
**DISEÑO DE ILUMINACIÓN LED DE ALTA EFICIENCIA EN EL PROYECTO MICRO-RED DE
LA UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA**

María Elisa Briñón Zapata

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Electricista

Director: Hugo Alberto Cardona Restrepo

Nombre: María Elisa Briñón Zapata

Título profesional: Ingeniero Electricista

**Universidad Pontificia Bolivariana
Escuela de Ingenierías
Facultad de Ingeniería Eléctrica-Electrónica
Programa de Ingeniería Eléctrica
Medellín
2015**

Dedicatoria

A...

Todos aquellos que me enseñaron, ayudaron y apoyaron, pues sin su conocimiento, ánimo y apoyo no lo hubiera conseguido.

Todos aquellos que me animaron y brindaron su amor, sin su ayuda, comprensión y cariño este camino habría sido más difícil.

Agradecimiento

A Dios por ser mi guía, fuerza, apoyo, tranquilidad y alegría.

A mi papá por sus continuas explicaciones y apoyo en este trabajo, siempre has sido un ejemplo a seguir. A mi mamá por sus consejos y ánimo en los buenos y malos momentos. A mis hermanas, quienes siempre han sido excelentes profesionales y grandes personas. Y a Aña por acompañarme y alegrarme siempre que lo necesité.

A mi director de tesis Hugo Alberto Cardona, por su paciencia, apoyo, ánimo, dedicación y confianza.

A la Universidad Pontificia Bolivariana y sus excelentes docentes, gracias a los cuales hoy soy la persona y futura profesional que soy. Y en especial a Idi Amín Isaac y Gabriel López, por dejarme pertenecer a la Micro red, que además de ser un proyecto es una familia.

A mis compañeros de JCAG Ing Consultor SAS, porque gracias a todo lo que he aprendido de ustedes desarrollar este trabajo de grado fue más fácil.

A mis compañeros de la universidad por acompañarme en este arduo camino, con ustedes aprendí y sobreviví todos estos años. Y en especial a Luis Felipe Tobón por quererme en mis malos días y soportarme en los buenos. A Paula Andrea Restrepo y Juan Pablo Ramírez por hacerme reír todos los días, darme ánimo, escuchar todas mis quejas y creer más en mí de lo que yo lo hacía. A Mishelle Osorio por estar siempre dispuesta a ayudarme. A Luis Felipe Duarte, por ayudarme en todo este proceso.

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	12
1. ESTUDIO PREVIO MICRO-REDES INTELIGENTES	13
1.1. Redes convencionales y concepto de Micro-Red	13
1.2. Elementos de una Red Inteligente	14
1.3. Posibles Aplicaciones de las Redes Inteligentes	16
1.4. Principales ventajas de las Redes Inteligentes	17
1.5. Mico red Inteligente de la Universidad Pontificia Bolivariana	17
2. LUMINARIAS LED Y ALUMBRADO PÚBLICO	20
2.1. Definición de alumbrado público y su historia en Colombia	20
2.2. Conceptos básicos de luz e iluminación	22
2.3. Definición, Historia y evolución del LED	27
2.4. Componentes de las Luminarias LED	28
2.5. Ventajas de las Luminarias LED	29
2.6. Desventajas de las luminarias LED	30
2.7. Introducción al RETILAP	31
2.7.1 Objetivo	31
2.7.2 Alcance	32
3. ELEMENTOS CONSTRUCTIVOS ADICIONALES PARA ALIMENTACIÓN Y CONTROL DE LAS LUMINARIAS ...	33
3.1. Telegestión	33
3.1.1 Definición de Telegestión	33
3.1.2 Componentes	33
3.1.3 Ventajas de la implementación de telegestión.....	34
3.1.4 Aplicaciones de la telegestión	34
3.1.5 Funcionamiento	35
3.2. Baterías.....	36
3.2.1 Definición básica baterías	36
3.2.2 Clasificación de las baterías según material de construcción.....	36
3.2.3 Funcionamiento de las baterías.....	36
3.2.4 Desarrollo y evolución en los últimos años.....	37
3.2.5 Las baterías en la Micro-red de la UPB	37
3.3. Paneles Solares	37
3.3.1 Definición básica de paneles solares.....	37
3.3.2 Funcionamiento y aplicaciones de los paneles solares	38
3.3.3 Clasificación de los paneles solares.....	38
3.3.4 Los paneles solares de la Micro-red de la UPB.....	39
4. METODOLOGÍA	40
4.1. Requisitos generales de diseño de alumbrado público	40
4.2. Reglamentación en el diseño de alumbrado público	41
4.3. Coexistencia de las luminarias con los árboles en las vías	41
5. DISEÑOS Y RESULTADOS	44
5.1. Diseño Troncal de iluminación 1.....	44
5.2. Diseño Troncal de iluminación 2.....	45
5.3. Diseño Troncal de iluminación 3.....	47
5.4. Diseño Troncal de iluminación 4.....	47
6. ANÁLISIS ECONÓMICO.....	49
6.1. Costos de inversión inicial (CI).....	49
6.2. Costos administración, operación y mantenimiento (CAOM)	49
6.3. Costo anual uniforme equivalente (CAUE)	50
6.4. Resultados obtenidos	51
7. CONCLUSIONES	56
8. RECOMENDACIONES PARA FUTUROS TRABAJOS	59
AUTOR	62
ANEXOS	62

Lista de Figuras

Figura 1. Esquema típico de Micro-red inteligente. (Heart Transverter S.A, 2013)	16
Figura 2. Plano de las troncales de iluminación	19
Figura 3. Sectores de consumo de energía eléctrica en Colombia en el año 2005. Tomada de (Ministerio de Minas y Energía, 2010)	20
Figura 4. Transformación de la energía eléctrica en fuentes lumínicas.	22
Figura 5. Representación flujo luminoso, iluminancia y luminancia.....	23
Figura 6. Representación gráfica de la ley del coseno.	24
Figura 7. Distribución flujo luminoso en superficies.	24
Figura 8. Reflexión de la luz.....	25
Figura 9. Característica de la radiación luminosa. (Alcaldía Mayor de Bogotá D.C, 2001).....	26
Figura 10. Triángulo cromático. (Pereira, 2012)	26
Figura 11. Cronología LED. (NERSolar, 2012)	27
Figura 12. Esquema de funcionamiento de telegestión. Reproducida con permiso de Pérez (2015).....	35
Figura 13. Diagrama de flujo para el diseño de alumbrado público. Adaptado de (Loter Mesa, 2012).....	43
Figura 14. Ubicación Troncal 1	44
Figura 15. Foto real Troncal 1.1	44
Figura 16. Foto real Troncal 1.2	44
Figura 17. Foto real Troncal 1.3	45
Figura 18. Ubicación Troncal 2	45
Figura 19. Foto real Troncal 2.1	46
Figura 20. Foto real Troncal 2.2	46
Figura 21. Ubicación Troncal 3	47
Figura 22. Foto real Troncal 3	47
Figura 23. Ubicación Troncal 4	48
Figura 24. Foto real Troncal 4	48
Figura 25. Comparación entre los costos de administración, mantenimiento y operación de las 3 marcas utilizadas	53
Figura 26. Comparación del consumo de energía de las luminarias.....	54

Figura 27. Análisis del ROI (Retorno de la inversión) 55

Lista de Tablas

Tabla 1.Descripción y requisitos de iluminación para tráfico peatonal 42
Tabla 2. Descripción y requisitos de iluminación para tráfico vehicular M5..... 42
Tabla 3. Resumen resultados Troncal 1 45
Tabla 4.Resumen resultados Troncal 2 46
Tabla 5.Resumen resultados Troncal 3 47
Tabla 6.Resumen resultados Troncal 3 48
Tabla 7. Resumen resultados análisis económico del proyecto completo..... 52

Glosario

Aislamiento térmico: Material de tan baja conductividad térmica, que puede ser utilizado como aislante de calor.

Adaptabilidad mecánica: Facilidad de variar el ángulo de una luminaria con respecto al suelo y rotarla sobre el soporte, para obtener la mejor distribución lumínica.

Amperio hora: Medida de carga eléctrica, la cual mide la carga eléctrica que fluye a través de una batería en el caso de que ésta suministre una corriente de 1 amperio en 1 hora.

Baterías: Acumulador o conjunto de varios acumuladores de electricidad. (Real Academia Española, 2015)

Bastones: “Células fotorreceptoras responsables de la visión en condiciones de baja luminosidad. (La visión denominada por el bastón se llama escotópica)”. (Instituto Nacional de Tecnología Industrial, 2010) “Son sensitivos a muy bajos niveles de iluminación, pero no reaccionan a los colores. Existen en la región foveana del ojo, pero aumentan en número al aumentar la distancia desde esta región. Las regiones periféricas de la retina, en donde sólo se encuentran bastoncillos, no favorecen una visión precisa, pero esta región es altamente sensible al movimiento”. (Alcaldía Mayor de Bogotá D.C, 2001)

Conos: “Son las células fotosensoras responsables de la visión de los diferentes colores, en condiciones de alta luminosidad. (La visión determinada por los conos se llama fotópica)”. (Instituto Nacional de Tecnología Industrial, 2010) “Hacen posible la sensación de color y el discernimiento de los detalles finos. Están principalmente concentrados cerca del centro de la retina, con la mayor parte en la fóvea. Es precisamente en este punto en donde los músculos del ojo involuntariamente enfocan la imagen del objeto que debe ser examinado minuciosamente”. (Alcaldía Mayor de Bogotá D.C, 2001)

Cromaticidad de un color: “Longitud de onda dominante o complementaria y de los aspectos de pureza de un color tomados como un conjunto”. (Ministerio de Minas y Energía, 2010)

Depreciación lumínica: “Disminución gradual de emisión luminosa durante el transcurso de la vida útil de una fuente luminosa”. (Ministerio de Minas y Energía, 2010)

Dialux: *Software* para el diseño de proyectos de iluminación interior, exterior y vial, con el cual se pueden efectuar cálculos de iluminación natural y artificial.

Difracción: Fenómeno que se presenta cuando una onda propagándose por el espacio es obstaculizada por un objeto, distorsionando la luz.

Drivers: Fuentes de alimentación de corriente o voltaje constante.

Eficiencia energética: Relación entre la cantidad de luz radiada por una luminaria y su gasto energético.

Fotometría: “Medición de cantidades asociadas con la luz”. (Ministerio de Minas y Energía, 2010)

Fotómetro: “Instrumento para medir las cantidades fotométricas: tales como luminancia, intensidad luminosa, flujo luminoso e iluminancia”. (Ministerio de Minas y Energía, 2010)

Fotovoltaica: Efecto donde la incidencia de una radiación luminosa sobre unos materiales que conforman una unión PN establece una diferencia de potencial entre los terminales de dicha unión. (Valencia Gallón, 2013)

Índice escotópico a fotópico: (E/F) Medida de la cantidad de la luz que tiene longitudes de onda que excitan los bastones en comparación con las longitudes de onda que excitan a los conos. Los bastones son más sensibles a la luz azul que los conos, mientras que los conos son más sensibles al rojo. (Factor escotópico) (Gaughan, 2014)

Inversores: Sintetizador que controla un conjunto de interruptores electrónicos, con el fin de que a partir del suministro de DC se generan pulsos de duración modulada, es decir, modificar un voltaje de entrada de corriente continua a un voltaje de corriente alterna, con la frecuencia y magnitud deseada por el diseñador. (Pereda Soto, 2005)

LED: (Light Emitting Diode = Diodo emisor de luz). Dispositivo electrónico de material semiconductor que emite luz y calor en un solo sentido, al aplicar una tensión eléctrica.

Lumen (lm): “Unidad de medida del flujo luminoso en el Sistema Internacional (SI). Radiométricamente, se determina de la potencia radiante; fotométricamente, es el flujo luminoso emitido dentro de una unidad de ángulo sólido (un estereorradián) por una fuente puntual que tiene una intensidad luminosa uniforme de una candela”. (Ministerio de Minas y Energía, 2010)

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/m²). Bajo el concepto de intensidad luminosa, la luminancia puede expresarse como”:

$$L = \left(\frac{dI}{dA} \right) * (1/\cos\Phi) \quad (\text{Ministerio de Minas y Energía, 2010})$$

Luminaria: “Aparato de iluminación que distribuye, filtra o transforma la luz emitida por una o más bombillas o fuentes luminosas y que incluye todas las partes necesarias para soporte, fijación y protección de las bombillas, pero no las bombillas mismas y, donde sea necesario, los circuitos auxiliares con los medios para conectarlos a la fuente de alimentación”. (Ministerio de Minas y Energía, 2010)

Lux (lx): “Unidad de medida de iluminancia en el Sistema Internacional (SI). Un lux es igual a un lumen por metro cuadrado”. ($1 \text{ lx} = 1 \text{ lm/m}^2$) (Ministerio de Minas y Energía, 2010)

Micro LED: Es una tecnología mejorada de los LEDs, pues es capaz de soportar corrientes mayores (desde cientos de mA hasta un poco más de 1 A), en comparación con los LED que solo podían soportar decenas de mA. Con este incremento se ha logrado aumentar la capacidad de producción de energía lumínica. (Técnicas aplicadas a Baterías, 2011)

Ópticas: “Elementos necesarios para controlar y dirigir la luz producida por una o varias bombillas (refractor y/o reflector)”. (Ministerio de Minas y Energía, 2010)

Panel fotovoltaico: Conjunto de celdas solares conectadas y encapsuladas. Bloques constituyentes de los generadores fotovoltaicos. Las celdas solares son dispositivos que convierten la energía de la luz del sol en energía eléctrica. (Pereda Soto, 2005)

Reflexión: “Término general para el proceso mediante el cual el flujo incidente deja una superficie o medio desde el lado incidente sin cambios en la frecuencia”. (Ministerio de Minas y Energía, 2010)

Refracción: “Proceso mediante el cual la dirección de un rayo de luz cambia conforme pasa oblicuamente de un medio a otro en el que su velocidad es diferente”. (Ministerio de Minas y Energía, 2010)

Telegestión: Sistema de comunicación entre un centro de control (fijo o móvil) para el manejo, control, supervisión, adquisición de datos, de las luminarias del sistema. (Acuña Roncancio, 2011)

Temperatura de color: “Temperatura absoluta de un cuerpo negro radiador que tiene una cromaticidad igual a la de la fuente de luz. Se mide en Kelvin (K)”. (Ministerio de Minas y Energía, 2010)

Vida útil: “Duración estimada que un objeto puede tener, cumpliendo correctamente con la función para el cual ha sido creado. Período de servicio efectivo de una fuente que trabaja bajo condiciones y ciclos de trabajo nominales hasta que su flujo luminoso sea el 70 % del flujo luminoso total”. (Ministerio de Minas y Energía, 2010)

Resumen

La Micro red Inteligente de la Universidad pontificia Bolivariana cuenta con diferentes subsistemas, los cuales en conjunto se encargan de generar, distribuir, almacenar, optimizar, automatizar y utilizar de forma eficiente la energía eléctrica. La iluminación es un sector que consume cerca del 20% de la energía producida (Díaz, 2014), por este motivo se están buscando nuevas alternativas de iluminación con luminarias LED que permiten ahorros considerables respecto a las tecnologías convencionales. En este trabajo de grado se busca realizar el análisis y estudio de esta nueva tecnología LED para el alumbrado público de la micro red, definiendo unas troncales de iluminación estratégicas y plantear un diseño apropiado para el campus de Laureles de la UPB, evaluando diferentes luminarias LED disponibles para determinar cuáles cumplen de forma rigurosa con las especificaciones técnicas esperadas y con el reglamento técnico de iluminación y alumbrado público RETILAP. Además de tener en cuenta que se tiene la necesidad de implementar sistemas de telegestión para facilitar su manejo, control y vigilancia.

También se presenta una breve recopilación de la historia y desarrollo de las luminarias LED, una metodología para el diseño de iluminación de alumbrado público con LED utilizando el *software* Dialux, características de elementos como baterías, paneles solares y telegestión, que son elementos fundamentales para las luminarias. *Copyright* © UPB 2015

Palabras clave: Alumbrado público, LED, Iluminación, Micro-red, Dialux, RETILAP

Abstract

Universidad Pontificia Bolivariana's Micro Smart Grid has several subsystems, which together can generate, distribute, store, optimise, automate and make an efficient use of electrical energy. Lighting is a sector which consumes approximately 20% of the produced energy. Nowadays, new alternatives, such as LED lighting, are being researched because it allows a considerable saving compared to the conventional methods. That is why this degree project seeks for an analysis and a study of this new LED technology for the Micro Grid's public lighting and proposes a proper design for the Laureles campus of the UPB. This will be done by a rigorous evaluation of different LED lights, to see which of those lights meet the expected technical specifications and the public lighting technical regulation RETILAP. It is important to take into account that there is the need to implement remote management systems for easy handling, control and surveillance.

Also, a short summary of LED light history and development is going to be shown as well as a LED public lighting design methodology using Dialux software, and some elements features such as batteries, solar panels, and remote management, which are essential parts of the luminaries.

Keywords: Street lighting, LED, lighting, Micro-grid, Dialux, RETILAP

INTRODUCCIÓN

Desde tiempos inmemoriales el hombre ha buscado diferentes formas de iluminar su entorno con el fin de poder facilitar la realización de sus actividades diarias, además de buscar la sensación de seguridad, especialmente en las horas de la noche. Es por este motivo que siempre ha buscado diferentes tipos de iluminación, como por ejemplo el al dominar el fuego, empezó a utilizar antorchas, posteriormente velas y candelabros. Y con el avance paulatino de la tecnología empezó a buscar métodos más complejos, eficientes y útiles, pasando por la bombilla incandescente de Edison, las fluorescentes, metal halide, luminarias de vapor de sodio, inducción electromagnéticas, LED, etc.

La iluminación en el sector, público, privado, industrial, comercial y residencial consume cerca del 20% de la energía en una ciudad como Medellín. Las nuevas alternativas de iluminación con LED permiten ahorros de más del 50% con respecto a las tecnologías ahorradoras más eficientes convencionales (vapor de sodio, fluorescentes, halógenas, etc) con la ventaja de cumplir normas ROHS que en el momento de desecharlas no producen mayor contaminación ambiental.

