

Revisión del alumbrado público inteligente LED

Diego Julián Rodríguez Patarroyo¹, Iván Felipe Cely Garzón², Cristhian Alexander Letrado Forero³

¹Profesor de Ingeniería eléctrica. Facultad de ingeniería.
Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá.
djrodriguezp@gmail.com

²Estudiante de Ingeniería eléctrica.
Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá.
ifcelyg@correo.udistrital.edu.co
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8232-4444>

³Estudiante de Ingeniería eléctrica.
Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá.
caletradof@correo.udistrital.edu.co
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8093-1152>

RESUMEN

Introducción: El artículo de revisión bibliográfica es producto de la investigación sobre la situación actual de los sistemas de alumbrado público inteligente con tecnología de iluminación LED en ciudades del mundo.

Problema: ¿Resulta conveniente la utilización de un sistema de iluminación pública inteligente con luminarias LED?

Objetivo: Revisar el contexto de los alumbrados públicos inteligentes con tecnología de iluminación LED.

Metodología: Se realizó una revisión de más de 50 artículos académicos referentes a alumbrados públicos inteligentes con tecnología LED encontrados en bases de datos como: IEEE Xplore, Scopus, Sciencedirect etc. El criterio de selección de la información se hizo revisando artículos desde el año 2006 hasta el 2018 y también teniendo en cuenta su instalación y desempeño en diferentes ciudades y lugares del mundo. Excluyendo artículos sobre tecnologías contaminantes e ineficientes.

Conclusión: El contexto actual en el que se encuentran los alumbrados públicos inteligentes LED los proyecta a ser más implementados a futuro.

Resultados: Los sistemas de alumbrado público inteligente LED son más eficientes en uso de energía, presentan ahorros económicos en el mediano plazo y tienen un menor impacto ambiental en comparación con los sistemas de alumbrado convencional.

Limitaciones: La revisión se centra en aspectos de eficiencia energética y economía, no en aspectos sociales

Originalidad: Los sistemas de alumbrados públicos inteligentes LED han sido investigados en el contexto económico y de eficiencia energética.

Palabras clave: Alumbrado público inteligente LED, eficiencia energética, energías renovables, luminarias LED.

1. INTRODUCCIÓN

La revisión del contexto actual del alumbrado público inteligente con luminarias de Diodo Emisor de Luz (*LED siglas en inglés*), adquiere importancia en el marco de la búsqueda de eficiencia energética y la minimización de costos operacionales durante la vida funcional en un sistema de alumbrado público. Ante la considerable cantidad de energía eléctrica que se utiliza para hacer funcionar las luminarias públicas, que representa aproximadamente el 19% del consumo mundial de energía eléctrica [1], la reducción de dicha cifra sería un resultado muy positivo. La combinación entre la eficiencia energética que posee el LED en cuanto a la cantidad de lúmenes que emite por vatio [Lm/W] [2], la buena gestión que el alumbrado inteligente realiza sobre las luminarias, y su control de intensidad dependiendo del número de peatones o vehículos [3] tiene buenas perspectivas.

El primer antecedente oficial de alumbrado público inteligente fue en la ciudad de Oslo, Noruega, en 2006. El sistema inicio operaciones en 2003 con 117 luminarias; luego para 2006 el sistema poseía 4000 luminarias dotadas con sistema de control conectado mediante internet hacia un centro de mando. Este sistema de control permitía variar la intensidad de las luminarias en la vía dependiendo del tráfico vehicular, hora del día y condiciones ambientales [4].

Inicialmente, en el proyecto llevado a cabo en Noruega, se reemplazan luminarias de PCB que llevaban muchos años en funcionamiento de alumbrado público y eran contaminantes para el medio ambiente [5]. Pero, el proyecto tenía como propósito principal disminuir la cantidad de energía eléctrica consumida en alumbrado público, se tenía como meta poder disminuir el consumo entre un 60 y 70%. Para 2005 el ahorro alcanzado de las luminarias reemplazadas y adaptadas con el control inteligente fue de 52%, para 2007 6000 luminarias eran inteligentes, estas 6000 representaban el 10% de todas las luminarias instaladas en Oslo [4].

El alumbrado público inteligente LED toma importancia cuando se evalúa su capacidad de iluminar calles y carreteras. Los investigadores Fusheng Li y (et al) de la Universidad de Fudan, China, en el año 2009, analizaron el desempeño en el consumo energético, la reproducción de colores, entre otras características de la iluminación LED. Y concluyeron que la iluminación pública LED, en un comienzo, no era muy favorable para la iluminación de calles y carreteras. Sin embargo, predijeron que en unos años con el desarrollo tecnológico y reglamentación clara los LEDs se instalarían en un futuro tal y como sucedió [6].

Tiempo después, en el año 2011, el ahorro energético de los sistemas de alumbrado inteligentes fue investigado por Mircea Popa y Costin Cepișcă, ambos de la Universidad Politécnica de Bucarest, Rumania. Presentaron un sistema de iluminación con controles que monitorizan el estado de las luminarias permitiendo el ajuste de estas basadas en el lugar por latitud y longitud lo cual hace que se encienda en un momento correcto, procesando y almacenando la información del estado de la bombilla. Este sistema fue eficiente en consumo de energía eléctrica [7].

Los sistemas de alumbrado inteligente son sometidos a condiciones climáticas que pueden afectar su funcionamiento. Un segundo trabajo realizado por el profesor Xiaogang Liu, en el año 2011 en la Universidad de Ciencia y Tecnología de Huazhong expuso un inconveniente que se deberá solventar en las instalaciones de iluminación inteligente, y es que los sistemas inteligentes de iluminación son susceptibles al daño bajo condiciones ambientales de los lugares en donde se les instalen. Pues el viento, agua y polvo, pueden ocasionar deterioro en las luminarias, en la estructura física, en los sensores, la electrónica interna del sistema y demás componentes del sistema. El profesor Liu simuló por computador el comportamiento de una estructura bajo condiciones climáticas de viento y lluvia en condiciones extremas y concluyó que una estructura hecha de aluminio soporta los efectos del viento [8].

En tiempos recientes, hacia el año 2017, en la India, el profesor Vijay Krishna, del Instituto de Educación e Investigación de Chennai, realizó un estudio y planteó una hipótesis respecto al tema de eficiencia energética que sirven para el desarrollo de la iluminación pública inteligente. El profesor Krishna, observando las pérdidas de energía existente en lugares de baja circulación de personas propuso un diseño de control para hacer un sistema de alumbrado público inteligente en el cual el consumo de energía fuese óptimo. El sistema propuesto funciona mediante sensores que operan de día y noche, los cuales se ajustaban con una hora exacta, enviando información por Wi-Fi para el encendido y apagado, aplicando el oscurecimiento gradual de las luminarias en las vías públicas [9].

La revisión plantea como hipótesis la utilidad que genera el alumbrado público inteligente con iluminación LED. A través de todo el artículo se tratara de exponer el por qué es necesario que se empiecen a instalar sistemas inteligentes LED en las ciudades. Las propuestas hacia el futuro van encaminadas a construir ciudades inteligentes *Smart Cities*, es aquí donde se justifica la adaptación de este método de iluminación urbana. El artículo tiene en cuenta dos razones importantes que se centran en el consumo de energía eléctrica, los costos relacionados a la inversión en el proyecto y el ahorro monetario que se obtiene. Desde 2006 se han implementado estos sistemas con mayor frecuencia en grandes ciudades en donde la circulación de peatones y vehículos es considerable, y en donde es más efectivo.

2. ESTADO DEL ARTE DEL ALUMBRADO PÚBLICO LED INTELIGENTE

2.1 Ciudades, redes y alumbrados inteligentes

La importancia de estos conceptos radica en construir una ciudad que se adapte al mundo moderno, en especial a la tecnología, que se realicen ideas sostenibles que puedan ser implementadas en cada ámbito de la vida dentro de la ciudad [10]. Tener una ciudad con buena confiabilidad y seguridad ante fallas en los sistemas eléctricos mejorará la calidad de vida de sus ciudadanos a futuro. Las ciudades inteligentes asocian diferentes conceptos cuyos fines son optimizar los recursos y garantizar operación confiable y segura de sus sistemas.

