>
- O'Donell, B., Sandoval, J., & Paukste, F. (2002). Fuentes luminosas. En *ILUMINACIÓN EFICIENTE* (pág. 254). Buenos Aires: Proyecto ELI, UNT y UBA.
- Philips. (21 de Junio de 2013). MASTER CityWhite CDOTT. *MASTER CityWhite CDO-TT Plus 250W/830 E40*.
- Phillips. (4 de Agosto de 2012). MASTER SON-T PIA Plus. *MASTER SON-T PIA Plus 250W E E40*.
- Qtest. (2013). *STREETLIGHT PHOTOMETRIC TEST REPORT DELTA-LED*. Medellín.
- Quiroga, M. (2010). *ANÁLISIS DE NUEVAS FUENTES EN ILUMINACIÓN*. UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA, Bogota DC.
- Ramírez, J. (2010). *Evaluación Financiera de Proyectos* . Bogotá: Ediciones de la U.
- Rea, M., & Freyssinier, J. (Enero de 2009). *ASSIST recommends*. Recuperado el 26 de Septiembre de 2014, de Outdoor Lighting: Visual Efficacy: <http://www.olino.org/wp-content/uploads/2009/07/ar-visual efficacy-jan2009.pdf>
- Salomone, J. (20 de septiembre de 2004). *Cátedra Instalaciones Industriales*. Recuperado el 2014 de Septiembre de 21, de Lámparas y sus componentes: http://www.profesores.fr.utn.edu.ar/industrial/InstalacionesIndustriales/Art_Interes/LampComp.pdf
- Sanchis, E., & Ejea, J. (11 de Noviembre de 2008). *B.5. El diodo de emisión de luz (LED)*. Recuperado el 22 de Septiembre de 2014, de http://www.uv.es/~esanchis/cef/pdf/Temas/B_T3.pdf
- Sicrel s.l. (2011). *SICREL NOTICIAS*. Recuperado el 25 de Septiembre de 2014, de <http://sicrelnoticias.blogspot.com/p/iluminacion-led.html>
- Taboada, J. (1983). Manual de luminotecnia. En J. Taboada, *Manual de luminotecnia* (pág. 317). Dossat, S.A.
- UAESP. (2004). *Manual único de alumbrado público*. Bogota.
- Universal Lighting Technologies. (2013). *Ficha Técnica D10CC150UV10F*. Nashville.
- Universidad de Valencia . (12 de Diciembre de 2014). *La contaminación lumínica generada por leds Balncos* . Recuperado el 27 de Abril de 2015, de http://www.uv.es/astro/Articles/20121218_UVInforme_CLuminica_es_p.pdf
- UPME. (2007). Alumbrado público exterior. *Guía didáctica para el buen uso de la energía*. Bogota.
- UPME. (2009). *CÁLCULO DEL FACTOR DE EMISIÓN DE CO2 DEL SISTEMA ELÉCTRICO INTERCONECTADO COLOMBIANO*. Bogotá.
- Uribe, F. (2000). Fundamentos sobre fuentes luminosas.
- Vellegas, G. (2004). *VALORACION DE EMPRESAS DE CONCESION DE ALUMBRADO PÚBLICO EN COLOMBIA*. Recuperado el 20 de Septiembre de 2014, de

https://bibliotecadigital.icesi.edu.co/biblioteca_digital/bitstream/10906/65968/1/valoracion_empresas_alumbrado.pdf

Villafranca, C. (2012). *Lumière studio*. Recuperado el 25 de Septiembre de 2014, de <http://lumiere-studio.blogspot.com/2012/12/vision-fotopica-mesopica-y-escotopica.html>

Vossloh-Schwabe Ibérica S.L. (3 de Septiembre de 2014). LED ROADWAY LIGHT M-CLASS. *WU-M-444 diagrams at 1050mA*. Barcelona.

AUTOR



Cindy Mishell OSORIO RODRÍGUEZ. Estudiante de decimo semestre de Ingeniería Eléctrica en la Universidad Pontificia Bolivariana. En la actualidad trabaja como profesional en diseño de iluminación en la empresa CELSA S.A.S. Nacida en Bello, Antioquia el 23 de febrero de 1992.

ANEXO

[Anexo A-Diseños](#)

[Anexo B-Eficiencia energética](#)

[Anexo C-Evaluación económica](#)