Por estas razones en Colombia se han expedido diferentes decretos y normas, con el fin de obligar a las grandes industrias y edificios públicos a reemplazar las bombillas incandescentes por luminarias de alta eficiencia y ahorradoras. En el año 2008 el Ministerio de Minas y Energía declaró el uso racional y eficiente de la energía (URE) asunto de interés social, ambiental y económico, para promover a nivel nacional el uso racional de energía, usando fuentes de mayor eficiencia para garantizar el suministro continuo y confiable. Además

también se promueve el uso de fuentes de energía no convencionales para aprovechar los recursos naturales. Luego en el año 2010 se prohibió la comercialización y uso de las luminarias incandescentes. El gobierno se ha esforzado por crear una base normativa para exigir cumplimiento de éstas, respecto a la instalación de la iluminación, como se ve reflejado en el Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas (RETIE) y en la NTC 2050.

Sin embargo al quedar vacíos en las normas sobre iluminación, en Abril de 2010 entró en vigencia el Reglamento Técnico de Iluminación y Alumbrado Público (RETILAP), el cual tiene como objetivo fundamental: “establecer los requisitos y medidas que deben cumplir los sistemas de iluminación y alumbrado público, tendientes a garantizar: los niveles y calidades de la energía lumínica requerida en la actividad visual, la seguridad en el abastecimiento energético, la protección del consumidor y la preservación del medio ambiente; previniendo, minimizando o eliminando los riesgos originados, por la instalación y uso de sistemas de iluminación” (Ministerio de Minas y Energía, 2010). Es decir que señala las exigencias y especificaciones mínimas para que las instalaciones de iluminación garanticen la seguridad y confort con base en su buen diseño y desempeño operativo, así como los requisitos de los productos empleados en las mismas.

El presente documento se enfoca en el análisis de las luminarias LED para alumbrado público, con el fin de realizar un adecuado diseño e instalación de las troncales del proyecto de la Micro-red de la Universidad Pontificia Bolivariana.

1. ESTUDIO PREVIO MICRO-REDES INTELIGENTES

En este capítulo se presenta una contextualización del desarrollo de las Micro-redes inteligentes. Se inicia con una explicación de la definición de este nuevo concepto. Luego se presentan los principales componentes de las Micro-redes inteligentes. Posteriormente se exponen los diferentes lugares donde podría ser útil su instalación. En cuarto lugar se enuncian las principales ventajas sobre la instalación y desarrollo de las redes inteligentes y por último se expone sobre la-micro-red que se está desarrollando en la Universidad Pontificia Bolivariana.

1.1. Redes convencionales y concepto de Micro-Red

El concepto de red eléctrica tradicionalmente ha sido aquel que abarca el conjunto de transformadores, líneas y toda la infraestructura en la cual se transporta la energía desde los centros de producción hasta los lugares de consumo.

Normalmente dichos centros de producción se encuentran alejados de los centros de consumo, por lo cual se generan grandes pérdidas en el transporte y distribución debido a las grandes distancias. Día a día se buscan nuevas soluciones para crear redes más eficientes y capaces de soportar cada vez más consumidores. Por este motivo se está buscando un nuevo modelo para las redes eléctricas que tiene como fundamentos la generación distribuida, autonomía en control, equipos eficientes y tecnologías para transmitir y manejar datos. (González López, 2012)

Debido al incremento de la demanda eléctrica, con estándares de mayor calidad y mayor exigencia en los servicios, se ha visto la necesidad de avanzar en el concepto de red eléctrica. Por este motivo se ha ido desarrollado un nuevo término: “Red Inteligente”, que opera con generación distribuida, integrando sistemas de energía renovables y almacenamiento. Además de involucrar tecnologías para que exista un flujo de energía bidireccional entre generadores y consumidores; con lo cual se reduce el costo en la transmisión y generación y se mejora la eficiencia y confiabilidad. (Fossati, 2011)

Una Micro-red es una red eléctrica inteligente capaz de integrar las acciones de todos los usuarios conectados a ella, tales como generadores, consumidores y aquellos actores que llevan a cabo ambas operaciones, con la finalidad de distribuir eficientemente un suministro eléctrico que sea sustentable, económicamente competitivo y seguro. Otra definición es: “Red eléctrica autónoma e interconectada que integra de manera eficiente los sistemas de generación distribuida, sistemas de control, protecciones y la gestión de usuario”. (López Jiménez, 2013)

Tiene la característica de que puede autoabastecerse y funcionar de forma independiente, por lo cual es un buen modelo escalable a zonas no interconectadas o en lugares donde es muy costosa la energía eléctrica. Ya que en un inicio solo se utilizaba generación con diésel, con la cual se suelen tener bajas eficiencias en funcionamiento y alto costo de mantenimiento. (Fossati, 2011)

1.2. Elementos de una Red Inteligente

Suele integrar diferentes sistemas de generación, tanto convencionales como renovables, es decir es un sistema híbrido de generación, con el fin de garantizar la continuidad en el suministro de energía. Su configuración típica puede contar con:

-Unidades de generación de energía de fuentes renovables:

- Generación eólica:

Estos sistemas buscan aprovechar la energía cinética del viento (debida al calentamiento diferencial de la atmósfera y las irregularidades de relieve en la superficie terrestre), transformándola en energía mecánica, a través de una turbina, que finalmente se convierte en energía eléctrica por el movimiento de un rotor.

Existen sistemas de generación eólica, como lo son los Parques eólicos, en los cuales se instalan aerogeneradores capaces de producir potencias de MW. Para lograr esta condición se requiere de lugares adecuados, con velocidades de viento promedio mínimo de 5 m/s.

Este tipo de generación tiene la ventaja de ser amigable con el medio ambiente, pues no lo contamina con gases tóxicos como el dióxido de carbono ni desechos radioactivos.

Pueden presentar ciertas desventajas como lo son: contaminación auditiva por el ruido de los aerogeneradores, contaminación visual, pues podrían afectar paisajes escénicos y también pueden ser un problema en la vida de las aves. (Faroh & Pérez, 2010)

- Generación solar fotovoltaica:

El sol es la fuente de energía más grande que tiene la tierra. Esta energía se transmite en forma de ondas electromagnéticas y se puede percibir en forma de luz y calor. Tiene un valor fundamental en el desarrollo de nuestra existencia, puesto que la vida sin ella sería imposible. (Domínguez González, 2012)

Tiene 2 formas de ser utilizada, la primera es usando una parte del espectro electromagnético de la energía para producir calor (A este tipo de energía se le ha llamado solar térmica) Suele utilizarse para calentar grandes cantidades de agua, utilizando dispositivos ópticos para concentrar y coleccionar los rayos en puntos fijos de luz. El vapor de agua generado puede usarse para mover grandes turbinas y generar energía eléctrica.

La segunda posible forma de aprovechar la energía del sol es utilizando otra parte del espectro electromagnético convirtiendo la energía lumínica en electricidad de forma directa. Esta forma es la que concierne en este trabajo de grado.

Las ventajas son: que no es contaminante, no necesita combustibles fósiles para funcionar, no genera residuos, no tiene partes móviles que se deterioren con el tiempo, no necesita un mantenimiento muy complejo, es silencioso, tiene una larga vida útil, resisten condiciones climáticas adversas, al aumentar nuevos módulos fotovoltaicos aumenta la potencia instalada, además puede ser instalados en pequeñas áreas, como por ejemplo techos de casas o edificios. (Domínguez González, 2012)

Sin embargo presenta ciertas desventajas, como lo son que necesitan sistemas de baterías para almacenar la energía generada

y que pueden tener un impacto visual negativo en los lugares donde se encuentran instalados.

- Generación con biomasa:

“Se considera Biomasa los productos y materias primas renovables que se originan a partir de materia orgánica formada por vía biológica”. (Míguez Gómez, 2013) “La biomasa constituye la energía solar almacenada en forma de energía química” (Ruiz Bermejo, 2014)

Algunos de los factores que favorecen utilizar la biomasa como fuente energética son el encarecimiento del petróleo, el aumento de la producción de residuos orgánicos a nivel industrial y residencial, posibilidad de optimizar el proceso de obtención de energía, su utilización no incrementa el efecto invernadero, se pueden obtener productos biodegradables que pueden servir de abono y el aprovechamiento de los residuos con lo que se evita la contaminación de suelos y malos olores. Sin embargo presenta desventajas como lo son la baja densidad energética, altos costos en su almacenamiento y la necesidad de acondicionamiento o transformación para su utilización.

- Unidades de generación convencional.

Normalmente todos estos sistemas de generación usando energías renovables suele contar con un respaldo de generación convencional, como lo son las plantas diésel. (Gutiérrez Chamorro, 2013)

Los motores/generadores diésel presentan la desventaja de emitir gases tóxicos y nocivos para el medio ambiente. Por este motivo

la industria petrolera ha buscado desarrollar combustibles más amigables, eliminando ciertos compuestos. Sin embargo se busca que tiendan a desaparecer. (Retana Jimenez, 2008)

- Sistemas de almacenamiento de energía.

Los bancos de baterías se utilizan para almacenar la energía generada por medio de los sistemas de energías renovables, con el fin de contar con respaldos para los momentos en los cuales dichos sistemas no estén funcionando. Esta información se ampliará en el capítulo 3 del presente documento.

- Sistemas de acondicionamiento de potencia: inversores, reguladores, rectificadores, etc.

Los inversores transforman la corriente continua de baja tensión en corriente alterna de alta tensión. Este cambio es necesario pues la mayoría de equipos de las micro-redes, como lo son los paneles fotovoltaicos, baterías, generadores eólicos, generan en estos valores, pero los equipos eléctricos y la iluminación funcionan con corriente alterna.

Los reguladores protegen las baterías contra cargas y descargas profundas, que puedan afectar su vida útil. También se utilizan para desconectar parcial o completamente los paneles solares de las baterías sin que sufran daños. (Guerra Baeza, 2013)

- Sistemas de control y manejo.

En los cuales se monitorean las señales principales de los generadores, consumidores, las características del entorno (radiación solar, velocidad del viento, temperatura ambiente, etc.),

el estado de carga de las baterías, con el fin optimizar el funcionamiento de las micro-redes inteligentes y poder estar alerta ante cualquier eventualidad.

-Cargas.

Son todos los elementos que necesitan ser alimentados con energía eléctrica para funcionar correctamente. Las cargas más comúnmente utilizadas a nivel industrial y residencial son los motores e iluminación.

En la Figura 1 se presenta un esquema ilustrativo de una micro-red inteligente.

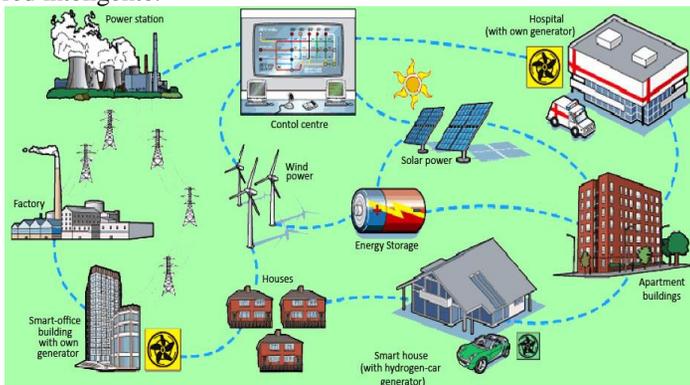


Figura 1. Esquema típico de Micro-red inteligente. (Heart Transverter S.A, 2013)

1.3. Posibles Aplicaciones de las Redes Inteligentes

Las micro-redes inteligentes tienen diferentes aplicaciones, algunas de ellas son:

- Zonas no interconectadas. Suelen combinar fuentes continuas para cubrir la necesidad básica y fuentes intermitentes para cubrir los picos de potencia. En Colombia el 66% del territorio nacional, con un 1.5 millones de habitantes (4% del total) no cuenta con suministro de energía eléctrica continua, debido a fallas en la formulación de proyectos, contratación y ejecución de obras deficiente, mala administración, mantenimiento y operación de los proyectos y de la infraestructura existente, la escasa presencia estatal, la actividad de grupos armados, el bajo nivel de ingresos de la población y el difícil acceso a estas zonas. Utilizar micro-redes inteligentes sería una opción viable para mejorar la calidad de vida de esta parte de la población, ofreciendo energía y telecomunicaciones. (Céspedes, 2012)
- Sistemas renovables dentro de redes locales con el fin de reducir el consumo de la red local o de los generadores diésel, es decir, tener sistemas híbridos que permitan la autosuficiencia respecto a la red eléctrica.
- En la industria militar, en batallones de montaña y las unidades móviles pues podrían obtener energía y optimizar las operaciones en zonas rurales con sus propias micro-redes inteligentes.

1.4. Principales ventajas de las Redes Inteligentes

Algunas de las principales ventajas que presenta la implementación de las micro-redes inteligentes son:

- Reducción en los picos de consumo. Se podrá utilizar la energía producida por las fuentes alternativas a las horas pico de consumo.
- Las redes inteligentes permiten que el exceso de energía se incorporen a la red, es decir que el usuario pasará a ser consumidor y generador de energía a la vez.
- Reducir la dependencia a la red eléctrica con el fin de descongestionarla. Con esto se lograría aumentar la eficiencia y confiabilidad de la red.
- Como se cuenta con sistemas de almacenamiento y gestión se puede aprovechar al máximo las energías renovables sin importar cuando sean generadas.
- Durante eventos en la red, como fallas u operaciones por mantenimiento, las micro-redes pueden operar autónomamente, garantizando un suministro continuo y reduciendo el número de interrupciones.
- Al aumentar la implementación de energías renovables se reduce el impacto ambiental, disminuyendo la emisión de gases invernadero.
- Diversificar la matriz de generación y así evitar la dependencia de sistemas convencionales de generación. (Fossati, 2011)

1.5. Micro red Inteligente de la Universidad Pontificia Bolivariana

Con el fin de ser pioneros en el tema, la Universidad Pontificia Bolivariana ha decidido implementar la primera Micro-red Inteligente en Colombia, para realizar un estudio sobre el uso racional y eficiente de los recursos energéticos. Es un proyecto multidisciplinar en el cual se busca congrega las áreas de Energía eléctrica, TICs, Vigilancia Tecnológica, Infraestructura, Arquitectura, etc. (UPB, 2014)

“El desarrollo y ejecución del proyecto consta de tres fases: La primera es la implementación de la infraestructura de la Micro-Red, en la segunda se llevarán a cabo investigaciones, pruebas y evaluaciones del desempeño de cada componente del sistema, se desarrollarán prototipos y se integrarán otros existentes; en la tercera fase se diseñarán micro-redes escaladas y soluciones a la medida para potenciales clientes según sus necesidades” (Grupo de Investigación en Transmisión y Distribución de Energía Eléctrica (TyD), 2013)

En la Micro-Red de la UPB se busca integrar diferentes subsistemas como lo son: (Universidad Pontificia Bolivariana, 2014)

- Generación solar fotovoltaica

Actualmente se encuentran instalados paneles solares en los techos de las porterías peatonales y en el techo del bloque 10. En los primeros se encuentran ubicados 52 paneles policristalinos en cada techo que generan aproximadamente 12,5 kWp en cada techo. Utilizan un inversor central motivo por el cual es menos costoso. En el techo del bloque 10 se instalaron 20 paneles, los

cuales tienen cada uno un inversor, es decir que funcionan de forma independiente. La potencia suministrada por este conjunto de paneles solares es de 5kWp. Este sistema se encuentra operando desde Octubre del año 2013 y cuenta con monitoreo desde el mes de Noviembre del mismo año.

- Generación eólica.

Este tipo de generación no pudo ser instalado en el Campus de Laureles, debido a las bajas velocidades de viento que hay en el sector. Sin embargo se hará la instalación en otra sede, con el fin de poder continuar con la investigación.

- Esquema híbrido de generación para Zonas no Interconectadas.

En este subsistema se cuenta con un biodigestor anaerobio con una capacidad de 150 litros, el cual se alimenta con los residuos orgánicos, como lo son los desechos de las cafeterías y la poda de árboles, se deja fermentar y de genera gas metano, el cual puede ser usado en la cocción de alimentos o se puede usar para mover una turbina con la cual generar cerca de 1 kWh de energía. Además la materia orgánica sobrante puede usarse como un fertilizante. Se está buscando la forma de ampliar el biodigestor a uno con una capacidad de 5000 litros.

- Almacenamiento de Energía Gestionable.

Es un sistema BESS (Battery Energy Storage System) con baterías de plomo-ácido gelificadas, las cuales permiten ciclos de descarga profunda y las cuales contarán con sensores para su monitoreo, con el cual se busca conocer la información de carga, del ciclo de trabajo y así aprovechar su vida útil. Este tipo de baterías requiere poco mantenimiento y son poco nocivas con el

medio ambiente.

- Sistema para la gestión de vehículos eléctricos.

La idea es contar con estaciones de carga eléctrica lenta, de cerca de 8 horas, para los vehículos en los parqueaderos, para cuando su uso esté más expandido. Por este motivo en la universidad se realizó un estudio sobre vehículos eléctricos, en los cuales fueron analizados y probados 2 tipos diferentes de vehículo, un Chevrolet Volt híbrido y un Renault Fluence totalmente eléctrico. Se les instalaron sensores y GPS para geo-referenciar y saber su posición exacta, además también se buscaba conocer y monitorear las variables de éstos y hacer el control de la carga OBD (on board diagnosis).

- Centro de control y monitoreo.

En este centro se busca recoger, analizar y estudiar todas las actividades que se ejecutan en la micro-red. Como todos los procesos que se llevan a cabo en los subsistemas de la micro-red deben ejecutarse de forma autónoma, se deben procesar los datos y variables para tomar decisiones correctas en el menor tiempo posible. Por este motivo se desarrollan programas capaces de predecir eventos indeseados y que les ayuda a adaptarse a diferentes escenarios de operación. (Wiley, 2012)

- Sistemas para la gestión de la demanda.