No existe una definición formal de ciudades inteligentes *Smart Cities*, pero a grandes rasgos se plantea como una ciudad que puede gestionar sus recursos de una manera altamente eficiente, también como lugares donde la significativa integración de la tecnología en la vida diaria permite la creación de ambientes más sostenibles [11]. Las *Smart Cities* hacen parte

de los objetivos de sostenibilidad de la Unión Europea para el año 2030, donde se lograron acuerdos que ayudan a encaminar al mundo hacia una sociedad con responsabilidad ambiental y desarrollo sostenible [12].

Las Smart Cities agrupan conceptos inteligentes y modernos orientados a obtener máxima eficiencia energética dentro de un área urbana. Dentro del contexto de las Smart Cities existen las redes inteligentes *Smart Grids*. Una definición breve sería una red eléctrica que puede, inteligentemente, integrar las acciones de los consumidores con la generación eléctrica y demás; para entregar electricidad económica, sustentable y segura [13].

Las Smart Grid consisten en redes bidireccionales de distribución de energía capaces de gestionar inteligentemente la potencia eléctrica dentro de un sistema, mediante los desarrollos eléctricos y de las telecomunicaciones. Se espera en unos años que la energía eléctrica de los Smart Grids tenga mayor componente de fuentes renovables no convencionales [14]. Un objetivo a futuro es que la energía eléctrica para el alumbrado inteligente debe provenir en gran parte de fuentes de energías alternativas independientes, que no pertenezcan a una empresa de energía centralizada [15].

El consumo de energía eléctrica en el mundo va aumentando a medida que la población mundial crece y se establecen más en las ciudades del mundo. A esto se suma que los recursos fósiles para generar electricidad son limitados y producen daños al medio ambiente. Es por eso, que la alternativa más viable que representa eficiencia son las Smart Grid, que representa un concepto descentralizado en el sistema de potencia, proporcionando así, varias alternativas para generar electricidad y formas más eficientes de consumo [16].

Dentro de las Smart Cities y los Smart Grids, se tienen los sistemas de alumbrados inteligentes *Smart Lightings*, los cuales, son sistemas pensados para reducir los costos de la iluminación pública. Estos sistemas instalados en las Smart Cities hacen una mejor gestión de la iluminación usando sensores y dispositivos que controlan las luminarias, haciendo que estas disminuyan la intensidad o se apaguen dependiendo del paso de personas o vehículos. Los Smart Lightings se caracterizan por su consumo controlado de energía, manejo de la información, manejo de variables externas, monitoreo, etc. Además, deben ser sistemas seguros, eficientes y estar al servicio de los ciudadanos [17].

Actualmente, se considera importante que las Smart Grid se combinen con los Smart Lighting, esto en términos de suministro de energía renovable. En áreas urbanas donde la población incrementa exponencialmente, como las grandes ciudades del mundo, es común que la fuente de energía eléctrica provenga de una empresa distribuidora central. A futuro, se espera que el sistema de distribución urbano esté menos centralizado, entonces, las distintas fuentes de generación, ya sean las convencionales y las alternativas no convencionales se combinen y sean las fuentes de alimentación para los alumbrados públicos inteligentes [18].

En definitiva, el concepto de Smart Cities implica, ideas que ayudarán a cambiar el mundo de cierta forma. La vida en las ciudades será más fácil y sostenible, pues las Smart Cities ofrecen soluciones modernas y practicas a muchos problemas diarios que enfrentan los ciudadanos como el transporte público, los servicios públicos y las comunicaciones. El concepto de Smart Cities evoluciona gradualmente, lo hace con el avance y los cambios científicos y tecnológicos, y en cierta parte, con apoyo de gobiernos locales que piensan en

el bienestar de sus ciudadanos [19]. Los alumbrados públicos inteligentes LED son parte importante de una Smart City, pues ofrecen una forma controlada e inteligente para el suministro de iluminación en la noche.

2.2 Arquitectura de un sistema de alumbrado público inteligente LED

Los sistemas de alumbrado público inteligente LED, están compuestos por dispositivos electrónicos inteligentes, equipos y software que les permite funcionar a cabalidad. A continuación, se enmarcan los módulos más importantes que se tienen en este tipo de alumbrado.

2.2.1 Composición de un alumbrado público LED inteligente

Un sistema típico de alumbrado inteligente está formado principalmente por un poste de luminaria, en el cual esta el elemento más importante, la luminaria LED. En el poste de luminaria, está integrado también otros equipos que dan funcionalidad al alumbrado inteligente [20], tales como:

- Sensores de luz y de movimiento: El sensor de luz detecta cuando es de noche, para así, encender la luminaria. El sensor de movimiento detecta la actividad o movimientos cercanos a la luminaria, este actuará cuando detecte peatones o vehículos cercanos, enviando una señal al microcontrolador [21].
- El microcontrolador: Es el encargado de tomar decisiones como reducir o aumentar la intensidad de la luminaria. Este está programado con algoritmos necesarios para la toma de decisiones, puede actuar independientemente o ser controlado por un módulo central de gestión [22].
- Equipos de medición: Son necesarios para tener información acerca de variables externas a la luminaria, tales como temperatura, flujo vehicular, velocidad promedio vehicular, flujo de peatones, detección de humedad, estado de la luminaria y demás equipos [23].
- Equipos de comunicación: Estos se encargan de enviar información de una o varias luminarias al centro de gestión con el fin de ser interpretadas y almacenadas [24].

Fuera del poste de la luminaria, se encuentra el centro de gestión, o central. Esta tiene la función de recibir la información que llega de una luminaria o un grupo de luminarias. Puede darle una interpretación a la información que recibe, es decir, tomar una decisión al respecto dependiendo el valor. Por ejemplo disminuir la intensidad de varias luminarias en un sector específico. El almacenamiento de información también es importante en el centro de gestión, con esto se pueden crear históricos, cifras y hasta predecir eventos en años próximos [25].

2.2.2 *Internet de las cosas (IoT) y comunicación de sistemas de alumbrado inteligente*

El término, internet de las cosas (*IoT*), en definición es una red abierta y completa de objetos inteligentes que tienen la capacidad de auto-organizarse, compartir información, datos y recursos, reaccionando y actuando frente a situaciones y cambios de un entorno. El término fue utilizado por Kevin Ashton en el auto-ID center del MIT (*Instituto Tecnológico de Massachusetts*) en 1999. El IoT se refiere a la posibilidad de la conexión de dispositivos a internet. Si un dispositivo como una luminaria usada en la calle, está conectada a internet esta puede ser gestionada eficientemente y da la posibilidad de una fácil identificación si está dañada o funciona de manera inadecuada [26].

Durante las tres últimas décadas, a medida que la electrónica, las telecomunicaciones y la computación se desarrollaban tecnológicamente, muchos electrodomésticos, fabricas etc. fueron automatizados y también el alumbrado público. Con la llegada del internet se hizo posible tener una comunicación para todo tipo de información, incluyendo un control sobre las luminarias ante la circulación de vehículos o personas [27]. En la actualidad, la mayoría de los alumbrados LED inteligentes se comunican inalámbricamente mediante el protocolo de comunicación ZigBee, en algunos casos especiales con pocos equipos y luminarias se utiliza Wi-Fi [26].

ZigBee es un protocolo de comunicación muy eficiente pues permite el intercambio de datos con facilidad mediante la conexión de un grupo de dispositivos, en este caso luminarias, creando así, una malla capaz de recopilar información y crear conexión entre cada dispositivo dentro de la malla. La información de un grupo de luminarias se controla mediante un segmento principal por cada malla creada, el segmento se encarga de transferir datos hacia el centro de control, que es finalmente donde la información es recibida para gestionar control o para almacenarla [28]. La gran ventaja de este protocolo de comunicación es que puede conectar hasta 65.000 dispositivos, muy superior a lo que conectaría Wi-Fi o Bluetooth, además de ser un protocolo de comunicación hecho para control.