Con este sistema se busca realizar una auditoría energética, es decir, un estudio de las cargas y consumos dentro de la Universidad, para definir cuáles son cargas esenciales y cuales no lo son. Las cargas esenciales son aquellas que deben tener un suministro continuo de energía, para garantizar que el confort y la seguridad de las personas no se vean afectados.

2. LUMINARIAS LED Y ALUMBRADO PÚBLICO

En este capítulo se hace un acercamiento a los conceptos teóricos de las luminarias LED y el alumbrado público en Colombia. Inicialmente se expone un breve resumen de la historia y definición del alumbrado público. Posteriormente se presentan los conceptos básicos sobre iluminación con el fin de explicar las nociones que se tendrán en cuenta a la hora de realizar el diseño de iluminación de las troncales de la UPB. Luego se explica la evolución de las luminarias LED para pasar a la descripción los principales componentes de las luminarias LED y por último se enumeran, de forma detallada, las ventajas y desventajas de la tecnología LED.

2.1. Definición de alumbrado público y su historia en Colombia

El sistema de alumbrado público, “comprende el conjunto de luminarias, redes, transformadores de uso exclusivo y en general, todos los equipos necesarios para la prestación del servicio de alumbrado público, que no formen parte del sistema de distribución” (Ministerio de Minas y Energía, 2006)

“El servicio de alumbrado público es un servicio no domiciliario que se presta con el fin de iluminar lugares de libre circulación, que incluyen las vías públicas, los parques y demás espacios que se encuentren a cargo del municipio, con el fin de permitir el desarrollo de actividades nocturnas dentro del perímetro urbano y rural. Pero sin duda, el objetivo principal es proporcionar condiciones de iluminación que generen sensación de seguridad a

los peatones y una adecuada visibilidad a los conductores de vehículos en zonas con alta circulación peatonal”. (Ministerio de Minas y Energía, 2007).

El sistema de alumbrado público representa una gran carga para el sistema eléctrico del país, departamento o ciudad, además de generar un gran gasto, por la inversión inicial, mantenimiento, expansiones y el consumo diario que implica. (Castañeda Duque, 2010). Como puede apreciarse en la Figura 3, en la cual se observa que el 3% del consumo total de la energía eléctrica en Colombia en el año 2005 fue por funcionamiento del alumbrado público.

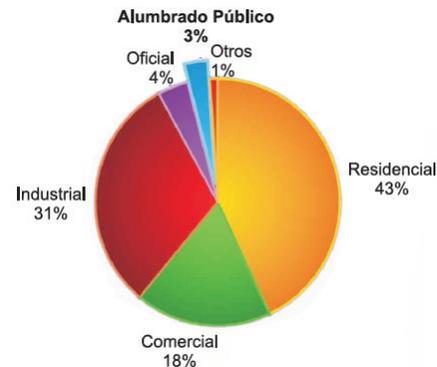


Figura 3. Sectores de consumo de energía eléctrica en Colombia en el año 2005. Tomada de (Ministerio de Minas y Energía, 2010)

Aunque el 3% parezca un valor bajo valor, se traduce en 1600 GWh, que en costos, con una tarifa promedio de 350\$/kWh, representan la suma de \$ 560.000 millones de pesos al año. Por este motivo se puede distinguir el alumbrado público como un importante sector de ahorro energético y la aplicación del uso racional de energía (URE).

La prestación de este servicio en Colombia inicio en 1795, utilizando lámparas de sebo portátiles, solo fue hasta 1842 en el cual en Bogotá se instalaron 100 faroles de reverbero, las cuales funcionaban alimentadas con aceite, para reemplazar la iluminación de sebo. Luego en 1867 se empezaron a instalar lámparas de petróleo en las principales esquinas de la ciudad, las cuales contaban con la ventaja de brillar más que las velas.

El 5 de septiembre de 1889 se instalaron los primeros postes para alumbrado público. El 7 de diciembre de ese mismo año se inauguró el servicio de alumbrado eléctrico en Bogotá, alimentado por calderas de carbón.

En el siglo XX se obtuvieron grandes avances, como lo son mejoras en la infraestructura, tarificación, normatividad, regulación jurídica, eficiencia, ahorro energético, desarrollo sostenible y ayuda al medio ambiente. El 7 de agosto de 1900, se inauguró el primer servicio de alumbrado público eléctrico bien organizado y en 1906 la compañía de energía de Bogotá asumió el préstamo del servicio de alumbrado público.

En 1908 se instalaron luminarias de tungsteno, que para la época suponía la última moda.

A principios del siglo XX no se contaba con ninguna ley que protegiera y reglamentara este servicio, por lo cual las empresas privadas encargadas se quejaban de vandalismo contra las lámparas instaladas. Solo hasta 1913, mediante la ley 97 se reglamentó la prestación del servicio de alumbrado público, por lo cual los municipios deberían disponer de los elementos para prestar este servicio.

Para el año 1927 el sistema de alumbrado público está establecido técnica, legal y jurídicamente.

En 1955 se empezaron a utilizar lámparas de mercurio. 13 años más tarde se instalaron las primeras lámparas de sodio.

Luego en el año 1974 se creó la norma 900 “Código Colombiano de alumbrado público”, sin embargo no fue oficializado por la superintendencia de industria y comercio hasta 1975, mediante la resolución 657. 10 años después, el ministerio de Minas y Energía aprueba el Decreto 2545 en la cual se estructura la tarifa para el sector eléctrico así: “Artículo 2. La expansión del sector eléctrico, su administración, mantenimiento y operación serán financiados mediante el cobro de tarifas y obtención de créditos”.

Durante 1994 se modificaron normas relacionadas con iluminación de espacios públicos y vías en las cuales se aclaraba que se debía usar fuentes más eficientes, es decir, únicamente usar luminarias de sodio de alta presión en todas las áreas.

En 1998 se logró un avance importante en planeación, control y supervisión del servicio, a través de la UESP, además de

establecer las características técnicas de la prestación del servicio por medio de la resolución 070 de la CREG.

En el siglo XXI se han presentados eventos de constante *Renovación*, buscando crear un sistema de alumbrado público de calidad, seguridad y conforme a la necesidad de los usuarios.

En enero de 2002 se estableció la metodología para calcular la remuneración del prestador de servicio de alumbrado público, aclarando la forma de pago y la ejecución de las actividades necesarias para el mejoramiento del servicio y la modernización del alumbrado público. Por este motivo, un año más tarde, Codensa S.A ESP empezó la planeación estratégica para el desarrollo de la modernización del sistema de alumbrado público.

Sin embargo solo hasta el 6 de Agosto de 2009 se elabora el RETILAP, reglamento que nace a partir de la ley 697 de 2001, en la cual se fomenta el uso racional y eficiente de la energía (URE). Sin embargo solo entra en vigencia hasta el 1 de abril de 2010. A finales de 2011 se invitó a la comunidad interesada a participar en la actualización y/o modificación de dicho reglamento, con lo cual, en el 2012, se publicaron los capítulos del Anexo General. Con este reglamento se busca normalizar la fabricación, utilización e instalación de los productos relacionados con la iluminación y cobija a todas las organizaciones que se dediquen a fabricar, diseñar, construir, comercializar o instalar sistemas de iluminación. (Villegas Londoño, 2004) (Rueda Chaparro, 2006)

2.2. Conceptos básicos de luz e iluminación

Flujo luminoso: cantidad de luz emitida por una fuente luminosa en todas las direcciones por unidad de tiempo (Ministerio de Minas y Energía, 2007). También puede ser definido como “la parte del flujo radiante que produce una sensación luminosa en el ojo humano” (Caminos, 2011). Este flujo no suele distribuirse en todas las direcciones del espacio, ya que esto depende de la disposición y lente del dispositivo empleado para la iluminación. El Lumen es su unidad de medida.

El concepto de flujo luminoso está estrechamente relacionado con la potencia eléctrica, con lo cual se puede evaluar el rendimiento de la fuente luminosa. Al calificar la cantidad de lúmenes por vatio (lm/w).

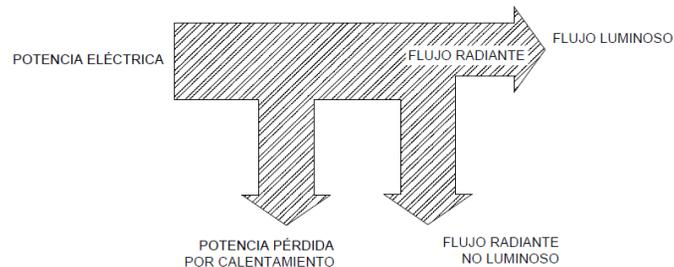


Figura 4. Transformación de la energía eléctrica en fuentes lumínicas.

Iluminancia: Densidad del flujo luminoso que incide sobre una superficie. Su unidad es el lux. Un lux equivale a un lumen por metro cuadrado ($1\text{lx}=1\text{lm}/\text{m}^2$). El nivel de iluminancia medido en un terreno se mide con el luxómetro. (Ministerio de Minas y Energía, 2010)

Luminancia: Es la densidad superficial de flujo luminoso que traspasa, incide o sale de una superficie siguiendo una dirección determinada. Otra buena definición es que es la densidad superficial de intensidad luminosa en una dirección. Su unidad es candela por metro cuadrado (Cd/m^2). (Schifman, 2011)

Para clarificar, se puede explicar cómo la sensación subjetiva de la claridad de luz de un objeto iluminado. Es decir que la luz no se hace visible hasta que tropieza con un cuerpo que la refleja o la absorbe. Los objetos pueden verse con mayor o menor claridad, así estén igualmente iluminados, pues esto depende de la luminancia. (Caminos, 2011)

En la Figura 5 se muestra una representación que clarifica de manera gráfica estos 3 conceptos, ya que su definición puede ser un poco confusa y puede ser complicado reconocer las diferencias entre ellos.

Percepción: Se basa en la cantidad de luz que llega a la retina proveniente del objeto que se pretende visualizar. Esta cantidad depende de la fuente que ilumina el objeto y de su capacidad reflectora. Es decir que el ojo humano distingue los niveles de luminancia y brillo y no niveles de iluminancia. (Castañeda Duque, 2010)

Adaptación: Capacidad del ojo para acomodarse a diferentes niveles de iluminación. Es realizado automáticamente por la pupila, variando la apertura del iris; si hay mucha luz incidente en el ojo se cierra el iris y viceversa, buscando siempre el nivel de equilibrio para poder ver de forma correcta. (Castañeda Duque, 2010)

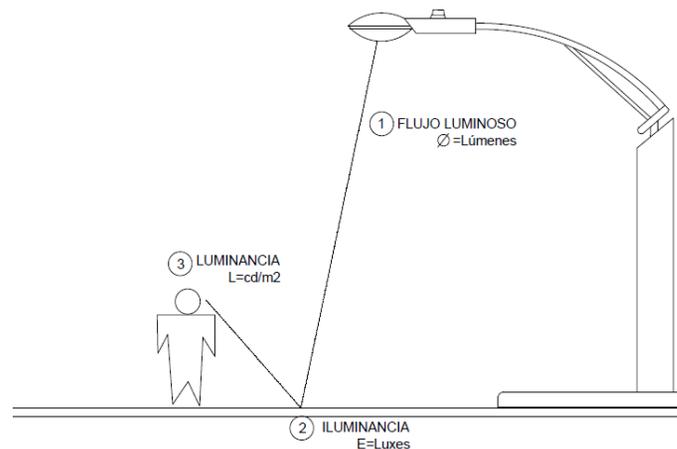


Figura 5. Representación flujo luminoso, iluminancia y luminancia

Deslumbramiento: Sensación producida, dentro del campo visual del observador, por una luminancia suficientemente mayor o menor a la cual los ojos se habían adaptado y que causa molestias,

incomodidad o pérdida temporal de la visibilidad. (Ministerio de Minas y Energía, 2007). Este fenómeno reduce la capacidad visual debido a una iluminancia a la cual el ojo no puede adaptarse. El valor máximo tolerable de luminancia para la visión directa es de 0.75 cd/m^2 . (Alcaldía Mayor de Bogotá D.C, 2001)

En alumbrado público existen 2 tipos:

- Deslumbramiento molesto, que se genera por la falta de comodidad al observar un área demasiado iluminada durante la conducción.
- El deslumbramiento incapacitivo, generado por la disminución temporal de la capacidad del observador.

Ley del coseno: Cuando la superficie a iluminar no es perpendicular a la dirección del flujo luminoso, la iluminancia se modifica por el coseno del ángulo de incidencia. Este es el ángulo que se forma entre la dirección del rayo incidente y la normal de la superficie, como se muestra en la Figura 6.

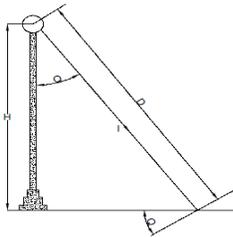


Figura 6. Representación gráfica de la ley del coseno.

Con esto se obtiene que la iluminancia es:

$$E = \frac{I \cos \alpha}{D^2} \quad (1) \quad E = \frac{I (\cos \alpha)^3}{H^2} \quad (2)$$

Ley de la inversa de los cuadrados: La iluminación es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia existente entre la fuente de luz y la superficie iluminada. Solo es aplicable para fuentes puntuales, superficies perpendiculares a la dirección del flujo y cuando la distancia es considerablemente mayor en relación al tamaño de la fuente. En la Figura 7 se hace una representación de esta ley, según la cual:

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{D^2}{d^2} \quad (3)$$

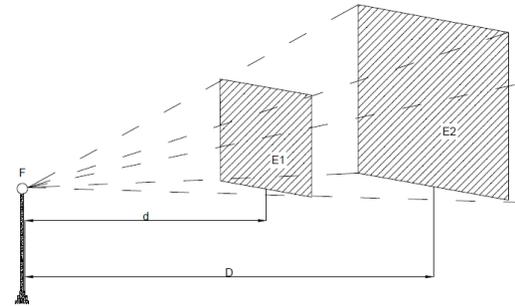


Figura 7. Distribución flujo luminoso en superficies.

Reflexión: Fenómeno que se presenta cuando una superficie devuelve una parte de la luz que incide sobre ella. Su presencia depende de 3 circunstancias: Las condiciones moleculares del material, el color del rayo de luz incidente (el blanco se refleja mejor) y el ángulo de incidencia del haz de luz. En la Figura 8.a puede apreciarse que el ángulo de incidencia es igual al ángulo de reflexión.

Sin embargo esto solo sucede cuando la superficie es totalmente lisa y brillante. Si la superficie es rugosa y brillante se generan varios rayos reflejados y con ángulos similares al incidente, entonces puede afirmarse que se cumple aproximadamente la ley fundamental. Esta situación puede apreciarse en la Figura 8.b.

Y por último, cuando la superficie es rugosa y opaca, el haz de luz incidente se refleja en todas las direcciones del espacio y no se cumple la ley fundamental, como se observa en la Figura 8.c. (Caminos, 2011)

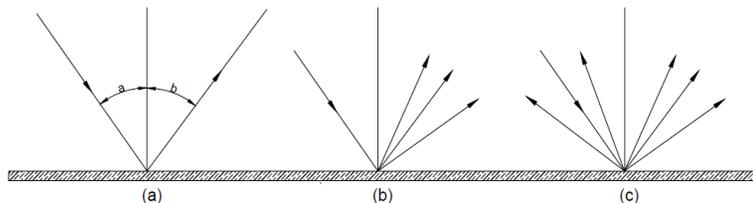


Figura 8. Reflexión de la luz

Absorción: Cuando se presenta el fenómeno de reflexión, no todo el flujo luminoso que incide sobre los objetos se refleja, una parte de éste es absorbido, dependiendo de la composición del material del cuerpo y su color. Si el cuerpo es blanco refleja toda la luz incidente, si es negro absorbe la totalidad del flujo, pero si es rojo, por ejemplo, absorbe todos los colores y refleja el rojo.

Refracción: Este fenómeno se presenta cuando la dirección del haz de luz cambia al pasar de un medio a otro diferente (a través de cuerpos transparentes). En las luminarias se presenta cuando el rayo de luz pasa por el lente óptico.

Es una propiedad que se utiliza para lograr diversas distribuciones lumínicas de acuerdo a la necesidad. En algunos casos se requiere distribuciones homogéneas y localizadas, en otros se necesitan distribuciones asimétricas como en la iluminación de carreteras, en las cuales se requieren iluminar una gran distancia en el sentido de la carretera pero no demasiado hacia el frente (sólo el ancho de la calzada). En este caso es mucho más eficiente la distribución lumínica usando un difractor, que las tradicionales luminarias de vapor de sodio que no poseen ningún elemento de este tipo.

Naturaleza de la luz: “La luz es una forma de energía radiante capaz de producir sensaciones visuales. Esta energía es un conjunto de radiaciones electromagnéticas cuya longitud de onda varía entre 3.800 y 7.800 \AA . Dicha banda se conoce como espectro visible”. (Alcaldía Mayor de Bogotá D.C, 2001) En la Figura 9 pueden apreciarse las diferentes longitudes de onda de

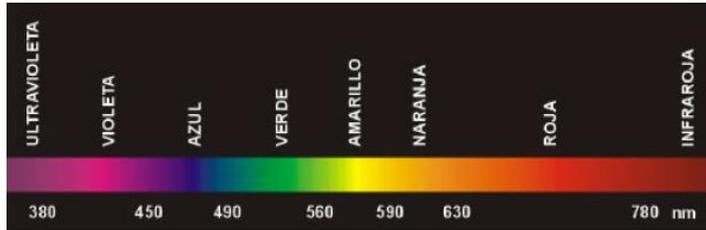


Figura 9. Característica de la radiación luminosa.
(Alcaldía Mayor de Bogotá D.C, 2001)

la radiación electromagnética y los colores percibidos por el ojo humano.

El ojo percibe dichas longitudes con diferentes eficiencias y por esto, cuando predomina una, el ojo capta el color en particular.

Visión Fotópica: “Es la visión percibida con niveles de iluminación que permite distinguir colores. Esto ocurre como a 10 luxes. La visión se centra en la luz recibida por los conos de la retina. Éstas son células muy sensibles a la luz y que permiten enviar sensaciones al cerebro para identificar colores”.