Muchos sistemas inteligentes de alumbrado con o sin luminarias LED utilizan las líneas de potencia para la transmisión de información, esta forma de comunicación fue la primera en utilizarse ante los pocos protocolos de comunicación inalámbrica que existían. La información se envía en forma de bits, los cuales son enviados a una frecuencia de aproximadamente 80kHz a través de filtros que funcionan con un microcontrolador. Esta forma de transmisión de información resultó ser confiable en la práctica [29], al punto que aún sigue en uso y también se utiliza en nuevos proyectos de alumbrado inteligente.

2.3 Eficiencia energética

2.3.1 *Eficiencia energética en la luminaria LED*

Cuando las luminarias LED se empezaron a masificar en el mercado, se empezó a plantear la posibilidad de utilizarlas en los sistemas de alumbrado público para hacer uso de su eficiencia luminosa [30]. La luminaria LED posee características importantes para un alumbrado inteligente, como mayor eficiencia en lúmenes por vatio [Lm/W], vida útil larga

de entre 5 a 8 años, encendido y apagado múltiples veces [ON-OFF] sin dañar su vida útil, atenuación de intensidad lumínica en un rango y buena reproducción de colores. [31], [32].

La iluminación LED es adecuada para alumbrar en ambientes nocturnos. Su gran capacidad para emitir luz permite una reproducción de colores (reproducción cromática) adecuada para la iluminación nocturna, el enfoque angular de luz es el ideal para iluminar lo necesario, que son las autopistas y calles [33]. Los LEDs, dependiendo de su material semiconductor, pueden adquirir distinta gama de colores, desde el blanco absoluto hasta colores casi fluorescentes, tampoco aumentan su temperatura durante su funcionamiento ni emiten radiaciones UV [34].

Es posible examinar la vida útil y la eficiencia [Lm/W] de la luminaria LED y compararla con otro tipo de luminarias que comúnmente son usadas en alumbrado público, como lo son la de Sodio de alta presión (*HPS siglas en ingles*), Mercurio de alta presión (*HPM siglas en inglés*) y Descarga de alta intensidad (*HID siglas en inglés*) [35]. En la tabla 1, se observan las características comparadas entre distintos tipos de luminarias:

Parámetro	LED	HPS (Sodio de alta presión)	HPM (Mercurio de alta presión)	HID (Descarga de alta intensidad)
Potencia activa [W]	63W	70 W	80W	100W
Eficacia luminosa [Lm/w]	52 Lm/W	85 Lm/W	46 Lm/W	80 Lm/W
Vida útil [h]	>50.000 horas	28.000 h	16.000 h	10.000 h
CRI (índice de reproducción cromática)	>80	23	48	70
Luminosidad	3225 Lm	6000 Lm	3700 Lm	80000 Lm

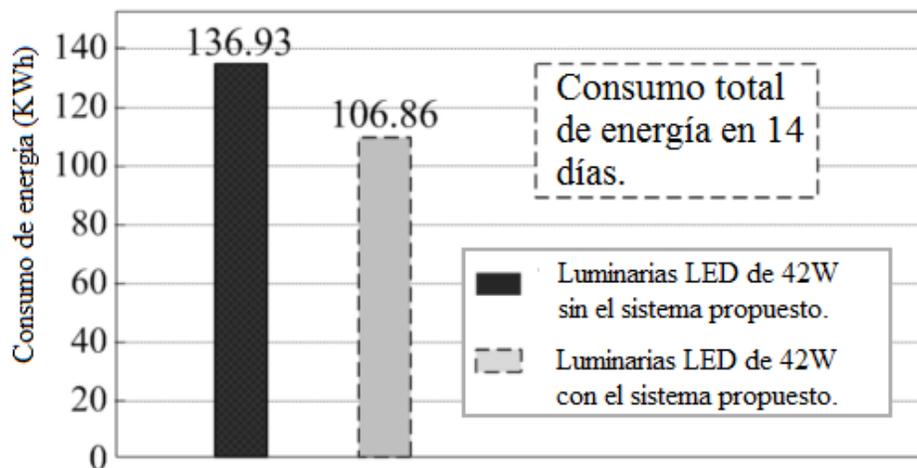
Tabla 1. Comparación de características de luminarias usadas en alumbrado público. Fuente: [36].

De la tabla 1, es importante ver que las luminarias HPS y HPM, tienen una buena vida útil promedio y buena eficiencia luminosa [35]. Pero en características como ON-OFF instantáneamente y atenuación de intensidad, no son aptas para el correcto funcionamiento del alumbrado público inteligente y es ahí donde las luminarias LED son pertinentes para este tipo de alumbrado [32], [36]. Algo similar ocurre con la luminaria HID, esta posee una potente luminosidad y gran capacidad de reproducción cromática, pero tampoco es adecuada en alumbrados inteligentes que requieren ON-OFF constante y atenuación de intensidad [34]. En definitiva, las luminarias LED poseen características necesarias para ser utilizadas en los alumbrados inteligentes, porque poseen características de funcionamiento y la buena reproducción cromática les permite operar plenamente en este tipo de alumbrados.

2.3.2 Eficiencia energética de los alumbrados inteligentes LED

Al observar cómo se ha popularizado la automatización en diferentes ámbitos, el alumbrado público no ha sido la excepción, haciendo posible el encendido de luminarias de manera automática [37]. Por el momento, la meta del alumbrado inteligente LED es disminuir el consumo de energía eléctrica que se genera al año y, a su vez, los costos que este consumo implica. La forma inteligente en que se atenúa la luz cuando no hay presencia de peatones o cualquier vehículo circulando por la vía, hace que se disminuya el consumo de energía eléctrica. Esto es precisamente lo que se busca actualmente, eficiencia energética, capaz de darle uso adecuado a la luz cuando sea necesario y de paso disminuir el precio producto de dicho consumo [38].

Es posible comparar la eficiencia energética entre un alumbrado LED sin sistema de control y uno con sistema de control de intensidad, mediante la eficiencia energética de cada uno. Esto se realiza comparando el consumo de energía [kWh] de un sistema de iluminación en un mismo intervalo de tiempo. Ambos sistemas de iluminación fueron probados durante 14 días en diferentes lugares como un edificio de oficinas, un almacén y un estacionamiento de vehículos, el cual es un lugar público [39]. Como se observa en la gráfica 1:



Gráfica 1. Consumo energético de sistemas led con y sin control. Fuente: [39].

Analizando la gráfica 1, el sistema de luminarias LED sin control tiene un consumo energético de 136.93 kWh, mientras que el sistema de luminarias LED con un control inteligente tiene un consumo de 106.86 kWh. De acuerdo con los resultados, adicionando un sistema de control de intensidad al alumbrado LED, se reduce la energía eléctrica consumida en un 21.9% aproximadamente. Esto es lógico, pues el sistema inteligente hace que las luminarias LED actúen cuando sea necesario y disminuyan su intensidad cuando no se requiera iluminación [39].

Otra investigación publicada en el IEEE Photonics Journal, muestra que la iluminación de vías en el alumbrado público con luminarias LED y sistemas de control para manejo y

mantenimiento en la ciudad de Washington D.C, Estados Unidos de América, presenta ahorros de energía del 66% aproximadamente en lugares de circulación de vehículos [40]. Utilizando variables como la velocidad de los vehículos y su flujo en la carretera, fue realizado un algoritmo capaz de modificar los niveles de luz en cada luminaria LED. Esta propuesta resulta adecuada en momentos donde la circulación vehicular es baja y se requiere de menos iluminación.

2.3.3 *Entorno urbano y energías renovables*

Los alumbrados inteligentes llegan al mundo a cambiar el concepto de iluminación nocturna, no solo en forma de eficiencia energética, sino en eficacia de su funcionalidad. Actualmente no solo se piensa en los ahorros energéticos y económicos que se obtienen del alumbrado inteligente, también, se propone integrar a este al ámbito urbano y social, en las comunicaciones, en la medición de temperatura, en el tránsito vehicular y demás [41]. Todo esto involucra tener una ciudad más sostenible, capaz de hacer la vida de los ciudadanos más eficiente y cómoda.

La adaptación de energías renovables en el ámbito del alumbrado público LED inteligente, toma más fuerza. Si el mayor fin es lograr la eficiencia energética completa, eso significa que las energías renovables deben operar para brindar al sistema de alumbrado LED inteligente la energía necesaria para encender luminarias LED y operar todo su sistema de control [42].

La mayoría de los proyectos actuales que se diseñan para alumbrado público LED inteligente, utilizan como recurso renovable principal los paneles solares fotovoltaicos, esto se debe a la asequibilidad, facilidad y pertinencia que tiene esta fuente renovable de operar en los alumbrados inteligentes LED. Un parque fotovoltaico puede ser instalado casi en cualquier lugar y puede adquirir diferentes dimensiones dependiendo de su utilidad en cuanto a la cantidad de potencia requerida [43]. Se considera en la mayoría de veces colocar un panel solar sobre el poste, donde se encuentra la luminaria, esto con el fin de tener una alimentación independiente en cada luminaria que conforma el sistema inteligente LED. Este método implica que la luminaria dependa en lo mayor posible de la energía fotovoltaica, pero cabe mencionar que existe un control que permite suministrar energía eléctrica de la red, en caso de que sea necesario [44].

Los paneles fotovoltaicos son parte del sistema, estos poseen una batería, o banco de baterías en caso de ser necesario, para así, almacenar energía que le sea útil a la luminaria en horas de la noche para cumplir su funcionalidad [45]. La duración de las baterías se hace más amplia con el paso del tiempo, es posible mantener una casa con todos sus equipos conectados por casi tres días en continua funcionalidad. Se espera pues, que una sola batería sirva para mantener varios postes con luminarias y sus respectivos equipos.

También se tiene la consideración de suministrar energía eléctrica de otras fuentes. El alumbrado LED inteligente al estar asociado con el Smart Grid, también puede suministrársele energía eléctrica proveniente de fuentes eólicas, hídricas, geotérmicas, etc. La alternancia de fuentes hará al sistema mucho más inteligente y sostenible [46]. Un tema actual por el cual se considera pertinente la adaptación del alumbrado público a fuentes renovables es la disminución del CO₂ y de gases contaminantes, pues cada año aumenta la

demanda de energía eléctrica en alumbrado público, y esto implica mayor suministro por parte de las centrales generadoras térmicas [43], [34].

Dos casos notables de cómo la eficiencia energética puede operar son: la energía renovable operando cerca al mar y la energía fotovoltaica operando en lugares apartados sin conexión a un sistema de transmisión. El primero hace uso de la energía eléctrica de origen mareomotriz, que consiste generar electricidad con el movimiento de las olas del mar, este método puede ser muy útil en lugares cercanos al mar [47]. El método fotovoltaico en lugares apartados, tiene un desempeño óptimo en lugares donde no existe empresa de distribución, o en un lugar de aldeas pequeñas donde se requiera energía eléctrica para iluminación pública [48].

2.4 Costos y análisis económico de sistemas LED para alumbrado público inteligente

El precio final del sistema de alumbrado LED inteligente cambiara con base a los componentes que lo integren, el tipo de sensores y su funcionamiento. Los sistemas de iluminación inteligente LED tienen dispositivos controladores que funcionan disminuyendo la intensidad lumínica de una bombilla dependiendo de la hora del día. Esta disminución en la intensidad lumínica reduce el consumo de potencia eléctrica a una tercera parte y en consecuencia ahorros en gastos. [49].

Para realizar el análisis económico y hallar la relación costo-beneficio se usaron ecuaciones para hallar el periodo de reembolso [50] y la IRR (*tasa interna de retorno*) determinará si es viable o no el proyecto determinando su rentabilidad [51]

El caso de estudio para determinar el precio final fue realizado en la Ciudad de Juiz de Fora, Brasil. [36] Esta ciudad de Brasil fue seleccionada porque es un país en vías de desarrollo económico y ha mostrado un interés en los últimos años en las Smart Cities [52]. Es importante destacar que no es fácil determinar el costo exacto de un sistema de alumbrado inteligente por diferentes circunstancias como el cambio en el precio de los componentes en el tiempo, costos de importación e impuestos en los dispositivos. En la Tabla 2, se observa una lista con el precio de las partes y dispositivos que tiene por lo general el sistema instalado en Brasil.

Componente	Unidades	Costo unitario	Costo total
Microcontrolador	1	\$12.99	\$12.99
Zigbee	1	\$37.95	\$37.95
Tablero	1	\$2.07	\$2.07
Sensor de luminosidad	1	\$2.08	\$2.08
Sensor de presencia	1	\$16.04	\$16.04
Conectores	10	\$0.40	\$4.00
Resistencias	40	\$0.10	\$4.00
Capacitores	10	\$0.40	\$4.00
Cajas	1	\$34.56	\$34.56
Otros	1	\$15.00	\$15.00
TOTAL			\$132.68

Tabla 2. Precio de componentes de un sistema de alumbrado inteligente. Fuente: [36]

Según la tabla 2, el costo aproximado final del sistema individual es de \$133 USD usando componentes similares en el mercado de Brasil, sin impuestos. El primer método activa las luminarias a máxima capacidad de 6pm a 12 am y oscurecimiento del 50% de 12 am a 6am. El segundo método usa el 50% de capacidad de la luminaria de 6pm a 6am y solo se activa cuando se detectan peatones. Es importante considerar que en la localidad del estudio el número de horas solares varían de 10 horas y 30 minutos en invierno y 13 horas 10 minutos en verano. Para determinar el tráfico de peatones se usó una aproximación pues es un valor que está cambiando continuamente.

Usando un periodo de retorno cercano a la vida útil de las luminarias aplicando los factores de cálculo económico: Periodo de retorno y una tasa interna de retorno IRR. Se encontraron resultados que demuestran, que la inversión se recupera con el tiempo a pesar de la alta inversión inicial. Como se observa en la **Tabla 3**.

Escenario	IRR (internal rate of return)	Periodo de retorno
Sistema de iluminación con LED	5.5%	10.5 años
Reemplazo de HPS	13.5%	7.2 años
Reemplazo de HPM	23.8%	5.0 años

Tabla 3. Comparación de recuperación de inversión en diferentes escenarios en el tiempo. Fuente: [36].

Según la **tabla 3**, se recupera la inversión de los sistemas de alumbrado inteligente en un periodo aproximado de 5 a 10 años. Es importante notar que existirá en una determinada fecha en el periodo de estudio, un pico importante en la inversión pues se hará necesario un mantenimiento del sistema. Aunque, este sistema puede volverse más económico dependiendo del tipo de sensor y si funciona con fuentes de energía renovables.

En zonas no interconectadas con dificultades de acceso, la gestión de la energía eléctrica usada para el alumbrado público se hace necesario que sea más eficiente. En puerto Inírida, Colombia, el investigador Yesid Muñoz y demás investigadores analizaron la posibilidad de cambiar todas las luminarias por lámparas LEDs lo que haría posible la reducción del consumo energético en 40%. Concluyeron que la inversión total sería de \$321.000 USD Con una tasa interna de retorno cercana al 42% en 3 años. Lo que haría disminuir el precio de la energía a 0.17 USD/kWh [53].

En otros lugares del mundo como India, El investigador Sanjay Kumar, de la universidad RGIPT de la India investigo sobre los sistemas de alumbrado público inteligente en módulos independientes para zonas aisladas como la aldea de Bihar, para un periodo de 20 años. Este investigador encontró que se podía ahorrar cerca de \$1348.68 USD al año, dinero el cual la aldea podría destinar en alimentos o en adecuar un salón de clase para los niños [54]. La India está interesada en masificar el uso de la energía solar, trazando objetivos como aumentar la capacidad de potencia solar instalada de 20GW a 100GW para el año 2022 [55].

2.5 Repercusiones ambientales de los sistemas de alumbrado inteligente LED

Para analizar el desempeño de un sistema de alumbrado de iluminación LED inteligente además de un análisis económico se hace necesario una investigación sobre las repercusiones ambientales [56]. Pues algunos elementos usados en la construcción de los sistemas de iluminación contienen elementos que son perjudiciales para la fauna y la flora tales como el mercurio o el plomo.