(Alcaldía Mayor de Bogotá D.C, 2001)

Visión escotópica: (nocturna o con baja iluminación), es donde la sensibilidad se desplaza a longitudes de onda menores, es decir, que el color azul y violeta se hacen más sensibles que el rojo o naranja. La visión depende de los bastones, que son células ubicadas en la periferia de la retina, las cuales son muy sensibles a

cambios de luminancia en el campo visual periférico y por lo cual se detectan los movimientos con facilidad así no se distinguen las figuras. La velocidad de percepción es menor que en la visión fotópica. (Alcaldía Mayor de Bogotá D.C, 2001)

Temperatura de color: Es un indicador del color de luz de una fuente luminosa. Este color corresponde a aquella con la que el cuerpo negro presenta el mismo color que la fuente analizada. Esta comparación se presenta en la Figura 10.

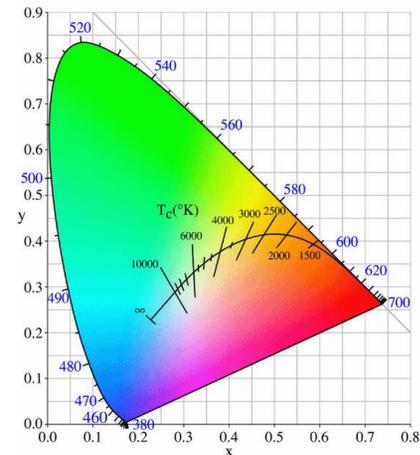


Figura 10. Triángulo cromático. (Pereira, 2012)

Índice de reproducción cromática: Aspecto cromático que presentan los cuerpos iluminados con una fuente, respecto al que presentan con una luz de referencia (el sol). La temperatura de color indica únicamente el color de la luz de la fuente luminosa, pero no su composición espectral, la cual es fundamental para la reproducción de los colores. (Dos fuentes pueden tener colores similares pero propiedades de reproducción cromáticas muy diferentes). (Indalux, 2002)

2.3. Definición, Historia y evolución del LED

Un LED es un diodo emisor de luz (de las siglas Light-emitting diode). Es un dispositivo semiconductor que emite luz cuando se polariza de forma directa la unión PN y circula por él una corriente eléctrica. El color del rayo de luz depende del material semiconductor utilizado y puede variar desde ultravioleta hasta el infrarrojo. (Castañeda Duque, 2010)

La primera noticia que se tiene de electroluminiscencia en un semiconductor fue reportada por Henry Joseph Round quien reportó un resplandor amarillento al pasar corriente por carburo de silicio en 1907.

En 1927 Oleg Vladimirovich Losev implementó el primer LED; sin embargo ante la poca eficiencia conseguida, solo hasta 1960 ingenieros de General Electric desarrollaron un LED de luz roja de muy baja intensidad cuya aplicación más importante fue en luces piloto para electrodomésticos y en algunos display.

Rápidamente se desarrollaron los LED verdes y amarillos, utilizados en aplicaciones similares.

Sólo hasta la década del 90 se inventaron los LED ultravioleta, azules y blanco (El LED blanco es un LED azul con un recubrimiento de fósforo amarillo) llegando a intensidades de 40 lúmenes/ vatio. A partir de esa fecha y hasta la actualidad han aumentado la eficiencia hasta el orden de 150 lúmenes/ vatio en laboratorio, lo que los hace muy prácticos para reemplazar fuentes tradicionales de iluminación. (Brión Vélez , 2014)

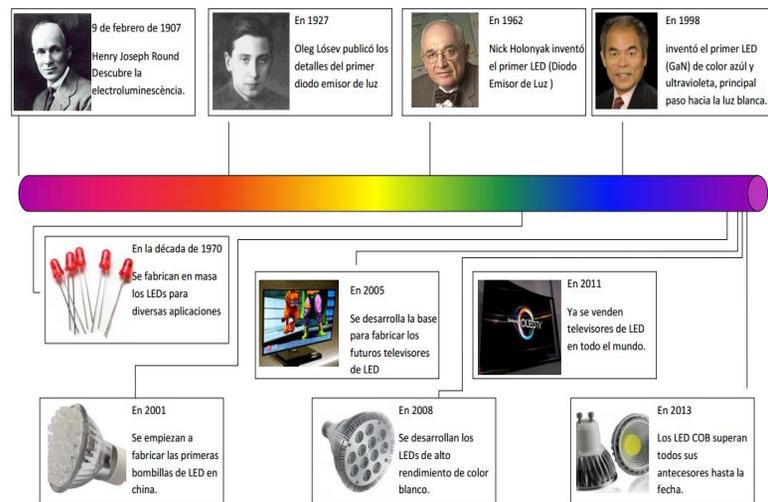


Figura 11. Cronología LED. (NERSolar, 2012)

2.4. Componentes de las Luminarias LED

Dispositivo de alumbrado que por medio de dispositivos ópticos distribuye la luz de uno o varios focos lumínicos LED, para obtener un patrón de iluminación específico de acuerdo a las necesidades. Suelen estar montadas por encima del piso, ya sea en postes, o adosadas a paredes. Aunque se pueden utilizar desde el mismo piso para bañar estructuras.

La luminaria se puede dividir en cinco componentes, a saber:

- **Carcasa:** Es el receptáculo donde se ensambla la luminaria. Normalmente suele estar hecha de aluminio de fundición, inyectado, o en aluminio de primera fusión extrusado. Ésta última es la que tiene mayor transferencia de calor. También pueden estar hechas de zamac, en el peor de los casos, que es una aleación de aluminio, magnesio y cobre. Puede ser fija o ajustable con la capacidad de movimiento de ciertos grados para la orientación final de la luminaria y la posibilidad de cambiar de vertical a horizontal de acuerdo al poste utilizado. Contiene el LED, el driver y la telegestión.
- **Driver:** Fuente de corriente constante, ya que los LEDs y micro LEDs (COBs), se alimentan con ésta. No se debe trabajar con fuentes de voltaje, para evitar que se sobrepase la corriente máxima de trabajo o de operación de los LEDs y se produzcan daños en éstos. Pueden ser de diferentes tipos y es importante que presenten un factor de potencia resistivo, cercano a uno, para evitar que generen cargas inductivas en la red.

Suelen tener forma de sensor la corriente y voltaje en las luminarias para enviar dicha información al sistema de telegestión.

- **LED:** Elemento que produce la luz, los LEDs, normalmente una serie de éstos en arreglos matriciales, de acuerdo a la potencia requerida o sistemas de microLED (chip on board), que son muchos pequeños LED en una tarjeta de sustrato con una capa de fósforo amarillo con la cual se ajusta la temperatura de color y que produce la radiación lumínica. Este elemento radiador de luz es el que determina la eficiencia (en lúmenes/vatio) que tiene la fuente de luz.
- **Ópticas:** Mecanismo refractivo con el cual se puede tomar la luz producida por el LED y distribuirla de acuerdo a los patrones necesarios en el sitio donde se va a instalar la luminaria para obtener la mejor distribución y homogeneidad de acuerdo a la separación entre las luminarias. Existen 2 tipos de materiales principales para la creación de las ópticas:
 - Polycarbonato:** Los cuales suelen estar protegidos contra los rayos ultravioleta (UV), porque éstos afectan la transparencia del material perdiendo la capacidad de transmitir bien la luz y aumentando las pérdidas con el tiempo (Lexan).
 - Cristal:** puede presentar mayor o menor pureza, pero no se ve afectado por los rayos ultravioleta.
- **Telegestión:** Dispositivo que se encarga de adquirir datos de parámetros específicos de la luminaria y transmitirlos por cable, RF o microondas al centro de control para almacenar los datos en tiempo real, para conocer su consumo, eficiencia

y los parámetros necesarios de las luminarias.

2.5. Ventajas de las Luminarias LED

A partir de 2010, las eficiencias lumínicas de los LED se han ido incrementando al punto de competir ampliamente con las fuentes lumínicas tradicionales como el MH y el vapor de sodio de alta presión. Sin embargo estas fuentes han monopolizado el mercado, especialmente el de alumbrado público.

A continuación se presentan algunas ventajas de las luminarias LED:

- Eficiencia lumínica: El mayor porcentaje de la energía suministrada se convierte en luz, es decir que existe un bajo consumo de energía con una gran emisión lumínica.
- Baja temperatura de operación: De todas formas los LEDs de potencia requieren disipadores térmicos que extraigan la temperatura generada por el funcionamiento del LED, para garantizar un correcto funcionamiento.
- Larga vida útil: Los LED tienen una vida útil de aproximadamente 100.000 horas o más, siempre y cuando la temperatura de operación se encuentre por debajo de los 65°C. Estos tiempos son muy superiores a cualquiera de los sistemas convencionales que solo llegan a 15.000 horas como mucho.
- Flexibilidad cromática: Usando los colores básicos aditivos (verde, rojo y azul) se pueden obtener todos los colores de luz, permitiendo diversas aplicaciones de los LED.

- Ecológicos: Los LED tienen un consumo energético mucho menor a los sistemas de iluminación clásicos, además las cantidades de elementos tóxicos que componen los LED son muchísimo menores que en las luminarias tradicionales, cumpliendo normas ROHS.
- Radiaciones espurias: Las lámparas convencionales emiten altas dosis de luz ultravioleta e infrarroja; por el contrario, con los LED se puede garantizar la ausencia total de este tipo de ondas.
La poca radiación infrarroja que producen es consecuencia del calentamiento del LED por efecto Joule (I^2R)
- Robustez: Como los LED no usan ningún tipo de filamento del cual dependa su funcionamiento, son resistentes a impactos y se evitan las variaciones de luminosidad.
- Son fácilmente dimerizables, es decir, que se puede variar el flujo luminoso dependiendo de la necesidad de iluminación. Para dimerizar las luminarias es necesario variar la corriente de alimentación. Por el contrario, en luminarias tradicionales no suelen tener la dimerización como una opción operativa. (Briñón Vélez, 2014)
- Control del flujo hemisférico superior: Es el flujo emitido por encima del plano horizontal. Algunas luminarias son omnidireccionales, por lo cual se necesita un mayor control del flujo luminoso usando reflexiones y refractores, sin embargo un porcentaje de luz es emitido hacia el cielo. Por el contrario el LED es una fuente puntual dirigida por lo cual, controlar la distribución luminosa hacia el plano del trabajo,

- es más fácil y se puede evitar la contaminación lumínica. (Castañeda Duque, 2010)
- Reproducción de color (CRI): El LED tiene una mejor reproducción de color respecto a la mayoría de luminarias, por lo cual es óptima para la iluminación pública.
 - Encendido inmediato: Las luminarias LED encienden, logrando el 100% de su intensidad luminosa en microsegundos. Por el contrario las luminarias HID necesitan cerca de cerca de 15 minutos para tener su flujo lumínico total, pues necesitan alcanzar una temperatura para que los electrones ionicen el gas y se establezcan los valores nominales.
 - Los cambios bruscos en la tensión de línea son un factor determinante en la disminución acelerada de la vida útil de las luminarias de vapor de sodio. En cambio en la mayoría de las luminarias LED los drivers son fuentes suicheadas que admiten variaciones muy grandes en el voltaje de entrada sin modificar la corriente de salida, garantizando la estabilidad eléctrica de los LED.
 - Las luminarias de vapor de sodio utilizan balastos que las hacen inductivas a la red, por lo que consumen potencia reactiva adicional, no estimada en su consumo nominal. En el caso de los drivers para luminarias LED se garantizan factores de potencia mayores a 0.98, lo que las hace prácticamente resistivas.
 - Los rayos ultravioleta, ya sean producidos por la luz solar o por la luminaria en sí misma, deterioran la mayoría de los plásticos utilizados en la óptica o en la protección de la

luminaria (policarbonatos). Con el tiempo el policarbonato se deteriora volviéndose amarillento y disminuyendo su capacidad de transmitir la luz por lo que disminuye la eficiencia de la luminaria. En el caso del vapor de sodio y las HID, la misma luminaria produce gran cantidad de luz ultravioleta coadyuvando en el deterioro del plástico de protección y/o refracción.

En las luminarias LED, las que utilizan policarbonato (en algunos casos lexan) el efecto de deterioro solamente aparece por la radiación de la luz solar. Algunas luminarias LED mejoran la condición utilizando lentes de cristal que a su vez actúan como elemento de protección y refracción.

- Las luminarias LED no producen efecto estroboscópico, es decir que no presentan parpadeo, ya que se alimentan con corriente directa. El flicker o parpadeo genera cansancio visual, ya que hace que el ojo se adapte a las disminuciones de luz contrayendo y dilatando la pupila rápidamente. (Brión Vélez J. , 2015)

2.6. Desventajas de las luminarias LED

Podría decirse que son bajas las desventajas que presenta la iluminación LED, en comparación con todas las ventajas previamente mencionadas. Sin embargo algunas de sus principales desventajas son:

- Alto costo económico: La inversión inicial que presenta la utilización de esta tecnología puede parecer exagerado. Sin

embargo, con el transcurso del tiempo, se notan el ahorro en el consumo de energía, en el poco mantenimiento que necesita, en su larga vida útil. Puede decirse que la inversión inicial se recupera en poco tiempo.

- Poco tiempo en el mercado: Por este motivo se resta fiabilidad con modelos tradicionales. Abrir la mentalidad de las personas a nuevas tecnologías a veces puede requerir de cierto tiempo.
- La vida útil de las luminarias LED puede disminuir notoriamente cuando éstas trabajan a altas temperaturas (mayores de 65 °C). Por este motivo se debe contar con dispositivos adecuados para la disipación térmica.
- La luz azul puede ser altamente contaminante, por este motivo las luminarias blancas (las cuales contienen un alto porcentaje de luz azul), deben ubicarse de forma que no irradien luz hacia arriba, evitando contaminar lumínicamente el cielo.
- (Briñón Vélez J. , 2015)

2.7. Introducción al RETILAP

2.7.1 Objetivo

El RETILAP “tiene por objeto fundamental establecer los requisitos y medidas que deben cumplir los sistemas de iluminación y alumbrado público, tendientes a garantizar: los niveles y calidades de la energía lumínica requerida en la actividad visual, la seguridad en el abastecimiento energético, la

protección del consumidor y la preservación del medio ambiente; previniendo, minimizando o eliminando los riesgos originados, por la instalación y uso de sistemas de iluminación”. (Ministerio de Minas y Energía, 2010)

El Reglamento establece las reglas generales que se deben tener en cuenta en los sistemas de iluminación interior y exterior, en especial las de alumbrado público en el territorio colombiano, inculcando el uso racional y eficiente de energía (URE) en iluminación. Para lograr estos objetivos especifica las exigencias mínimas para que se garantice la seguridad y confort en las instalaciones, teniendo como base en un buen diseño y desempeño operativo, además de los requisitos de los productos empleados en estas instalaciones. (Ministerio de Minas y Energía, 2010)

Además de ser un reglamento técnico es un instrumento legal para Colombia, pues se asegura que los sistemas de iluminación cumplan con los siguientes objetivos:

La seguridad nacional en términos de garantizar el abastecimiento energético mediante uso de sistemas y productos que apliquen el uso racional de energía.

- La protección de la vida y la salud humana.
- La protección de la vida animal y vegetal.
- La prevención de prácticas que puedan inducir a error al usuario.
- La protección del medio ambiente.

2.7.2 Alcance

El RETILAP aplica para las instalaciones, productos y personas relacionadas con los sistemas de iluminación de la siguiente forma:

Instalaciones: Las normas y requisitos son obligatorias para toda instalación de iluminación nueva, remodelación o ampliación a partir de su entrada en vigencia.

Productos: Todos los productos usados en sistemas de iluminación deben demostrar su conformidad con RETILAP, mediante un certificado de producto.

Personas: Toda persona que diseñe, construya, mantenga y ejecute actividades relacionadas con las instalaciones de iluminación deberá cumplir y estudiar este reglamento. Además la persona que diseñe deberá entregar un documento en el cual se manifieste que el diseño cumple con los requisitos aplicables del RETILAP. (Ministerio de Minas y Energía, 2010)

Conformidad con el reglamento: Toda instalación de iluminación requiere de la declaración de conformidad, además de un dictamen de inspección expedido por un organismo acreditado.

3. ELEMENTOS CONSTRUCTIVOS ADICIONALES PARA ALIMENTACIÓN Y CONTROL DE LAS LUMINARIAS

En este capítulo se presenta un breve resumen explicativo de la telegestión, las baterías y los paneles solares, los cuales son parte importante dentro del desarrollo de este trabajo de grado.

En primer lugar se hará una descripción de los sistemas de telegestión, presentando sus principales componentes y ventajas de su implementación.

Luego se expondrá la definición, clasificación y funcionamiento de las baterías, explicando porque se han estudiado y desarrollado tanto las baterías en la actualidad. También se explica cuál es su función dentro de la Micro-red de la UPB.

Además se presenta una breve definición sobre los paneles solares, luego se explica su funcionamiento y sus principales aplicaciones y usos. Por último se expone la calificación según el material que los constituye.

3.1. Telegestión

3.1.1 Definición de Telegestión

La telegestión es un sistema que permite realizar un control y supervisión remoto de los equipos de una red, además de las señales de entrada y salida, a través de la comunicación en una o dos vías entre un centro de control (fijo o móvil) y los equipos. El

módulo de telegestión debe ir conectado a distintos elementos, sensores e instrumentos de medida para poder enviar y recibir información. (Rueda Valdivieso, 2014)

Otra buena definición es que es una herramienta para el control y la gestión remota de las redes, constituida por estaciones remotas conectadas a las instalaciones, captadores y *softwares* para la centralización. (Ramírez Pinto, 2012)

Los sistemas de telegestión pueden aplicarse en cualquier proceso industrial o residencial. En este caso se usará para las luminarias de la micro-red, logrando el manejo, control (encender, apagar, regular flujo de las luminarias según la programación, manual o de acuerdo a parámetros externos), supervisión o monitoreo (horas de funcionamiento, consumo de energía, estado de las luminarias y de la red), adquisición de datos, etc de las luminarias del sistema.