Los sistemas de iluminación inteligente LED que son autónomos tales como los que funcionan con paneles solares fotovoltaicos necesariamente deben tener unas baterías para su funcionamiento en las horas del día donde no esté el sol. Estas baterías tienen elementos contaminantes como el plomo. Cuando a las baterías no se les hace un mantenimiento periódico adecuado o cuando no se les carga completamente aparece el fenómeno de sulfatación el cual es un componente altamente tóxico. [57]

Las luminarias que normalmente se usan en las vías públicas son de vapor de mercurio. Estas luminarias a pesar de tener una vida útil larga tienen mercurio, este elemento es altamente tóxico y cuando las luminarias son desechadas este elemento puede entrar en contacto con los ríos y fuentes hídricas. Por esto existen regulaciones internacionales que exigen disminuir la cantidad de mercurio usado en la construcción de luminarias [58] Y causan interferencias en las redes Smart grid [59]

Las consecuencias en los animales por el remplazo de luminarias convencionales por luminarias LED están aún en materia de investigación en el mundo. Los animales nocturnos como murciélagos son sensibles a la luz artificial según el color de la luz, si es roja o blanca. Los investigadores Christian Voigt y demás de la Universidad de Berlín investigaron sobre la fototaxis (*reacción de orientación de los organismos ante el estímulo luminoso*) de los murciélagos y concluyeron que los murciélagos migratorios son atraídos por la luz roja pero no por la luz blanca cálida LED. Después de hacer un experimento los resultados no encontraron modificación del comportamiento de vuelo de los animales por el uso de este tipo de luminarias [60].

2.6 Casos de estudio de alumbrado público inteligente LED en el mundo y panorama en Colombia

El alumbrado público inteligente está empleándose cada vez más en distintas ciudades del mundo. La mayoría de los casos están enfocados a la iluminación inteligente con LED, ya que es la tecnología más óptima para este tipo de modelo en iluminación.

2.6.1 Alumbrado público inteligente en Europa

Este continente es donde más se ha observado el crecimiento de los alumbrados públicos LED inteligentes, en especial por las políticas impulsadas por la Unión Europea [14]. Todo

esto ha llevado a que surjan casos de estudio en el continente europeo y se multiplique en el mundo entero el ejemplo de los europeos en cuestiones de eficiencia energética e innovación.

En la ciudad de Glasgow, Escocia, en el año 2013 el gobierno británico invirtió 24 millones de libras para el reemplazo de las luminarias y la modernización de los sistemas de alumbrado, mediante gestión controlada a través de internet. Se realizó un estudio de niveles de intensidad lumínicos requeridos en ciertos puntos específicos de la ciudad, para ajustarlos con puntos de alta o baja frecuencia de personas y también con el fin de mantener lugares turísticos de la ciudad con la mejor calidad de iluminación. Por ejemplo, en Riverside Walkway, las luminarias fueron programadas para tener como la menor intensidad un 20% en caso de que los sensores de movimiento no detecten presencia de transeúntes, y aumentará a un 100% de la intensidad cuando los sensores detecten presencia de personas. En otro punto de la ciudad, en Gordon Street, los postes fueron equipados con sensores capaces de medir el nivel de ruido, polución del aire y presencia de transeúntes con el fin de mejorar la información de los puntos de alta circulación de personas en la ciudad [61].

En Suecia la política de reemplazo de luminarias y modernización del alumbrado, comenzó en 2006 y culminó en 2009, con la inversión proveniente del programa contra el cambio climático de la agencia sueca de protección del medio ambiente. Desde entonces Gotemburgo ha aumentado su ahorro energético en más del 60% y ha disminuido el consumo de electricidad en 132 MWh al año. También, las emisiones de CO₂ bajaron 0.16 toneladas, de óxido de nitrógeno en 85 toneladas y de partículas contaminantes en 1.3 toneladas anuales gracias al sistema de detección de fallas, el cual redujo de manera significativa los costos operacionales. En los últimos años se les han añadido a los postes de las luminarias nuevas características, como sistemas de monitoreo de temperatura y de parqueo en zonas ilegales de la ciudad [62].

Turquía, a través de los años ha invertido mucho dinero en modernizar la infraestructura del país, y el alumbrado público. Este país cuenta aún con un alumbrado convencional de luminarias de HPS y algunas otras tecnologías de iluminación, que son encendidas a su máxima intensidad toda la noche. Actualmente este país fomenta la utilización de la tecnología LED en diferentes zonas de las principales ciudades, tales como Estambul o Ankara. Aunque, recientemente se ha puesto en marcha un plan para la adaptación de alumbrado inteligente, por los casos de estudio exitosos en el continente europeo y por los resultados satisfactorios que este sistema ofrece en términos monetarios y ambientales [63].

En Portugal, actualmente se estudia la estructuración de un moderno alumbrado inteligente en su capital, Lisboa. Se planea instalar sistemas de luminarias LED que tengan control de intensidad lumínica y pueda ser monitoreada para mantenimientos en los centros históricos con flujo de turistas [64].

2.6.2 Alumbrado público inteligente en Norteamérica

La ciudad de San Diego, California, USA, ha impulsado la iniciativa de la transformación del alumbrado público convencional que tienen, a uno inteligente y auto-gestionable. La idea se refuerza con la utilización de las luminarias como puntos de monitoreo de diferentes variables como temperatura, humedad, presión, niveles de ruido y tráfico de personas. El

objetivo es no solo incorporar un sistema de iluminación inteligente, sino también variables que puedan ser monitoreadas por otros organismos de la administración local, como la policía o el servicio meteorológico, para detectar variables en puntos importantes de la ciudad [65].

La idea requiere de IoT en los postes de luminarias, como puntos donde convergen datos e información necesaria para el alumbrado público y otros departamentos locales. El proyecto tuvo como objetivo el reemplazo de 14,000 luminarias de las 40,000 que posee la ciudad, por iluminación LED que se ajusta perfectamente con el concepto de alumbrado inteligente [65].

2.6.3 Alumbrado público inteligente en Asia

El gobierno de Corea del Sur, ha decidido reemplazar las luminarias convencionales del alumbrado público, por tecnología LED. A través de análisis, se llega a la conclusión que la tecnología LED puede ahorrar casi el 69% de energía eléctrica, pero también se encuentra que la reducción de energía puede aumentar hasta en un 77% cuando se controla la intensidad de las luminarias en ciertas horas de la noche. El caso en Corea del Sur, se basó en programar la intensidad de las luminarias en ciertas horas de la noche; antes de las 10 Pm las luminarias están a su 100% de intensidad lumínica, entre las 10 Pm y la media noche, y a partir de la medianoche hasta la madrugada se disminuye la intensidad en 50%. El caso de Corea del Sur demostró ser eficiente en cuanto al ahorro por los sistemas de iluminación inteligentes LED [66].

Cuando se utilizaba HPS convencional toda la noche, la energía eléctrica consumida anualmente era de 1,147.46 kWh, luego, esta energía se redujo a 214.46 kWh cuando se instalaron las luminarias LED con control de intensidad. En cuanto al tema medioambiental, la reducción de aproximadamente 990 toneladas de emisiones de CO₂, sirven de mucho para un país con un grave problema de contaminación del aire como lo es Corea del Sur [66].

En Malasia se han desarrollado proyectos para reducir el gasto público en iluminación de las calles reemplazando luminarias incandescentes por LED con grandes ahorros energéticos. [67].

2.6.4 Alumbrado público inteligente en Australia

En Australia los proyectos de las ciudades inteligentes han tenido éxito por las políticas claras y transparentes además de incentivar a la inversión privada con menores impuestos y facilidades de crédito, etc. [68].

Un caso de estudio de Australia de alumbrado público inteligente con LED fue realizado en la ciudad de Brisbane, capital del estado de Queensland cuya gobernación ha fomentado el negocio, en el desarrollo de proyectos sostenibles, que reduzcan la huella de carbono. El investigador Xireng Jiang, desarrolló un proyecto en la Universidad de Queensland, en 2016, para determinar la factibilidad de reemplazar las luminarias usadas en las vías públicas por LED. La fuente principal de energía para las luminarias en sistemas inteligentes es por paneles solares fotovoltaicos los cuales no emiten CO₂ y necesitan un menor mantenimiento periódico, aunque, tienen un costo inicial elevado. El proyecto plantea una viabilidad

económica, reducción de gases contaminantes y un ahorro significativo en energía eléctrica, además, impulsa el desarrollo y la economía de las luminarias LED en Australia [69].

2.6.5 Alumbrado público inteligente en Colombia

En Colombia el concepto de alumbrado público inteligente está empezando a tener más interés, aunque, todavía existen lugares donde faltan por remplazar las luminarias obsoletas por luminarias LED para hacer eficiente el alumbrado público. En algunos lugares hay luminarias obsoletas, que son reemplazadas por tecnologías como el HID. El alumbrado inteligente se ha estructurado en torno a proyectos privados muy pequeños y limitados, como algunos espacios públicos en universidades y parques [70].

Algunos proyectos demuestran la conveniencia de la utilización del alumbrado inteligente en las ciudades y espacios públicos, como por ejemplo un proyecto de instalación de luminarias gestionadas mediante comunicación inalámbrica Wi-Fi y ZigBee en la ciudad de Bucaramanga. Proyectos como estos, dan a conocer la capacidad que puede llegar a tener un alumbrado público inteligente [71].

Adicional a esto en Colombia se ha analizado la posibilidad de hacer ciudades inteligentes donde diferentes sistemas, trabajen en conjunto para mejorar los servicios que son usados por las personas inicialmente usando el mejoramiento del sistema de transporte [72], y en futuro posiblemente los alumbrados inteligentes.

Algunas investigaciones sobre el consumo energético de los hogares rurales en la ciudad de pasto en Colombia muestran que el 34% del consumo energético de esos hogares son invertidos en iluminación. Lo cual muestra que es posible hacer un mejor uso de la energía en algunos lugares de Colombia [73]. Si a esto se suma estudios realizados en la ciudad de Pasto, donde se observa la cantidad de energía producidas por paneles solares monocristalinos o policristalinos bajo las condiciones de irradiación y temperatura locales, se demostró que estos desempeñan un buen trabajo en especial los paneles monocristalinos. Esto demuestra que diferentes componentes de un sistema de alumbrado público inteligente trabajan satisfactoriamente [74].

En la ciudad de Medellín se diseñó un sistema en forma de árbol con paneles solares de 50W, equipado con baterías de respaldo energético. Está hecho de bambú, sensores de proximidad y luz blanca LED. Tiene una autonomía de 3 horas y un ahorro anual estimado de 876 Wh. Los sensores de iluminación encienden en horas nocturnas [75]. Este proyecto tiene grandes ahorros energéticos y es de los pocos que existen de este tipo en Colombia.

3. DISCUSIÓN

¿Qué tan conveniente es la utilización de los alumbrados públicos LED inteligentes? Este artículo, revisa tanto un estado del arte actual acerca de los alumbrados públicos LED inteligentes, como los diferentes casos de estudio en donde se proyecta o se ha implementado esta forma de iluminar las calles y lugares públicos.

La revisión del estado del arte muestra un conjunto de tecnologías innovadoras que se unen para formar toda una estructura inteligente, capaz de hacer “dimming” o atenuar las

luminarias LED. Cada elemento del sistema inteligente LED, como lo es la luminaria LED, la comunicación inalámbrica, los sensores de movimiento, los datos de internet, el centro de gestión y demás tecnologías inteligentes añadidas, tiene un proceso tecnológico que les ha permitido desarrollarse al punto de ser utilizadas en este contexto de iluminación pública. Cualquiera de las tecnologías que complementan el sistema LED inteligente actual, pueden desarrollarse aún más o pueden ser reemplazadas a futuro por alguna tecnología superior, que resulte más eficiente y eficaz que su antecesora.

El avance de la tecnología hace que surjan mejores complementos para el alumbrado público inteligente. En caso de las luminarias LED, estas pueden ser reemplazadas por las luces orgánicas de diodo emisor (*OLED sigla en inglés*), o por otra tecnología de luminarias superior que pueda surgir a futuro. Lo mismo puede ocurrir con los sistemas de comunicación, que a futuro exista un mejor protocolo que ZigBee, o que la información no sea manejada por internet, y así con todos los elementos que conforman el alumbrado inteligente. Es por eso que este paradigma de iluminación puede mantener su metodología de funcionamiento, pero con partes diferentes y mejoras.

En cuanto a la revisión de los casos de estudios en diferentes lugares del mundo, se parte de que se realizó entre los años 2006 hasta 2018. Los casos de estudio en este periodo de tiempo han aumentado en todo el mundo, por lo menos un país de cada continente del mundo ha implementado esta forma de iluminación pública. Haciendo que, tanto en el ámbito público como en el privado, se aumente la confianza hacia la iluminación inteligente LED. A medida que aumente el número de proyectos relacionados con alumbrado inteligente LED, más se fortalecerá el entendimiento acerca de esta metodología y, por ende, mejorará su funcionalidad.

Uno de los inconvenientes que surge con los alumbrados inteligentes LED, es que estos tienen un precio inicial costoso, es decir, una alta inversión. Si bien, cada año aumenta el número de este tipo de proyectos y, a su vez, los componentes se abaratan, no deja de resultar costosa la inversión inicial. Lo bueno, es que debido a la buena eficiencia energética que presentan estos alumbrados inteligentes LED, la operatividad del mismo reduce precios por consumo de energía y mantenimiento, haciendo que la inversión inicial se recupere en aproximadamente cinco años. Otro inconveniente no relacionado con la economía tiene que ver con el impacto al medio ambiente, para esto se proyectaría promover mejores políticas de almacenaje para las baterías y demás elementos no funcionales del sistema inteligente LED.

Como bien se plantea, las recomendaciones a futuro tienen que ver con seguir explorando nuevas posibilidades que ayuden a crear eficiencia y eficacia. El avance tecnológico permitirá que a futuro se cree un mejor escenario, y se pueda construir un alumbrado público altamente eficiente, confiable y amigable, en el que todos los ciudadanos puedan disfrutar de su funcionalidad. El reto a futuro, no solo es pensar en el bienestar personal del ser humano, también en el bienestar de nuestro entorno ambiental y la fauna, que el avance tecnológico no repercuta en los demás. Así, se logrará sostenibilidad total con los nuevos enfoques y tendencias tecnológicas hacia el futuro.

4. CONCLUSIONES

Los alumbrados públicos inteligentes con tecnología de iluminación LED, se disponen a ser el siguiente paso hacia la eficiencia y eficacia energética en cuanto a iluminación de calles. En gran parte, porque el conjunto de tecnologías que conforman el alumbrado inteligente LED, tienen un grado de desarrollo suficientemente estable para poder reemplazar los alumbrados públicos convencionales. Ante la evidencia mostrada en esta revisión, en donde los alumbrados inteligentes LED, consumían aproximadamente 60% menos de energía que su alumbrado antecesor, se fortalece la hipótesis de que se debería implementar esta forma de iluminación en más lugares del mundo.

La tecnología de luminarias ha cambiado en los años y creado una variedad de nuevas tendencias de iluminación, algunas más eficientes y/o eficaces que otras. Entre estas resalta la tecnología LED que, por sus características operacionales, es la luminaria más pertinente a utilizarse en alumbrado públicos. No se descarta la posibilidad de que en años posteriores se desarrolle alguna otra tecnología de iluminación mejor, pero tiene solidez tecnológica, eficiencia y eficacia que le permite ser desde ahora el tipo de luminaria adecuada para ser utilizada, no solo en los alumbrados inteligentes públicos, sino en cualquier tipo de alumbrado público.

La comunicación ZigBee permite tener una red robusta que entrelaza miles de luminarias, lo cual, se hace pensar que es el momento oportuno para que más proyectos de iluminación inteligente LED en lugares públicos utilicen este protocolo de comunicación inalámbrica. El alcance que logra ZigBee también hace pensar que se puede extender su utilidad, no solo en alumbrado público, sino en otros ámbitos urbanos, así permitiendo tener un entorno más inteligente en cualquier lugar donde se le implemente.