La operación de un sistema de alumbrado público, bajo un modelo de telegestión, está fuertemente relacionada con los principios de optimización de los recursos, de la maximización de los beneficios, como es el ahorro de la energía, prevención de daños en las luminarias y mejorar la calidad y confiabilidad del servicio de alumbrado ofrecido a la comunidad. (Suárez Acevedo, 2010)

3.1.2 Componentes

Suele estar constituida por varios elementos, a saber:

- Puesto de supervisión o centro de control, cuya función es monitorear la operación de las lámparas, por medio de las

decisiones en base de parámetros de control y los datos de operación.

Red de comunicaciones (que entre las luminarias mismas se hace normalmente en frecuencias de radio en la banda de UHF).

- Estaciones de telegestión.

- Sensores de campo o terminales remotas, las cuales se encargan de la recolección de la información de las luminarias para enviarlas al centro de control, además de recibir las señales enviadas desde el centro de control para enviarlas a los controles de luz y poder llevar a cabo los comandos para modificar el estado de funcionamiento de las luminarias. (Encalada Espinoza, 2012)

3.1.3 Ventajas de la implementación de telegestión

- Se puede controlar el buen funcionamiento de la instalación.
- Se pueden enviar órdenes a distancia.
- Almacenar información sobre las luminarias y su funcionamiento.
- Agrupación de las luminarias por zonas.
- Información predictiva de fallo de las luminarias o información sobre algún fallo.
- Incremento de la vida útil de las luminarias.
- Enviar alarmas al centro de control ante cualquier eventualidad o falla de las luminarias.
- Realizar un análisis preciso de la red de iluminación, pues se tienen sensores para proporcionar los datos de funcionamiento de las luminarias, su rendimiento,

características, etc.

- Optimización de los equipos, pues al estar vigilados las 24 horas del día se puede asegurar su correcto funcionamiento y además, ante la presencia de alguna falla, se envía una alarma para poder tomar las acciones necesarias.
- Se podrá obtener un ahorro de energía, ya que las luminarias funcionarán con total capacidad cuando sea absolutamente necesario y podrán ser dimerizadas dependiendo de la iluminación ambiental del momento.
- Reducción de polución lumínica.
- Mejoras en el mantenimiento del alumbrado público.

(Instaladora Rey Peña S.L) (Sofrel LACROIX) (Acuña Roncancio, 2011)

Todas estas ventajas no solo se presentan para iluminación, sino que puede la telegestión se puede aplicar a diferentes procesos de energía, agua y gas, con el fin de controlar y monitorear varios procesos industriales.

3.1.4 Aplicaciones de la telegestión

- Automatización del funcionamiento de las luminarias.
- Detección de fallas eléctricas y de fallas en la comunicación.
- Dimerización de las luminarias dependiendo de la necesidad y situación
- Monitorear la temperatura de operación, cuando se presenten altas temperaturas se dimeriza la luminaria, es decir que se disminuye la corriente de alimentación, con el fin de proteger su vida útil.

- Monitoreo de voltaje y corriente de operación, con lo cual se pueden determinar la potencia consumida por las luminarias.
- Cuando se agrega un acelerómetro se puede detectar de caída de la luminaria.
- Con los sensores necesarios se puede detectar humedad y vibración.
- Con sensores de movimiento se puede detectar la circulación de personas y así cuando haya alguien caminando la primera luminaria avisa a las otras, que se deben encontrar dimerizadas, que aumenten su flujo luminoso.
- Se pueden programar perfiles horarios, es decir, ajustar ciertas horas a las cuales las luminarias se apaguen, enciendan o dimerizen de forma automática dependiendo de la hora.

3.1.5 Funcionamiento

Las luminarias deben contar con driver de corriente dimerizable con PWM (Pulso-width modulation, es decir, es una técnica en la cual se modifica el ciclo de trabajo de una señal periódica para controlar la cantidad de corriente que le llega a la luminaria) y el módulo para la telegestión. Este módulo controla la fuente para variar la corriente de alimentación de la luminaria y con esto lograr que ésta tenga mayor o menor flujo luminoso, dependiendo de la necesidad.

El módulo de telegestión debe contar con un sistema de comunicación, el cual se encarga de la transmisión de la información al centro de control y desde el centro de control a los

diferentes componentes del sistema de alumbrado público. Existen varios medios de comunicación inalámbrica como radio, WIFI, telefonía celular (GRP/3G). Las señales pueden ser almacenadas en bases de datos y se soportan mediante interfaces gráficas del *software* que esté en el centro de control.

Los operadores pueden acceder a estos datos y analizar cómo responden las luminarias a los diferentes eventos que se presentan. (Rueda Valdivieso, 2014) Si el módulo cuenta con sensores, se pueden agregar diferentes aplicaciones que automaticen aún más el funcionamiento, además de generar mayores beneficios a la hora de ahorro de energía, cuidado y mantenimiento de las luminarias.

Un esquema ilustrativo se presenta en la Figura 12.

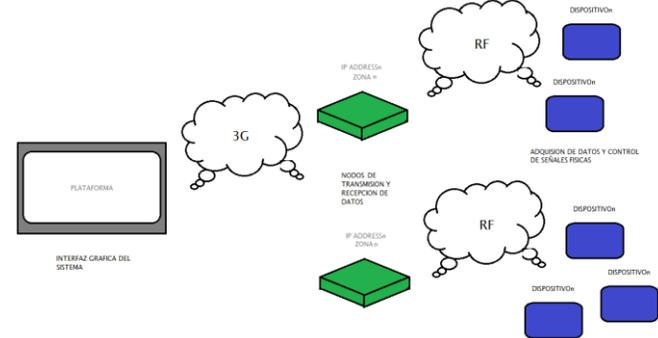


Figura 12. Esquema de funcionamiento de telegestión.
Reproducida con permiso de Pérez (2015)

3.2. Baterías

3.2.1 Definición básica baterías

Comúnmente llamadas Pilas, son elementos que convierten energía química en energía eléctrica por medio de un proceso químico transitorio, después cesa su actividad y se deben renovar sus elementos constituyentes, ya que sus características resultan alteradas.

Su funcionamiento se da con una reacción química que produce en el terminal negativo una gran cantidad de electrones y en su terminal positiva una ausencia de éstos, con lo cual se genera una diferencia de potencial haciendo circular una corriente que saldrá del terminal negativo hacia el positivo, pasando a través del circuito al que está conectado. (Padrón Jabib, 2013)

Las baterías han tenido un gran desarrollo en los últimos años logrando una relación potencia/peso muy alta. Son dispositivos indispensables hoy en día, ya que se utilizan, de forma masiva, en la sociedad, en celulares, vehículos de transporte, relojes, computadores, radios y hasta en cargas esenciales, las cuales necesitan suministro constante, así que cuando falla la red se conectan a las UPS (uninterrupted power source) para garantizar un suministro continuo de energía.

En los sistemas fotovoltaicos suelen utilizarse baterías de ciclo profundo que pueden ser de gel, de líquido o de nuevos componentes como el ion-litio.

3.2.2 Clasificación de las baterías según material de construcción

La clasificación básica se da según el material puede ser:

- Níquel-Cadmio: Muy comunes en el mercado. Pueden tener una duración promedio de 3 años.
- Níquel-Metal-Híbrido: Permiten el almacenamiento de mucha más energía (30% más que las de Ni-Cd), por lo cual son muy usadas en dispositivos móviles.
- Litio: Consiguen un nivel más alto de almacenamiento de energía, pero presentan un alto costo, lo cual no ha sido un impedimento para que tengan gran parte del mercado.

Observando la ventaja que traía el uso de las baterías se empezó a investigar sobre la forma de que éstas fueran recargables, dándole un nuevo significado a la palabra batería. “Arreglo de celdas electroquímicas capaz de almacenar energía eléctrica mediante una reacción química que, durante la descarga se revierte espontáneamente en los electrodos cuando ellos están conectados a través de un circuito externo produciendo así una corriente eléctrica”. (Padrón Jabib, 2013)

3.2.3 Funcionamiento de las baterías

El funcionamiento está basado en un proceso reversible, en el cual los componentes no se consumen ni se pierden, solo se transforman en otros que, en condiciones adecuadas, pueden volver al estado inicial. Se conforman de varias celdas en serie o paralelo. Éstas se constituyen de dos electrodos, electrolito y

separadores. Los electrodos se sumergen en el electrolito y los separadores aíslan las placas de diferente polaridad, para evitar los cortos circuitos en el interior de la batería. Estos separadores deben tener buena resistencia mecánica, resistencia a la oxidación y ser buenos aislantes, entre otras características.

La función del electrolito suele ser una solución acuosa que permite la transferencia de electrones, para servir como conductor entre el electrodo positivo y el electrodo negativo.

Los electrodos pueden ser de cualquier metal, sin embargo algunos metales permiten mayor acumulación de energía.

3.2.4 Desarrollo y evolución en los últimos años

Los vehículos eléctricos han ido evolucionando y mejorando, por la necesidad de disminuir el consumo de combustibles fósiles, además de ayudar a disminuir la emisión de gases contaminantes a la atmósfera. Por este motivo el avance de las baterías ha sido considerable en los últimos años, pues las baterías usadas en los vehículos eléctricos deben ser de peso y tamaño reducido, tener un ciclo de vida prolongado, proveer suficiente energía para que el vehículo tenga autonomía y ser segura y de costo considerable. Otro factor a considerar es el tiempo de carga, pues algunas personas necesitan la disponibilidad permanente de sus vehículos.

Otro factor que impulsó el desarrollo y mejoramiento de las baterías es el aumento del uso de las energías renovables. Uno de los desafíos en este ámbito es permitir el flujo de energía, pues ésta no se genera constantemente. Las baterías en este caso deben

permitir ajustes de potencia, estabilidad en la red y disponibilidad permanente de energía. (Padrón Jabib, 2013)

3.2.5 Las baterías en la Micro-red de la UPB

En la Micro-red de la UPB, para el almacenamiento de energía se utilizará un sistema BESS (Batería energía storage system), para almacenar la energía generada por los paneles solares instalados en las porterías peatonales. Las baterías serán de plomo ácido de gel selladas, que requieren poco mantenimiento y son menos lesivas al medio ambiente. Tienen una duración de 3 a 5 años con un ciclo profundo, es decir que soportan descargas prolongadas. (UPB, 2014)

Para las luminarias LED se busca instalar paneles solares, donde sea posible (es decir donde haya radiación solar suficiente), con el fin de almacenar energía en unas baterías, para que las luminarias funcionen en la noche sin tener que estar conectadas a la red.

3.3. Paneles Solares

3.3.1 Definición básica de paneles solares

Las celdas fotovoltaicas son dispositivos fotoeléctricos que convierten la energía lumínica en energía eléctrica sin antes pasar por un estado de energía térmica, por medio de materiales capaces de modificar sus características eléctricas cuando se ven sometidos a la radiación electromagnética. Estos materiales son los semiconductores. (Valencia Gallón, 2013)

Las celdas no tienen partes mecánicas, están compuestas de materiales semiconductores, con propiedades como una alta conductividad y baja resistencia eléctrica. Estos materiales se unen a contactos de metal para completar el circuito, que se encapsula en vidrio o plástico. (Carillo Yáñez & Morales López, 2009) Las celdas se ponen en serie para conseguir voltajes adecuados, ya que cada una puede generar en promedio 0.47 voltios.

3.3.2 Funcionamiento y aplicaciones de los paneles solares

Su funcionamiento se basa en el paso de electrones de los materiales semiconductores a un estado situado en la banda de conducción, por la energía obtenida en la absorción de fotones de la luz del sol. Este fenómeno genera una corriente eléctrica a través del circuito. Cuando se libran los electrones, éstos dejan huecos en el material.

Para lograr esta situación se utilizan dos tipos diferentes de materiales, uno que tenga 4 electrones de valencia y otro que tenga 3 o 5 electrones de valencia, con el fin de que al que le falte un electrón (quede con carga positiva, capa P) y otro quede con carga negativa (Capa N). Esto genera una diferencia de potencial entre la capa N y la P. Si se conecta una carga o un elemento que cierre el circuito, se genera la circulación de corriente eléctrica.

El nivel de energía generado por un panel fotovoltaico depende, principalmente de: Tipo de panel y área, nivel de radiación e insolación y longitud de onda de la luz solar.

El nivel de potencia de salida se denomina potencia pico, el cual indica la potencia máxima entregada por el conjunto de celdas bajo las siguientes condiciones: Radiación de 1000 W/m², Temperatura de 25 °C de la celda y masa de aire de 1,5.

Son una solución apropiada en muchos sitios lejanos a la interconexión eléctrica para reemplazar plantas eléctricas de combustibles fósiles. Tienen larga vida útil (aproximadamente 25 años) y son de fácil mantenimiento.

Se utilizan en el espacio, para alimentar los satélites y sondas espaciales. Donde los niveles de radiación son mucho más elevados, pues no tienen que atravesar la atmósfera. En la tierra se usan desde para energizar calculadoras o relojes, hasta parques solares, los cuales puedes estar o no conectados a la red.

3.3.3 Clasificación de los paneles solares

Según su estructura se pueden clasificar en 3 tipos: Cristal simple, Multicristalino y amorfo.

- Cristal simple: Su estructura presenta un orden periódico de átomos y deben encontrarse de materiales puros. La estructura se alinea en una dirección y por esto cuando el sol incide sobre la celda en un ángulo correcto se vuelven muy eficientes, es decir que funcionan de manera adecuada con el sol brillando sobre de ellas de forma brillante.
- Multicristalino: El material con el que se hacen las celdas solares es más económico que en los cuales se necesitan materiales de alta pureza, sin embargo se debe buscar el tipo

y la concentración de impureza deseada. Se fabrican con secciones de silicio en forma de bloques para formar los paneles. Como todos los cristales no se encuentran alineados se generan pérdidas, lo cual los hace menos eficientes. Sin embargo en los casos en la cual la luz proviene de todos los ángulos, pueden funcionar mejor.

- Materiales Amorfos: Se han desarrollado con la intención de producir celdas solares de bajo costo y sin temor que se dé una escasez de la materia prima. Ya que el silicio y el hidrogeno son abundantes se ha desarrollado el uso de estos materiales.

Esta alternativa tiene ventajas como que es útil en otros procesos de la microelectrónica, generando celdas solares para relojes o calculadoras, presenta un coeficiente de absorción elevado lo cual los hacen los paneles más eficientes.

La capa amorfa extrae más energía de la luz solar, en especial en condiciones de poca luz.

Existen otros materiales que se están utilizando para el desarrollo de los paneles, como lo son:

- Polímeros orgánicos, los cuales son capaces de reaccionar u liberar electrones en presencia de la radiación solar. Por ejemplo se están desarrollando paneles de películas coloreadas o transparentes, que pueden instalarse en ventanas y las cuales poseen baja dependencia a la temperatura y al ángulo de luz, por lo que se puede conseguir una buena potencia durante todo el año.

- Microestructuras CIGS (Cobre, Indio, Galio y Selenio), los cuales se pueden instalar en techos, fachadas, ventanas, etc. Se denominan de película delgada (thin-film). (Pereda Soto, 2005) (C-Changes, 2011) (Simec Chile SRL, 2013)

3.3.4 Los paneles solares de la Micro-red de la UPB

El sistema solar fotovoltaico de la universidad cuenta con paneles solares de marca Yingli Solar, los cuales producen 25 kWp y la energía generada se consume por las cargas de iluminación del parqueadero. Es un sistema que se encuentra conectado a la red.

La generación anual estimada es de 34 MWh/año, utilizando 104 paneles de 245 Wp cada uno. (Hybrytec, 2015)

4. METODOLOGÍA

En este capítulo se presentan los principales requisitos que se tienen en cuenta a la hora de hacer los diseños de iluminación de las troncales de la UPB y para cualquier proyecto de iluminación de vías peatonales. En éstos se intentará utilizar la infraestructura existente de ser posible con el fin de disminuir los costos iniciales. También se presenta un breve diagrama de flujo con el fin de ilustrar el procedimiento adecuado para realizar un diseño de iluminación exterior.

4.1. Requisitos generales de diseño de alumbrado público

Para realizar el diseño de iluminación de alumbrado público se deben tener en cuenta ciertos requisitos según RETILAP, como lo son:

Requerimientos de visibilidad: Se debe garantizar que las personas puedan desarrollar las actividades normales propias del lugar, sea tanto en una vía peatonal, de ciclismo o vehicular.

Para lograr este objetivo se debe tener comodidad visual y confiabilidad de la percepción aplicando luz en cantidad adecuada y de calidad sobre el área de trabajo. Entonces se debe seleccionar una fuente y una luminaria que logre los requisitos de iluminación con buenas interdistancias, menores alturas de montaje y menor potencia eléctrica.

Cantidad y calidad de luz: El objetivo principal del alumbrado público es permitir que las personas que circulan por las vías puedan transitar de forma segura, cómoda y a velocidades adecuadas.

La seguridad se logra cuando, gracias a la buena iluminación, los usuarios pueden evitar obstáculos, como los bordes, curvas, separadores, señalización visual y todas las formas de las vías.

Confiabilidad de la percepción: Los objetos pueden verse cuando existe un contraste superior al mínimo requerido por el ojo, el cual depende del ángulo de visión y de la distribución de la luminancia en el campo visual. Para lograr la confiabilidad se deberá proveer una luminancia promedio y tener un limitado el deslumbramiento de las fuentes de luz, además de buscar que los puntos de luz mantengan un promedio similar para lograr una buena uniformidad y por ende no existan puntos de alta luminosidad y otros muy oscuros.

Comodidad visual: La incomodidad visual genera cansancio en los ojos, lo cual puede generar falta de concentración en los usuarios. La comodidad visual se da cuando la iluminación permite un buen nivel de adaptación del ojo, es decir, un aumento de la luminancia promedio y tener una buena uniformidad, para evitar el efecto cebrado, es decir zonas muy iluminadas y otras muy oscuras. Este factor genera fatiga visual.

Evaluación económica y financiera: En la cual se incluyan costos de inversión, mantenimiento y operación (costos energéticos) durante la vida útil del proyecto.

Uso racional y eficiente de la energía: Es decir que deben cumplir con los requisitos fotométricos y no exceder los valores de densidad de potencia.

Para el diseño de iluminación en una instalación de alumbrado público se deben tener en cuenta: la velocidad de circulación,

frecuencia y naturaleza de los obstáculos en la vía y el tipo de usuarios. (Ministerio de Minas y Energía, 2010)

4.2. Reglamentación en el diseño de alumbrado público

En la Figura 13 se presenta un diagrama de flujo explicativo de cómo desarrollar adecuadamente un diseño de alumbrado público, con las diferentes etapas a tener en cuenta.

Las áreas a iluminar en la Micro-red son 4 troncales. Las troncales 1, 2 y 4 se asumirán como vías peatonales y la troncal 3 se define como una vía vehicular. Para las zonas peatonales se debe garantizar que peatones y ciclistas puedan distinguir la textura del pavimento, configuración de bordillos, escalones, marcas y señales.

En la Tabla 1 se presenta la clasificación de las vías peatonales y los requisitos de iluminación. Para la iluminación de las troncales de la UPB se asumirán como vías con clasificación P5, ya que la circulación de peatones y ciclistas es baja en horas de la noche y es una zona segura.

La troncal 3 se asumirá como una M5, ya que el flujo vehicular es reducido y la velocidad de circulación es baja. En la Tabla 510.1.1.b se puede afirmar que esta vía es una vía de acceso a zona escolar con poco flujo y poco compleja. Las consideraciones técnicas del diseño para esta troncal se presentan en la Tabla 2, en la cual se resume la información suministrada en las Tablas 510.1.1.a, 510.2.1.a y 510.2.1.b, del RETILAP. Únicamente se presentará la información para las vías clasificadas como M5, que

son las de interés en este estudio. (Ministerio de Minas y Energía, 2010)

4.3. Coexistencia de las luminarias con los árboles en las vías

Otro factor importante a tener en cuenta en el diseño de estas troncales de iluminación es cuando hay la presencia de árboles en las vías a iluminar, ya que en la mayoría de las zonas de la universidad se cuenta con amplias zonas verdes. Por este motivo se debe lograr una coordinación entre la arborización y la iluminación pública, efectuando desviaciones en los parámetros generales del diseño, como la altura de montaje, interdistancia, disposición de luminarias o su brazo de montaje, dependiendo de la vegetación considerada. (Ministerio de Minas y Energía, 2010)

No es necesario podar los árboles más allá de las ramas que interfieran con el haz luminoso útil, ya que el follaje restante permite mejorar el apantallamiento de la instalación u por ende, mejorar la visibilidad de obstáculos por efecto silueta.

Si se debe cambiar la interdistancia de las luminarias en un 10%, lo cual no afectará la calidad de la iluminación de manera apreciable. El parámetro principal a domificar, por efecto de arborización es el avance de la luminaria sobre la calzada, el cual depende del brazo, garantizando la efectividad y apariencia de la instalación de alumbrado. (Ministerio de Minas y Energía, 2010)

Se debe conceder importancia a la existencia de árboles en el contexto urbano, intentando armonizar la presencia de las luminarias con la arborización. Por este motivo se debe coordinar

y jerarquizar las prioridades en la localización de los diferentes elementos urbanos. (Ministerio de Minas y Energía, 2010)

Tabla 1. Descripción y requisitos de iluminación para tráfico peatonal

Descripción de la vía	Clasificación	Iluminación Horiz (lx)		Uniformidad
		Promedio	Mínimo	
Vías de muy elevado prestigio urbano	P1	20,0	7,5	0,375
Utilización nocturna intensa por peatones y ciclistas	P2	10,0	3,0	0,300
Utilización nocturna moderada por peatones y ciclistas	P3	7,5	1,5	0,200
Utilización nocturna baja por peatones y ciclistas, únicamente asociada a las propiedades adyacentes	P4	5,0	1,0	0,200
Utilización nocturna baja por peatones y ciclistas, únicamente asociada a las propiedades adyacentes.	P5	3,0	0,6	0,200
Utilización nocturna muy baja por peatones y ciclistas, únicamente asociada a las propiedades adyacentes.	P6	1,5	0,2	0,133

Tabla 2. Descripción y requisitos de iluminación para tráfico vehicular M5

Descripción vía	Velocidad de circulación		Tránsito de vehículos		Valor promedio de iluminancia (lx)	Uniformidad de iluminancia
Vías secundarias	Muy reducida	Al paso	Muy reducido	T<100 veh/h	9	18%

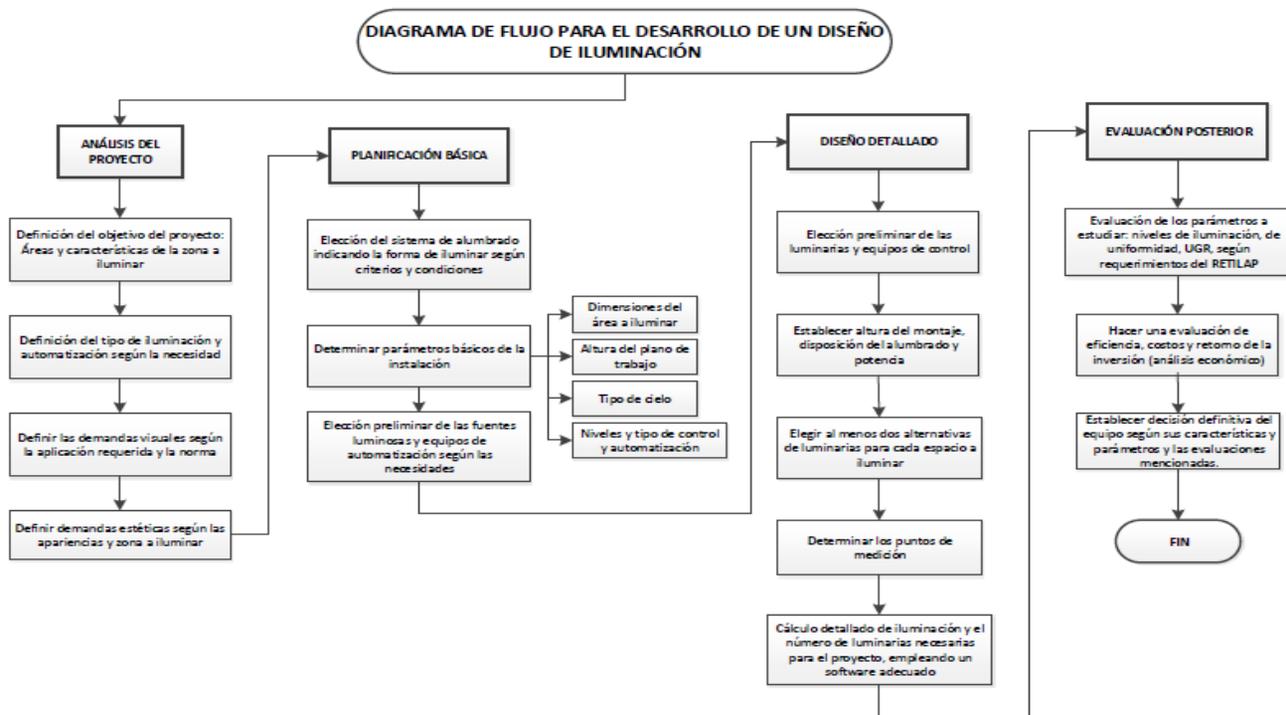


Figura 13. Diagrama de flujo para el diseño de alumbrado público. Adaptado de (Loteró Mesa, 2012)

5. DISEÑOS Y RESULTADOS

En este capítulo se presentan los diseños de las diferentes troncales de iluminación, además de una breve descripción sobre cada una, con fotos ilustrativas sobre su respectiva ubicación. Los resultados completos, entregados por el *software* Dialux 4.12 se presentan en el Anexo A. En el Anexo B se presentan los catálogos con las características técnicas de las luminarias seleccionadas para realizar estos diseños.

Los diseños se realizaron intentando utilizar la infraestructura existente en la universidad.

5.1. Diseño Troncal de iluminación 1

La primera troncal está ubicada entre la portería peatonal de la circular primera y la portería de la avenida bolivariana. Al ser un recorrido, para hacer el análisis en el programa, se dividió en tres partes. Como se muestra en la Figura 14 se presenta un esquema representativo de estas particiones.

En las Figuras 15, 16 y 17 se presentan fotos reales de las diferentes partes de la troncal 1 con el fin de ilustrar su ubicación y estado actual.

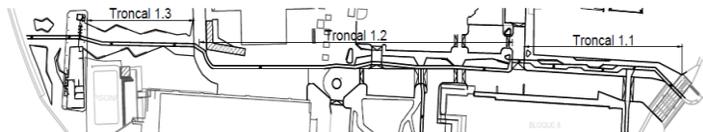


Figura 14. Ubicación Troncal 1



Figura 15. Foto real Troncal 1.1

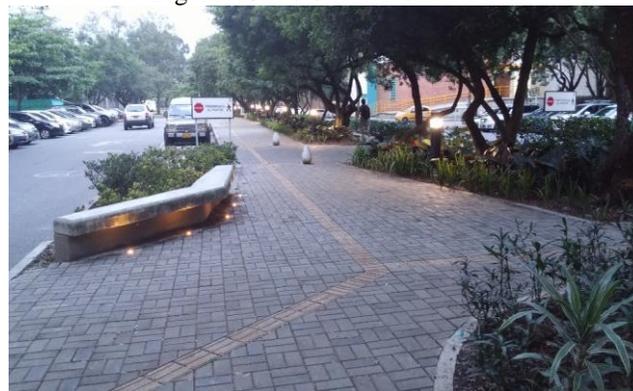


Figura 16. Foto real Troncal 1.2



Figura 17. Foto real Troncal 1.3

En la siguiente tabla se presentan los resultados obtenidos para la primera troncal con las diferentes luminarias utilizadas.

Se aclara que la troncal 1.3 ya está construida y en funcionamiento, por este motivo únicamente se modeló con la luminaria allí instalada. De igual manera se hizo la simulación con el fin de garantizar que se cumpla con los niveles de iluminancia y uniformidad exigidos por la norma.

Por la baja densidad de arborización las troncales 1 y 3 se hace el diseño teniendo en cuenta que las luminarias ubicadas en estas troncales sean alimentadas por paneles solares respaldados por baterías.

Tabla 3. Resumen resultados Troncal 1

Troncal 1.1		
Luminaria	Iluminancia Media E_m (lx)	Uniformidad E_{min}/E_m
Microplus Germany	15	0.340
Philips	22	0.269
Schreder	11	0.5
Troncal 1.2		
Luminaria	Iluminancia Media E_m (lx)	Uniformidad E_{min}/E_m
Microplus Germany	14	0.196
Philips	16	0.216
Schreder	10	0.337
Troncal 1.3		
Luminaria	Iluminancia Media E_m (lx)	Uniformidad E_{min}/E_m
Cree	19	0.225

5.2. Diseño Troncal de iluminación 2

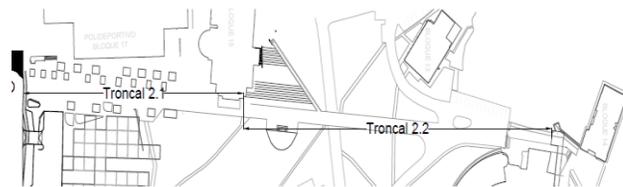


Figura 18. Ubicación Troncal 2

Esta troncal se encuentra ubicada por todo el Boulevard llegando hasta la portería peatonal nueva de la 70. Como se muestra en la Figura 18.



Figura 19. Foto real Troncal 2.1



Figura 20. Foto real Troncal 2.2

Debido a que es un recorrido muy largo también se dividió en 2 sub-troncales, con el fin de facilitar su simulación. En las Figuras 19 y 20 se presentan fotos de cada división y en la Tabla 4 se muestran los resultados obtenidos en la simulación en el *software* Dialux.

Cuando se instalen las luminarias se debe tener en cuenta la coexistencia de las luminarias con los árboles, ya que esta zona se encuentra altamente arborizada como puede apreciarse en las imágenes. Y sí es necesario podar las ramas que generen interferencias con el haz luminoso útil.

Tabla 4. Resumen resultados Troncal 2

Troncal 2.1		
Luminaria	Illuminancia Media E_m(lx)	Uniformidad E_{min}/E_m
Microplus Germany	13	0.462
Philips	16	0.265
Schreder	10	0.496
Troncal 2.2		
Luminaria	Illuminancia Media E_m(lx)	Uniformidad E_{min}/E_m
Microplus Germany	20	0.236
Philips	23	0.247
Schreder	16	0.241

5.3. Diseño Troncal de iluminación 3

Esta troncal se encuentra ubicada al frente del bloque 11. Es la única troncal en la cual se debe tener en cuenta el flujo vehicular. Se presenta un esquema de su ubicación en la Figura 21.

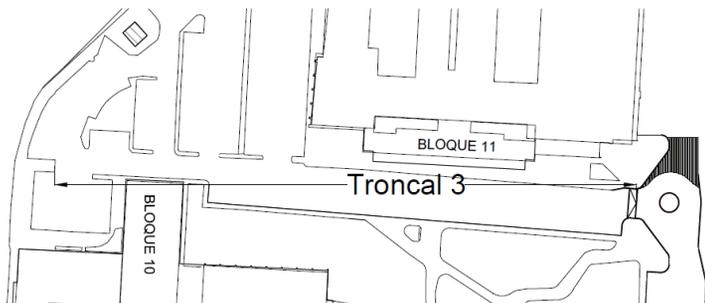


Figura 21. Ubicación Troncal 3



Figura 22. Foto real Troncal 3

Además en la Figura 22 se muestra una foto donde puede apreciarse su ubicación y sistema de iluminación actual.

Además puede observarse que la luminaria existente no cumple con la distancia mínima de seguridad, por tal motivo en el diseño se corrige este error ubicando la luminarias a una menor altura, con el fin de garantizar dicha distancia mínima de 3m.

En la siguiente Tabla se presentan los resultados obtenidos para esta troncal con las diferentes luminarias evaluadas en este diseño.

Tabla 5. Resumen resultados Troncal 3

Troncal 3		
Luminaria	Iluminancia Media E_m (lx)	Uniformidad E_{min}/E_m
Microplus Germany	12	0.241
Philips	15	0.205
Schreder	9.8	0.290

5.4. Diseño Troncal de iluminación 4

Esta última troncal de iluminación se encuentra ubicada en el paseo del pensador, un camino peatonal que llega hasta el bloque nueve, como se ilustra en la Figura 23.

Esta zona de la universidad también cuenta con muchos árboles, motivo por el cual estas luminarias deben conectarse a la red existente o podrían ser alimentadas por paneles solares ubicados en lugares donde la radiación solar sea adecuada.

En la Figura 24 se muestra una foto de dicha troncal con fin de ilustrar su ubicación fácilmente.

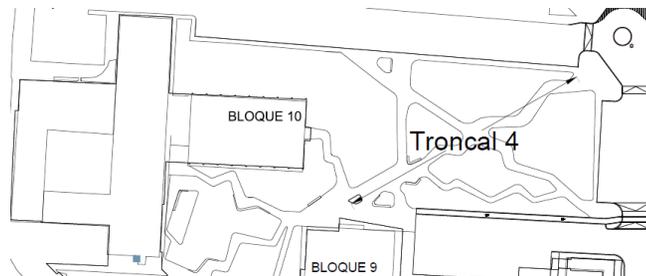


Figura 23. Ubicación Troncal 4



Figura 24. Foto real Troncal 4

En la Tabla 6 se presentan los resultados obtenidos en el *software* Dialux, para el análisis de esta troncal.

Tabla 6. Resumen resultados Troncal 4

Troncal 4		
Luminaria	Iluminancia Media $E_m(\text{lx})$	Uniformidad E_{min}/E_m
Microplus Germany	18	0.282
Philips	21	0.269
Schreder	14	0.309

Como puede apreciarse en el resumen de los resultados, todas las troncales de iluminación, con los 3 diferentes tipos de luminarias utilizadas cumplen con los niveles de iluminancia y uniformidad exigidos por el RETILAP.

En general todas las luminarias se encuentran a una altura de 7,5 m, en postes de concreto de 7 m libres como mínimo. A excepción de 2 luminarias en la Troncal 3, que por estar cerca de una línea de transmisión a 13,2 kV, se ubican a 5,5 m de altura.

Todos los elementos que conformen el sistema deben cumplir con las exigencias propias del RETIE, además de ser aptas para ser instaladas a la intemperie.

6. ANÁLISIS ECONÓMICO

En este capítulo se presenta el estudio económico del proyecto, teniendo en cuenta el costo de inversión inicial, los costos de operación y mantenimiento y el costo anual uniforme equivalente, con el fin de determinar cuál luminaria es la más adecuada para implementar en la Micro-red.

Todo proyecto de alumbrado público debe tener una evaluación de costos evaluando las diferentes alternativas del diseño, teniendo en cuenta los costos de operación, mantenimiento y reposición de los elementos cuya vida útil sea menor a 30 años, con precios constantes (tasas de interés fijas) a la fecha de presentación del proyecto. Además también se debe considerar la inversión inicial. (Ministerio de Minas y Energía, 2010)

El estudio comparativo entre los 3 tipos de luminarias utilizadas en el diseño se hizo para cada troncal de iluminación. Los resultados y cálculos se presentan en el Anexo D de este trabajo de grado. Sin embargo, para sintetizar, solo se muestran en el reporte los resultados y el análisis económico del proyecto completo, es decir, la suma todas las luminarias de cada troncal.

6.1. Costos de inversión inicial (CI)

Para calcular el costo de la inversión inicial se tuvo en cuenta la cantidad de luminarias a utilizar y su precio actual entregado por los respectivos fabricantes en los catálogos, como se muestra en el Anexo B. Los precios tomados para esta parte del análisis no

cuentan con ningún tipo de descuento. Para hallar el costo de la inversión inicial se multiplica la cantidad de luminarias por el precio de cada una. El resultado de dicho cálculo se resume en la Tabla 7, además se desarrolla detalladamente en la hoja CI_Mi_Ph_Sc del Anexo D.