Los retos económicos, ambientales y de adaptabilidad a las exigencias que se requieren actualmente de la iluminación pública, son algo que siempre ocurre en cualquier innovación tecnológica, pero la mejor forma de solventar esto es implementando más su uso. Se sabe que los alumbrados públicos inteligentes LED tienen obstáculos que superar, pero para lograr eso se tiene que implementar más este tipo de alumbrado público y las personas acostumbrarse a estos sistemas, se tiene que mostrar de que se trata esta tendencia innovadora, así se abrirán más posibilidades de hacer esta forma de iluminación más eficaz, más funcional y sostenible. Cada vez más se encuentran artículos propositivos y proyectos ya realizados relacionados con el alumbrado público inteligente LED, lo cual permite observar tanto las grandes ventajas, como algunas desventajas que posee esta forma de iluminación pública.

REFERENCIAS

- [1] M. Castro, A. J. Jara, and A. F. G. Skarmeta, "Smart lighting solutions for smart cities," *Proc. - 27th Int. Conf. Adv. Inf. Netw. Appl. Work. WAINA 2013*, pp. 1374–1379, 2013. Disponible en: <https://tinyurl.com/yyzbbg13>
DOI: 10.1109/WAINA.2013.254
- [2] M. H. Kim *et al.*, "Origin of efficiency droop in GaN-based light-emitting diodes," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 91, no. 18, pp. 2–4, 2007. Disponible en: <https://tinyurl.com/yx8kvgcq>
- [3] S. Brief, "Smart Street Lights for Brighter Savings and Opportunities," pp. 1–4. Disponible en: <https://tinyurl.com/yy44o2dy>
- [4] T. Mjøs, "Intelligent street lighting in Oslo, Norway," *Eceee 2007 Summer Study*, pp. 469–474, 2007. Disponible en: <https://tinyurl.com/y59z9avv>
- [5] W. Pcbs, "PCB-Containing Fluorescent Lamp Ballasts," no. November, pp. 1–2, 2004. Disponible en: <https://tinyurl.com/y2gd3348>
- [6] F. Li, D. Chen, X. Song and Y. Chen, "LEDs: A Promising Energy-Saving Light Source for Road Lighting," *2009 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference*, Wuhan, 2009, pp. 1-3.
Disponible en:
<https://ieeexplore.ieee.org/document/4918460>
DOI: 10.1109/APPEEC.2009.4918460
- [7]. M. Popa and C. Cepisca, "Energy Consumption Saving Solutions Based on Intelligent Street Lighting Control System," *Electr. Electron. Eng. (ELECO), 2013 8th Int. Conf.*, vol. 73, no. 6, pp. 278–282, 2011.
Disponible en: https://www.scientificbulletin.upb.ro/rev_docs_arhiva/full10609.pdf
- [8] L. Xiaogang, C. Zhaohui, and L. Sheng, "Static and dynamic analysis for high power light emitting diode street light fixtures under wind load," *Electron. Packag. Technol. High Density Packag. (ICEPT-HDP), 2011 12th Int. Conf.*, no. 1, pp. 1–4, 2011.
Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6067018/>
- [9] G. Vijay Krishna, "Intelligent street lighting," *Int. J. Innov. Eng. Technol.*, vol. 7001, no. 2, pp. 1–9, 2017.
Disponible en: <http://ijiet.com/wp-content/uploads/2017/05/48.pdf>

DOI: 10.21172/ijiet.82.048

[10] K. Geisler, "The Relationship Between Smart Grids and Smart Cities," *IEEE SmartGrid Newsl. Compend.*, vol. 5, pp. 1–3, 2015. Disponible en: <https://www.mayorsinnovation.org/images/uploads/pdf/1-ieee.pdf>

[11] C. Certoma and F. Rizzi, "Smart Cities for Smart Citizens: Enabling Urban Transitions through Crowdsourcing," *I*, vol. 1, no. August, pp. 1–2, 2015. Disponible en: <https://tinyurl.com/y5m3gdxm>

[12] European Commission, "Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions. Next steps for a sustainable European future. European action for sustainability.," COM(2016) 739 Final, pp. 19, 2016. Disponible en: <https://tinyurl.com/y8fg2o2u>

[13] A. Naamane and N. K. MSirdi, "Towards a smart grid Communication," *Energy Procedia*, vol. 83, pp. 428–433, 2015. Disponible en: <https://tinyurl.com/y6cvdvvl>

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.12.162>

[14] J. R. Roncero, "Integration is key to smart grid management," *CIREC Semin. 2008 SmartGrids Distrib.*, no. 9, pp. 25–25, 2008. Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/document/4591814/?arnumber=4591814> DOI: 10.1049/ic:20080430

[15] H. Farhangi, "The path of the smart grid," *IEEE Power Energy Mag.*, vol. 8, no. 1, pp. 18–28, 2010. Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/document/5357331/> DOI: 10.1109/MPE.2009.934876

[16] H. B. Khalil, N. Abas, and S. Rauf, "Intelligent street light system in context of smart grid," *8th Int. Conf. Comput. Commun. Netw. Technol. ICCCNT 2017*, vol. 1, no. 1, pp. 1–5, 2017. Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8204158/> DOI: 10.1109/ICCCNT.2017.8204158

[17] P. Pribyl and O. Pribyl, "Definition of a smart street as smart city's building element," *2015 Smart Cities Symp. Prague, SCSP 2015*, vol. 1, pp. 1–6, 2015. Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7181575/> DOI: 10.1109/SCSP.2015.7181575

[18] S. S. Badgelwar and H. M. Pande, "Survey on energy efficient smart street light system," *Proc. Int. Conf. IoT Soc. Mobile, Anal. Cloud, I-SMAC 2017*, pp. 866–869, 2017.

Disponibile en: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8058303/>
DOI: 10.1109/I-SMAC.2017.8058303

[19] G. Starr and A. Smith, "IN THE DIGITAL AGE SMART PLANNING OUR FUTURE CITIES," *I*, vol. 1, no. 1, pp. 1–12, 2017.

Disponibile en: <https://tinyurl.com/yxfbsa3e>

[20] M. Shahidehpour, C. Bartucci, N. Patel, T. Hulsebosch, P. Burgess, and N. Buch, "Streetlights are getting smarter: Integrating an intelligent communications and control system to the current infrastructure," *IEEE Power Energy Mag.*, vol. 13, no. 3, pp. 67–80, 2015. Disponibile en: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7091108> DOI: 10.1109/MPE.2015.2397335

[21] V. K. Bhangdiya, "Low power consumption of LED street light based on smart control system," *Proc. - Int. Conf. Glob. Trends Signal Process. Inf. Comput. Commun. ICGTSPICC 2016*, pp. 619–622, 2017.

Disponibile en: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7955375>

DOI: 10.1109/ICGTSPICC.2016.7955375

[22] A. Soni, N. Bind, and R. Gupta, "Smart Street Lighting," *I*, vol. 3, no. 3, pp. 148–150, 2016.

Disponibile en: <https://tinyurl.com/y2hlffm>

[23] Intel Corporation, "Smart Street Lights for Brighter Savings and Opportunities," vol. 1, no. 1, pp. 1–4, 2017.

Disponibile en: <https://tinyurl.com/yy44o2dy>

[24] P. Elejoste *et al.*, "An easy to deploy street light control system based on wireless communication and LED technology", vol. 13, no. 5. pp. 6492-6523, 2013.

Disponibile en: <https://www.mdpi.com/1424-8220/13/5/6492/htm>

DOI: 10.3390/s130506492

[25] P. K. Y. Rajput, G. Khatav, M. Pujari, and P. Yadav, "Intelligent street lighting system" *Int. J. Eng. Sci. Invent.*, vol. 2, no. 3, pp. 60–69, 2013.

Disponibile en: [http://www.ijesi.org/papers/Vol\(2\)3%20\(Versio-3\)/J236069.pdf](http://www.ijesi.org/papers/Vol(2)3%20(Versio-3)/J236069.pdf)

[26] S. Madakam, R. Ramaswamy, and S. Tripathi, "Internet of Things (IoT): A Literature Review," *J. Comput. Commun.*, vol. 3, no. 5, pp. 164–173, 2015.

Disponibile en: http://file.scirp.org/Html/56616_56616.htm

DOI: <http://dx.doi.org/10.4236/jcc.2015.35021>

[27] P. J. Werbos, "Building and Understanding Adaptive Systems: A Statistical/Numerical Approach to Factory Automation and Brain Research," *IEEE Trans. Syst. Man Cybern.*, vol. 17, no. 1, pp. 7–20, 1987.