6.2. Costos administración, operación y mantenimiento (CAOM)

En esta parte del análisis se debe considerar un período de evaluación de 30 años, teniendo en cuenta la vida útil de los diferentes componentes del proyecto. El estudio se realizó considerando el cambio de las luminarias, el cambio del driver, el cambio de la carcasa, la limpieza del conjunto óptico de las luminarias y el consumo anual de energía.

Para las luminarias LED se sumen 15 años de vida útil, ya que cuando el flujo luminoso se reduce al 70% debe reemplazarse la fuente luminosa. Sin embargo en algunas luminarias la depreciación lumínica es mucho más lenta, por lo cual este tiempo podría aumentar; pero según la norma, el cambio de las luminarias debe hacerse cada 15 años y así se realizó el estudio.

Además, para los bienes, se debe tener en cuenta el IPP (Índice de precios al productor) que según DANE es de aproximadamente el 3%. Este “indicador reporta la variación promedio de los precios de los bienes que se producen en el país para consumo interno y para exportación” (DANE, 2015). Este factor de aumento se le

aplicó a todos los elementos constituyentes de las luminarias, es decir, el módulo LED, carcasa y driver.

Para calcular el costo anual debe multiplicarse la cantidad de luminarias por el costo unitario por el aumento del IPP del año de estudio. Esto se hace para todos los elementos de las luminarias y para la limpieza de la óptica, la cual debe realizarse todos los años, para evitar la acumulación de polvo y la disminución del flujo luminoso.

Sin embargo el IPP no tiene en cuenta el sector servicios, por este motivo para analizar el porcentaje de aumento del precio del kWh se hizo el estudio de cuanto aumentó el dicho precio del 2013 al 2014. El incremento fue del 5,4% según los datos entregador por EPM. (EMP, 2015)

Debe tenerse en cuenta el consumo de energía de la luminaria. Este cálculo se realiza multiplicando la cantidad de luminarias por la potencia de cada una por la cantidad de horas de funcionamiento. Para este estudio se asumirá que las luminarias están en pleno funcionamiento durante 12 horas (de 6 pm a 6 am), 7 días de la semana y las 52 semanas del año. Es decir, que no se tendrá en cuenta los beneficios de la telegestión, con los cuales los consumos de las luminarias son mucho menores. El precio del kWh asumido para este estudio fue de \$270/kWh, ya que la universidad es un usuario con demanda no regulada y por esto tiene esta tarifa. Para hallar el costo total se suman todos los componentes de operación y mantenimiento y se obtiene el

CAOM para cada año. Luego, para hallar el valor total se hace la suma de los 30 años de operación y mantenimiento.

En las hojas CAOM MIC, CAOM PHI y CAOM SCH del Anexo D se muestra el procedimiento y resultados de forma detallada para cada año de estudio y el valor total. Éste último se presenta en la Tabla 7, para cada una de las luminarias usadas en el proyecto.

6.3. Costo anual uniforme equivalente (CAUE)

Con el CAUE se busca hallar una serie uniforme de pagos, teniendo en cuenta los costos iniciales y los costos anuales de operación y mantenimiento. Esto costos deben traerse a valor presente con la siguiente fórmula:

$$VP(CAOM) = CAOM * \left(\frac{(1+i)^n - 1}{i \cdot (1+i)^n} \right) \quad (4)$$

En la fórmula anterior, i corresponde a la tasa de descuento la cual se establece del 16,06% y n corresponde al número de años del análisis que para este caso es de 30 años. (Ministerio de Minas y Energía, 2010)

Luego debe hallarse el valor presente total del proyecto P_T el cual se obtiene así:

$$P_T = CI + VP(CAOM) - VP(VS) \quad (5)$$

VS es el valor de salvamento al final de la vida útil, es decir el valor de los equipos y elementos del sistema de iluminación al

final de su vida. Para este tipo de proyectos este valor se considera nulo, con lo cual la fórmula se simplifica así:

$$P_T = CI + VP(CAOM) \quad (6)$$

Luego, para hallar el costo anual uniforme equivalente del proyecto, se multiplica el valor total presente por el factor de anualidad, así:

$$CAUE = CAOM + \frac{CI}{(1+i)^n} \quad (7)$$

En la Tabla 7 se hace un resumen de los resultados obtenidos para cada uno de estos parámetros. El cálculo se presenta en la hoja CAUE Mi_Ph_Sc del Anexo D.

6.4. Resultados obtenidos

El CAUE indica el precio uniforme anual equivalente, es decir el precio que habría que pagar cada año por el proyecto durante los 30 años del estudio. Luego de realizar el análisis económico para el proyecto y como se presenta en la Tabla 7, puede apreciarse que la luminaria con menor CAUE es la de Microplus Germany, por lo tanto económicamente es la más factible a utilizar, a pesar de no tener el menor costo de inversión inicial.

En la Figura 25 puede apreciarse la gráfica en la cual se comparan los costos de administración, operación y mantenimiento para las 3 luminarias utilizadas en el diseño. Puede observarse que en año

16 hay un pico muy alto, pues es cuando debe hacerse el reemplazo completo de las luminarias y lo cual genera un gran sobre costo.

También se ve que la luminaria con menor costo de mantenimiento y operación es la de Microplus Germany, ya que no es la más costosa y es la que menor potencia consume. Sin embargo la Schreder tiene un comportamiento muy similar, pero el pico más alto en el año 16, ya que esta luminaria presenta el mayor valor inicial en comparación con las otras dos utilizadas.

Luego, en la Figura 26, se presenta el consumo de energía de las tres luminarias analizadas en el diseño y de las luminarias de vapor de sodio de alta presión existentes en las diferentes troncales de la universidad actualmente. Uno de los objetivos de este trabajo de grado es dar motivos para que dichas luminarias serán reemplazadas por tecnología LED.

Como puede apreciarse en dicha gráfica el consumo de las luminarias convencionales es sumamente alto, superando notoriamente cualquiera de las 3 luminarias LED propuestas en el diseño, con lo cual se corrobora el buen ahorro que se tiene con esta tecnología. Puede apreciarse que la luminaria de Microplus Germany es la que menor consumo presenta, por ser la menor potencia requiere (40 W) comparada con las otras dos Schreder (52 W) y Philips (82,5 W).

También puede apreciarse que los costos aumentan al pasar los años, ya que el precio del kWh aumenta considerablemente como se expuso anteriormente.

Los estudios económicos realizados en este trabajo no consideran el ahorro adicional obtenido si se utilizara telegestión, que puede llegar a ser de hasta un 30% adicional, utilizando sensores de presencia o de tráfico de personas. Las luminarias de vapor de sodio no son susceptibles de ser gestionadas debido al sistema de encendido que posee, el cual requiere cerca de 1 minuto en el mejor de los casos, mientras que estos tiempos en el LED son de despreciables. Además dimerizar las luminarias de vapor de sodio disminuiría su vida útil dramáticamente por lo cual no es muy recomendable y no suele hacerse en este tipo de luminarias.

Por último, en la Figura 27 se hace el estudio del tiempo de recuperación de la inversión inicial. Para hacer este análisis se tiene en cuenta el ahorro que se genera al utilizar las luminarias LED respecto a las convencionales y luego se compara con el CAOM de las luminarias de vapor de sodio de alta presión. Cuando estos 2 valores se igualan puede afirmarse que se recuperó la inversión inicial y, como se ve en la gráfica, luego de ese punto solo siguen ganancias y beneficios. Incluso en el año 16

que es tan crítico, pues hay que reemplazar las luminarias, se sigue teniendo un saldo a favor.

Para recuperar la inversión inicial de la marca Microplus Germany se necesitan 5,21 años, para la marca Schreder se necesitan 5,74 años y para la marca Philips se necesitan 9,89 años.

Luego de apreciar este comportamiento puede afirmarse que invertir en esta tecnología es altamente favorable a mediano y largo plazo, porque así los costos iniciales sean muy elevados, en comparación con las tecnologías tradicionales, el ahorro que se tiene en los años futuros genera gran rentabilidad.

Además se espera una reducción en los precios de las luminarias LED a medida que pase el tiempo, pues se van mejorando las facilidades de producción y va creciendo la competencia de las empresas.

Tabla 7. Resumen resultados análisis económico del proyecto completo

Ubicación	Marca	VP(CAOM)	CI	VS	P _T	CAUE	CAOM
Universidad Pontificia Bolivariana	Microplus Germany	\$ 1.601.357.384	\$70.840.000	\$0	\$ 1.672.197.384	\$260.161.773	\$260.161.773
	Philips	\$2.487.404.334	\$66.800.000	\$0	\$2.554.204.334	\$404.877.992	\$404.111.868
	Schreder	\$1.937.949.363	\$78.448.000	\$0	\$2.016.397.363	\$314.845.610	\$315.845.610

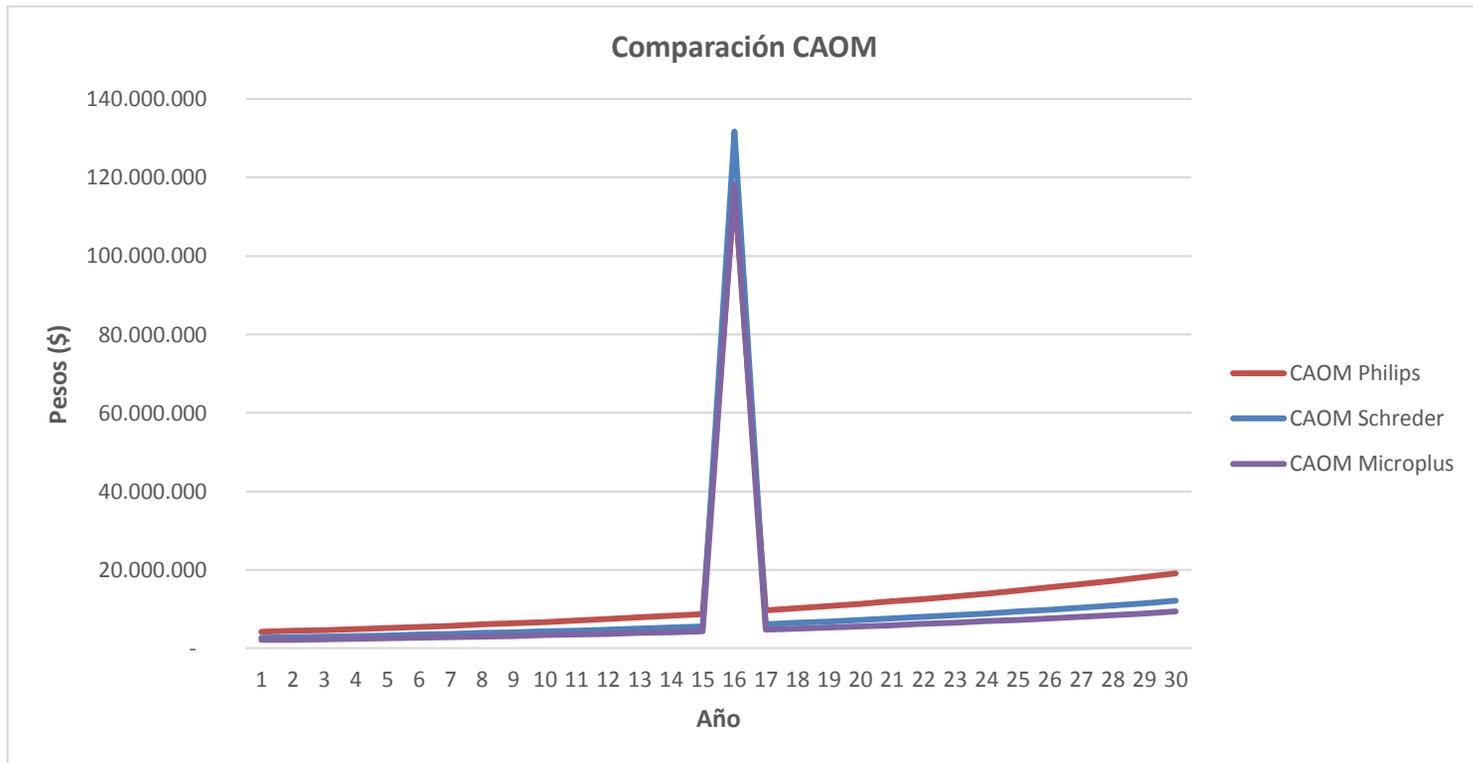


Figura 25. Comparación entre los costos de administración, mantenimiento y operación de las 3 marcas utilizadas

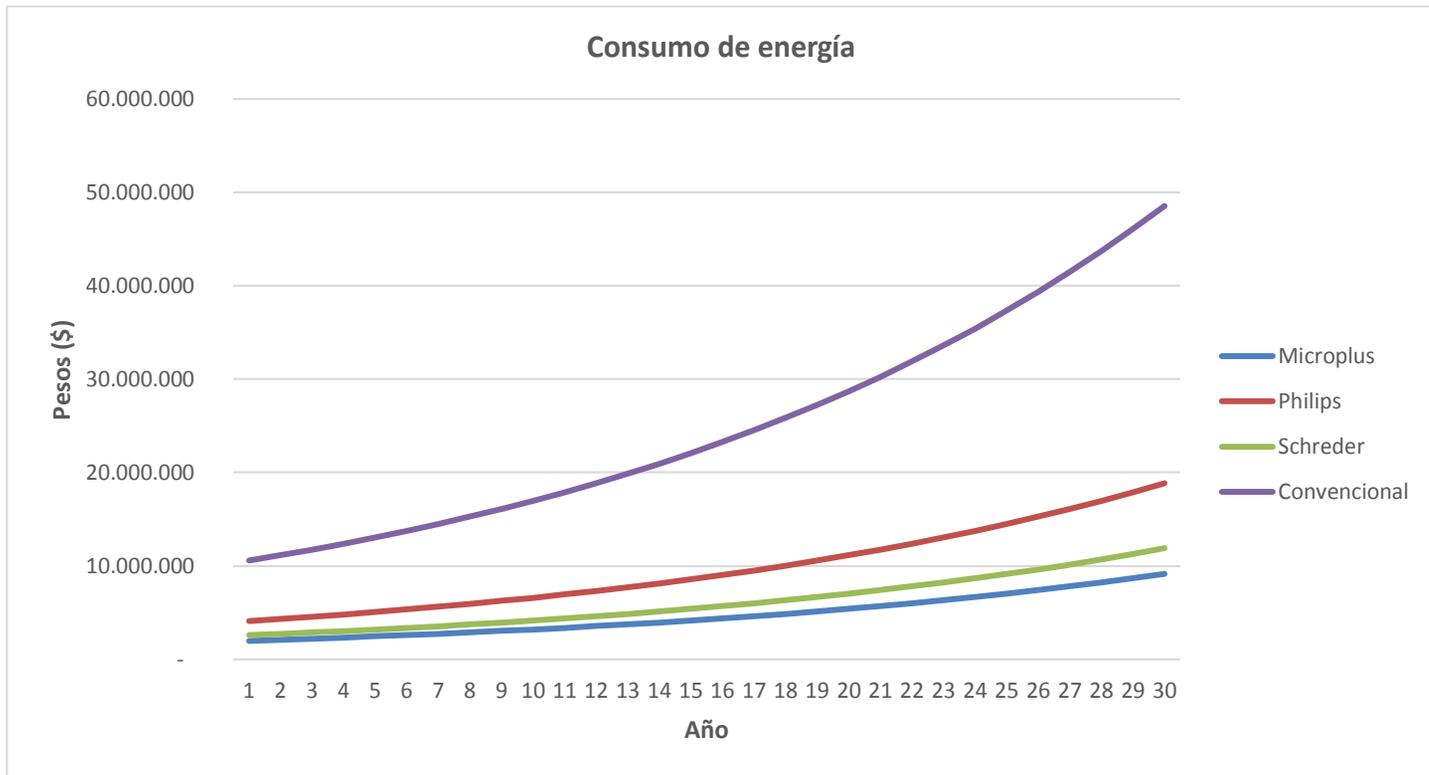


Figura 26. Comparación del consumo de energía de las luminarias

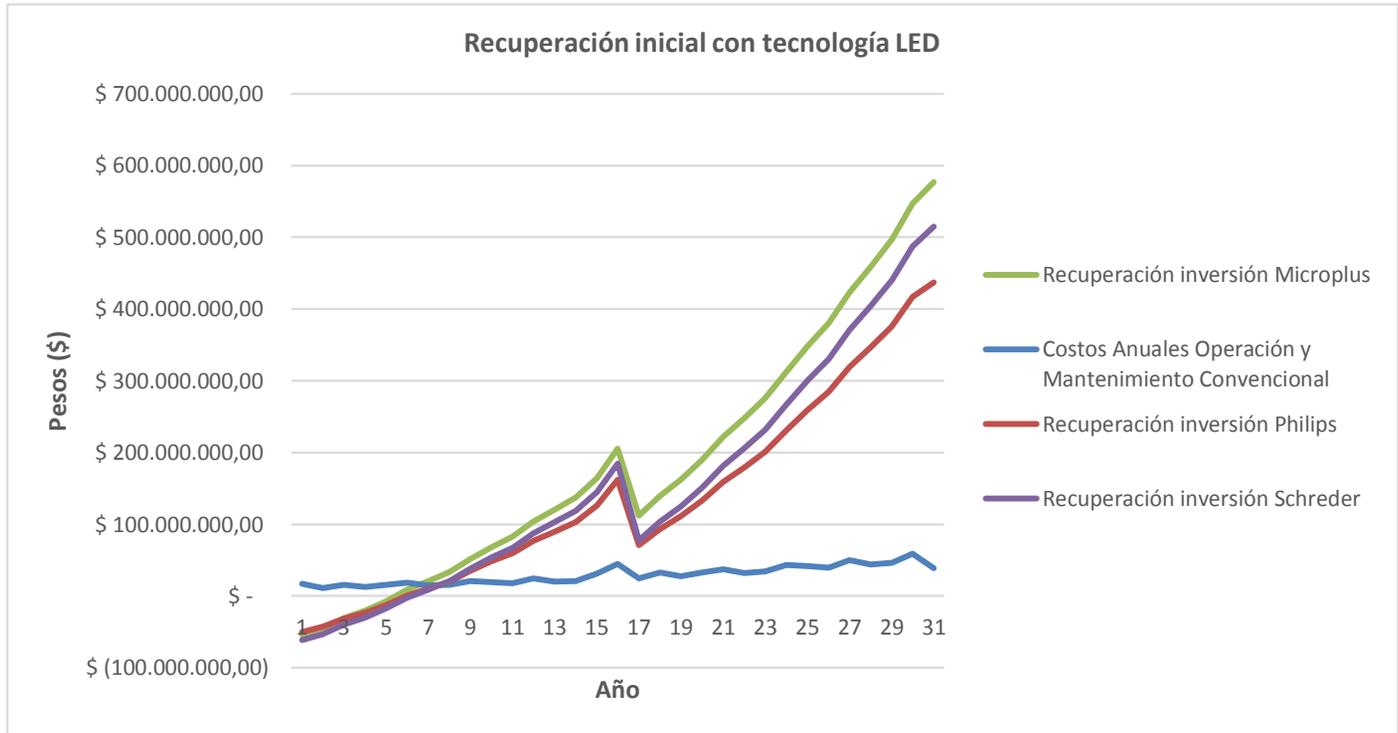


Figura 27. Análisis del ROI (Retorno de la inversión)

7. CONCLUSIONES

Luego de realizar el estudio con el *software* Dialux se puede afirmar que todas las luminarias seleccionadas cumplen con los requisitos mínimos de iluminación exigidos por el RETILAP.

Así en todas las troncales de iluminación se haya utilizado la misma cantidad de luminarias, el consumo energético de la luminaria de Microplus Germany es la que menor potencia consume (40 W), mientras que la de Philips tiene un consumo de 82.5W, es decir un poco más del doble de la primera. La luminaria Schreder tiene un consumo de 52 W, por lo cual también sería muy viable su implementación en proyectos de iluminación de este tipo.

Con los tres tipos de luminaria se obtuvieron los niveles mínimos de uniformidad e iluminancia exigidos por RETILAP, sin embargo la luminaria de Scheder fue la que mostró mejor uniformidad, ya que el nivel medio de iluminancia no era el más alto. En troncales peatonales de poco flujo de personas, este no es un factor determinante.

Entre mayor sea la uniformidad, mejor es la distribución lumínica en el suelo, es decir, se evita el efecto cebra (zonas muy iluminadas y otras muy oscuras). Según los resultados y los renders entregados por el *software* Dialux, la luminaria Philips genera dichos puntos muy iluminados y otros no tanto, lo cual visualmente no es muy atractivo en ningún caso.

La tecnología LED presenta grandes ventajas como una excelente reproducción cromática (mayor a 0.75), es decir que reproduce bien los colores de los objetos, ya que emiten todos los colores del espectro visible. Además tienen una rápida respuesta frente a estímulos de corriente, por lo cual son fácilmente dimerizables, adecuando la cantidad de luz emitida según la necesidad y situación. Como pudo apreciarse en el estudio económico tienen un gran ahorro de energía respecto a las luminarias convencionales.

Luego de realizar el análisis económico puede afirmarse que no solo el precio es el factor determinante para seleccionar una luminaria. Hay que tener en cuenta las características técnicas de la misma, su versatilidad, su consumo energético y los tiempos de retorno de la inversión a la hora de elegir la más apropiada. Con los resultados obtenidos en dicho estudio puede afirmarse que económicamente la luminaria más viable es la de Microplus Germany. Sin embargo dentro de la micro-red se busca evaluar y estudiar diferentes marcas para poder hacer comparaciones, no sólo económicas, sino también técnicas.

A pesar de que los proyectos utilizando luminarias LED tienen un elevado costo inicial, dicha inversión puede recuperarse en un plazo de 6 años aproximadamente. Y aunque parezca mucho tiempo se deben tener en cuenta todos los beneficios y ventajas que tiene su utilización en proyectos de alumbrado público, además de contribuir con el cuidado del medio ambiente, teniendo menores consumos de energía y no poseer elementos

constructivos altamente tóxicos, los cuales serían un problema en el momento de ser desechados.

El protocolo de seguimiento de las características técnicas de las luminarias (Anexo C) podrá determinar cuál de las luminarias instaladas presentan una menor depreciación lumínica en el tiempo, es decir, la disminución de la luz emitida debido a la acumulación de suciedad en la superficie de la fuente emisora o protector y por el envejecimiento en el material de la óptica de la luminaria.

La telegestión es un sistema de gestión de luminarias, con el cual se busca controlar y programar el funcionamiento de las éstas, con el fin de que éstas sean lo más eficiente posible y se logren ahorros adicionales en consumo. La telegestión también permite monitorear cada luminaria independientemente y permite la georeferenciación con lo cual la misma luminaria puede reportar problemas o fallas al centro de control, sin necesidad de ser revisadas permanentemente.

Existiendo tecnologías más eficientes que las convencionales, es lógico que la normatividad al respecto tenga que migrar favoreciendo el uso de estas nuevas tecnologías, no solo por el hecho de ser más eficientes, sino también por su bajo impacto ambiental al momento de desecharlas.

Muchos catálogos omiten datos importantes: Eficiencia lumínica de los LED (lúmenes/vatio), curva de depreciación lumínica, pérdidas en el elemento refractor, reflector y/o protector, información respecto al driver (fijo o variable), datos que son

importantes en el momento de seleccionar las luminarias. En el Anexo B se recopilan de forma ordenada los catálogos de las luminarias propuestas en el diseño, para conocer y poder comparar los datos con el protocolo previamente mencionado.

Para profundizar el uso de Dialux se realizaron las guías de laboratorio presentadas en el Anexo E de este trabajo. Como el RETILAP ya entró en vigencia es importante que los ingenieros electricistas sepan hacer diseños de iluminación que cumplan con la norma.

Así muchas personas tengan aun la mente cerrada, la luminarias LED son una nueva tecnología, eficiente e innovadora, la cual irá tomando fuerza y se irá posicionando en el mercado desplazando las tecnologías convencionales son poco eficientes y muy contaminantes, por lo cual deben salir del mercado lo más pronto posible.

Se debe hacer un reajuste en el análisis de costos teniendo en cuenta que los precios de las luminarias utilizados en el análisis desarrollado son del mes de Julio del 2015, momento en el cual se estaba experimentado una tendencia de la devaluación del peso colombiano. Además se sugiere considerar el costo de la instalación debido a que el objetivo de este trabajo de grado es comparar el precio de las luminarias sin tener en cuenta este valor. La tarifa de la instalación es la misma sin considerar la marca o la tecnología.

Las mediciones de consumo individual de cada luminaria desde el centro de control es un parámetro que debe tenerse en cuenta a la

hora del diseño de la misma telegestión. Así se podrá comprobar efectivamente el ahorro de energía en cada caso particular.

Después de observar y analizar las troncales con las luminarias convencionales existentes, es posible recomendar la siguiente prioridad a la hora de implementar las troncales así:

La primera troncal a ser actualizada debe ser aquella que pertenece al segmento 2.1, correspondiente a la zona del Boulevard, toda vez que las luminarias instaladas actualmente se encuentran en mal estado y son diferentes entre sí. Es necesario implementar dicha troncal en primer lugar, toda vez que este es un lugar de alto flujo y permanencia para la comunidad universitaria. En segundo y tercer lugar, es necesario implementar los segmentos 1.1 y 2.2 respectivamente, correspondientes a las entradas al claustro universitario por la Avenida Bolivariana y la Carrera 70, ello en cuanto dichas zonas componen importantes accesos peatonales. En cuarto lugar, se debe avanzar con la implementación de la troncal 3 la cual cuenta con flujo vehicular. En quinto lugar debe iluminarse la troncal 4, correspondiente al “Paseo del Pensador”, el cual llega hasta al bloque nueve y se encuentra ubicada en una zona con una alta densidad de árboles y zona verde y que requiere de una mejor iluminación. Finalmente, la implementación de la troncal quinta, correspondiente al segmento 1.2, la cual queda frente al Polideportivo de la universidad y va hasta los parqueaderos que se encuentran al frente del Boulevard. Es posible que dicho segmento sea realizado en último lugar, toda vez que dicha zona cuenta actualmente con un amplio espacio peatonal bien iluminado.

8. RECOMENDACIONES PARA FUTUROS TRABAJOS

Las luminarias existentes en la universidad son aproximadamente 35 luminarias de vapor de sodio de 150 W, 5 reflectores de la misma potencia, 16 postes de vapor de sodio de 75 W y 25 luminarias esféricas de 52 W. Las cuales en total tienen un consumo de 8500 W.

Será necesario exigir a los proveedores de las luminarias, que éstas incluyan drivers con control 0-10 para ser controladas por telegestión.

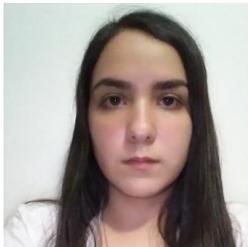
Es necesario recomendar el uso de diferentes marcas para cada troncal, eso sí, usando la misma marca en la troncal completa. Esto con el fin de poder realizar comparaciones y definir al cabo de un tiempo, cuál de las marcas se comporta mejor, tanto en depreciación lumínica como en factor de mantenimiento.

REFERENCIAS

- Acuña Roncancio, P. C. (2011). *Impacto del Alumbrado Público con LEDs en la Red de Distribución*. Bogotá, Colombia.
- Alcaldía Mayor de Bogotá D.C. (2001). *Manual único de alumbrado público*. Bogotá.
- Alzate Segura, W. (2014). *Eficiencia Energética en iluminación*. Medellín.
- Briñón Vélez, J. A. (2014). *Diodos Emisores de Luz*. Medellín.
- Briñón Vélez, J. (Compositor). (2015). *Ventajas y desventajas LED*. Medellín, Antioquia, Colombia.
- Caminos, J. (2011). *Criterios de diseño en iluminación y color*. Buenos Aires: Editorial de la Universidad Tecnológica Nacional.
- Carillo Yáñez, J., & Morales López, J. (2009). *ESTUDIO PARA LA ELECTRIFICACIÓN CON ENERGÍAS ALTERNATIVAS, UTILIZANDO CELDAS FOTOVOLTAICAS PARA ELECTRIFICAR EL POBLADO DE CAÑADA COLORADA, MUNICIPIO DE APAXCO ESTADO DE MÉXICO*. México D.F.
- Castañeda Duque, J. P. (2010). *Diseño y prototipo de una luminaria de LEDs para el alumbrado público según RETILAP y normatividad actual*. Medellín.
- C-Changes. (2011). *Types of Solar Panel*. Recuperado el 10 de Julio de 2014, de <http://www.c-changes.com/types-of-solar-panel>
- Céspedes, R. (2012). *Desafíos en el desarrollo de micro-redes inteligentes en zonas aisladas*. Bogotá.
- DANE. (2015). *Índice de precios del productor IPP*. Obtenido de <http://www.dane.gov.co/index.php/indices-de-precios-y-costos/indice-de-precios-al-productor-ipp>
- Díaz, J. F. (12 de Noviembre de 2014). *EFICIENCIA ENERGÉTICA*. Obtenido de <https://juanfrancisco207.wordpress.com/category/eficiencia-energetica/>
- Domínguez González, H. (2012). *Diseño de un sistema fotovoltaico para la generación de energía eléctrica en el cobaev 35 Xalapa*.
- EMP. (2015). *Tarifas de energía de los últimos años*. Obtenido de http://www.epm.com.co/site/clientes_usuarios/Clientesyusuarios/Hogar esypersonas/Energ%C3%ADa/Tarifas.aspx
- Encalada Espinoza, O. J. (2012). *Plan Piloto de telegestión para el control de alumbrado público para la vía Cuenca-Descanso*. Cuenca.
- Faroh, J. E., & Pérez, A. I. (2010). *Estado actual del aprovechamiento de la energía eólica en Venezuela*. Caracas.
- Fossati, J. P. (2011). *Revisión bibliográfica sobre micro redes inteligentes*. Pamplona.
- Galvin Electricity Initiative. (s.f.). *What are Smart Microgrids*. Recuperado el 11 de Febrero de 2015, de Galvin Electricity Initiative: galvinpower.org/microgrids
- Gaughan, R. (2014). *¿Qué es el índice escotópico y fotópico?* (eHOW) Recuperado el 27 de Julio de 2014
- González López, Á. J. (2012). *Gestión de la energía en una red inteligente*. Madrid.
- Grupo de Investigación en Transmisión y Distribución de Energía Eléctrica (TyD). (2013). *Micro Red Inteligente UPB*. Medellín.
- Guerra Baeza, L. D. (2013). *Estudio de factibilidad técnico/económica de un sistema híbrido de generación de energía eléctrica para escuelas de Quinchao*. Santiago de Chile.
- Gutiérrez Chamorro, J. (2013). *Generación eléctrica en plantas DIESEL*. *Anales de mecánica y electricidad*, 59-62.
- Heart Transverter S.A. (2013). *Idea de Red Eléctrica Inteligente popular*. Recuperado el 2 de Abril de 2015, de <http://www.transverter.com/smart.html>
- Hybrytec. (2015). *Hybrytec. Energía Solar*. Obtenido de http://www.hybrytec.com/Casos_de_Exito/
- Indalux. (2002). *Luminotécnica. Conceptos Básicos*.
- Instituto Nacional de Tecnología Industrial. (2010). *Curso Introductorio a la Televisión Digital Terrestre*. Recuperado el 27 de Julio de 2014, de <http://www.inti.gov.ar/electronicaeinformatica/utc/pdf/conceptosbasico sTV.pdf>
- Lara López, E. M., Mondragón Cruz, J. A., & Santiago Bautista, D. (2009). *Estudio y análisis de ingeniería en alumbrado público con luminarios de LED en la periferia del reclusorio norte*. Mexico D.F.
- López Jiménez, G. J. (20 de Septiembre de 2013). *Microred UPB*. Medellín.

- Lotero Mesa, R. (2012). *Manial de procedimientos para el diseño de instalaciones de iluminación interior y exterior con énfasis en RETILAP y LEED*. Medellín: Universidad Pontificia Bolivariana.
- Míguez Gómez, C. D. (2013). *La eficiencia energética en el uso de la biomasa para la generación de la energía eléctrica: optimización energética y exergética*. Madrid.
- Ministerio de Minas y Energía. (2006). *Artículo 3 Decreto No. 2424 de Julio 18 de 2006*. Bogotá.
- Ministerio de Minas y Energía. (2007). *ALumbrado público exterior. Guía didáctica para el buen uso de la energía*. Bogotá.
- Ministerio de Minas y Energía. (2010). *Reglamento Técnico de Iluminación y Alumbrado Público (RETILAP)*.
- NERSolar. (2012). Obtenido de La evolución de los LEDs en la iluminación: <http://www.nersolar.es/blog/la-evolucion-de-los-leds/>
- Padrón Jabib, F. A. (2013). *Baterías: Estado del arte y vigilancia tecnológica*. Medellín.
- Pereda Soto, I. (2005). *Celdas Fotovoltaicas en generación Distribuida*. Santiago de Chile.
- Pereira, J. (27 de Junio de 2012). *DigitalHERITAGE*. Recuperado el 08 de Junio de 2015, de <http://www.jpereira.net/gestion-de-color/calibracion-del-monitor-tft-correccion-gamma-luminancia>
- Ramírez Pinto, J. A. (2012). *Proyecto piloto de telegestión en el servicio de Alumbrado Público de la ciudad de Bucaramanga*. Bucaramanga.
- Real Academia Española. (2015). *Diccionario Real Academia Española*.
- Retana Jimenez, I. (2008). *Transferencia tecnológica sobre las ventajas y desventajas de la utilización de biodiesel*. San José.
- Rueda Chaparro, M. A. (2006). *Análisis del impacto de la modernización del sistema de alumbrado público en Bogotá DC. Aspecto técnicos, económicos y ambientales*. Bucaramanga.
- Rueda Valdivieso, P. P. (2014). *Estudio para la presentación de una propuesta para la implementación de un sistema de telegestión del alumbrado público en la ciudad de Guayaquil*. Guayaquil: Universidad Católica de Santiago de Guayaquil.
- Ruiz Bermejo, J. A. (2014). *Análisis de la problemática e investigación de aspectos avanzados de la generación eléctrica con biomasa*. La Rioja.
- Schifman, H. (2011). *La percepción sensorial*.
- Simec Chile SRL. (2013). *Diseño de un sistema de iluminación alimentado por paneles FV, utilizando ampollitas LED*. Santiago.
- Suárez Acevedo, J. A. (2010). *Marco Teórico de la Telegestión del servicio de Alumbrado Público*. Bogotá.
- Técnicas aplicas a Baterías . (2011). *Luminaria Microled*. Recuperado el 27 de Julio de 2014, de <http://www.tab.com.es/luminaria.aspx>
- UPB. (2014). *Microred*. Medellín.
- Valencia Gallón, J. H. (2013). *Fundamentos de Electrónica Industrial*. Medellín.
- Villegas Londoño, G. (2004). *Valoración de empresas de concesión de alumbrado público en Colombia*. Cali.
- Wiley. (2012). *Smart Grid-Fundamentals of design and analysis*.

AUTOR



María Elisa, *BRIÑÓN ZAPATA*. Bachiller egresado del Colegio Gimnasio los Pinares (2009). Egresada próximo a graduarse del programa de Ingeniería Eléctrica en la Universidad Pontificia Bolivariana, Medellín. En la actualidad trabaja como profesional en diseño de subestaciones eléctricas de alta tensión en la empresa JCAG Ing Consultor S.A.S. Nacida en

Medellín, Antioquia el 5 de abril de 1992.

ANEXOS

Anexo A. Detalle de resultados Dialux

En este anexo se presentan todos los archivos entregados por el software, en el cual se muestran la ubicación de las luminarias, render en 3D y en colores falsos y los valores de iluminancia y uniformidad.

Anexo B. Catálogos de las luminarias

En este archivo se presenta un resumen de las características técnicas de las luminarias utilizadas en los diseños realizados, además de los catálogos originales.

Anexo C. Protocolo de seguimiento de las características técnicas de las luminarias.

Anexo D. Análisis económico

Se adjunta el archivo en Excel en el cual se hace el análisis económico del proyecto.

Anexo E. Guías de laboratorio de Dialux.