Disponible en: <https://tinyurl.com/y5v4feft>

DOI: 10.1109/TSMC.1987.289329

[28] F. Leccese, M. Cagnetti, and D. Trinca, "A smart city application: A fully controlled street lighting isle based on Raspberry-Pi card, a ZigBee sensor network and WiMAX," *Sensors (Switzerland)*, vol. 14, no. 12, pp. 24408–24424, 2014. DOI: 10.3390/s141224408. Disponible en: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4299117/>

[29] P. d. Toit, C. Kruger, G. P. Hancke, and T. D. Ramotsoela, "Smart street lights using power line communication," *IEEE Africon 2017 Proc.*, vol. 1, pp. 1078–1083, 2017. Disponible en: <https://tinyurl.com/y53yrnz4>

DOI: 10.1109/AFRCON.2017.8095718

[30] A. Jhunjhunwala et al., "Energy efficiency in lighting: AC vs DC LED lights," 2016 1st Int. Conf. Sustain. Green Build. Communities, SGBC 2016, pp. 7–10, 2017.

Disponible en: <https://tinyurl.com/yxt82tgt>

DOI: 10.1109/SGBC.2016.7936068

[31] W. J. B. Heffernan, L. P. Frater, and N. R. Watson, "LED replacement for fluorescent tube lighting," 2007 Australas. Univ. Power Eng. Conf. AUPEC, pp. 1–6, 2007. Disponible en: <https://tinyurl.com/y4v3gyh9>

DOI: 10.1109/AUPEC.2007.4548064

[32] A. Farahat, A. Florea, J. L. M. Lastra, C. Brañas, and F. J. A. Sánchez, "Energy Efficiency Considerations for LED-Based Lighting of Multipurpose Outdoor Environments," *IEEE J. Emerg. Sel. Top. Power Electron.*, vol. 3, no. 3, pp. 599–608, 2015. Disponible en: <https://tinyurl.com/y4ooyl52>

DOI: 10.1109/JESTPE.2015.2453231

[33] I. Moreno, M. Avendaño-Alejo, T. Saucedo-A, and A. Bugarin, "Modeling LED street lighting," *Appl. Opt.*, vol. 53, no. 20, pp. 4420–4430, 2014.

Disponible en: <https://tinyurl.com/yxmp3pkz>

DOI: 10.1364/AO.53.004420

[34] E. Lara, J. Mondragón, and D. Baustista, "ESTUDIO Y ANÁLISIS DE INGENIERÍA EN ALUMBRADO PÚBLICO CON LUMINARIOS DE LED EN LA PERIFERIA DEL RECLUSORIO NORTE," *Tesis Investig.*, vol. 1, no. 1, pp. 1–185, 2009. Disponible en: <https://tinyurl.com/y3qoum7y>

[35] R. Husin et al., "Automatic Street Lighting System for Energy Efficiency based on Low Cost Microcontroller," vol. 1, pp. 43–48, 2012.

Disponible en: [ijssst.info/Vol-13/No-1/paper5.pdf](https://www.ijssst.info/Vol-13/No-1/paper5.pdf)

[36] M. F. Pinto, T. R. F. Mendonca, F. Coelho, and H. A. C. Braga, "Economic analysis of a controllable device with smart grid features applied to LED street lighting system," *IEEE Int. Symp. Ind. Electron.*, vol. 2015–Septe, pp. 1184–1189, 2015.

Disponibile en: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7281640/>

DOI:10.1109/ISIE.2015.7281640

[37] V. K. Solanki, S. Katiyar, V. Bhashkarsemwal, P. Dewan, M. Venkatasen, and N. Dey, "Advanced Automated Module for Smart and Secure City," *Phys. Procedia*, vol. 78, pp. 367–374, 2016. Disponibile en:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877050916000788>

DOI: 10.1016/j.procs.2016.02.076

[38] R. Müllner and A. Riener, "An energy efficient pedestrian aware Smart Street Lighting system," *Int. J. Pervasive Comput. Commun.*, vol. 7, no. 2, pp. 147–161, 2011.

Disponibile en:

https://www.pervasive.jku.at/Research/Publications/_Documents/2011_An%20energy%20efficient%20pedestrian%20aware%20Smart%20Street%20Lighting%20system_MuellnerRiener.pdf

[39] J. Byun, I. Hong, B. Lee, and S. Park, "Intelligent household LED lighting system considering energy efficiency and user satisfaction," *IEEE Trans. Consum. Electron.*, vol. 59, no. 1, pp. 70–76, 2013.

Disponibile en: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6490243/>

DOI: 10.1109/TCE.2013.6490243

[40] N. Shlayan, K. Challapali, D. Cavalcanti, T. Oliveira, and Y. Yang, "A novel illuminance control strategy for roadway lighting based on greenshields macroscopic traffic model," *IEEE Photonics J.*, vol. 10, no. 1, pp. 1-11, 2018.

Disponibile en: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8240941/>

DOI: 10.1109/JPHOT.2017.2782801

[41] M. Shahidehpour, C. Bartucci, N. Patel, T. Hulsebosch, P. Burgess, and N. Buch, "Streetlights are getting smarter: Integrating an intelligent communications and control system to the current infrastructure," *IEEE Power Energy Mag.*, vol. 13, no. 3, pp. 67–80, 2015. Disponibile en: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7091108>

DOI: 10.1109/MPE.2015.2397335

[42] U.S. Department of Energy, "Renewable Energy: An Overview," *Energy Effic. Renew. Energy Clear.* pp. 1–8, 2001.

Disponibile en: <https://www.nrel.gov/docs/fy01osti/27955.pdf>

DOI: 102001-1102 FS175

[43] M. N. Bhairi, S. S. Kangle, M. S. Edake, B. S. Madgundi, and V. B. Bhosale, "Design and implementation of smart solar LED street light," *Proc. - Int. Conf. Trends Electron. Informatics, ICEI 2017*, vol. 2018–January, pp. 509–512, 2018.

Disponibile en: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8300980/>

DOI: 10.1109/ICOEI.2017.8300980

[44] M. D. Vijay, K. Shah, G. Bhuvaneshwari, and B. Singh, "LED based street lighting with automatic intensity control using solar PV," Proc. - 2015 IEEE IAS Jt. Ind. Commer. Power Syst. / Pet. Chem. Ind. Conf. ICPSPCIC 2015, pp. 197–202, 2017.

Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7974074/>

DOI: 10.1109/CICPS.2015.7974074

[45] M. Nassereddine, J. Rizk, M. Nagrial, and A. Hellany, "Battery Sustainable PV Solar House: Storage Consideration for off Grid," 2018 Third Int. Conf. Electr. Biomed. Eng. Clean Energy Green Comput., no. 1, pp. 3–7, 2018

Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8357129>

DOI: 10.1109/EBECEGC.2018.8357129

[46] C. A. Bouroussis, I. Georgaris, and F. V Topalis, "Outdoor lighting using renewable energy sources" Proceedings of the 6th WSEAS International Conference on Power Systems, Lisbon, Portugal, no 1, pp. 72-77, September 22-24, 2006.

Disponible en:

https://www.researchgate.net/publication/242158728_Outdoor_lighting_using_renewable_energy_sources

[47] J. Khan, G. Bhuyan, A. Moshref, K. Morison, J. Pease, and J. Gurney, "Ocean wave and tidal current conversion technologies and their interaction with electrical networks," Power Energy Soc. Gen. Meet. Deliv. Electr. Energy 21st Century, 2008 IEEE, no. c, pp. 1–8, 2008.

Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/document/4596550/>

DOI: 10.1109/PES.2008.4596550

[48] F. Leccese and M. Cagnetti, "An Intelligent and High Efficiency Street Lighting System Is based on Raspberry-Pi Card , ZigBee Sensor Network and Photovoltaic energy," Int. J. Eng. Sci. Innov. Technol., vol. 3, no. 6, pp. 274–285, 2014.

Disponible en: www.ijesit.com/Volume%203/Issue%206/IJESIT201406_35.pdf

[49] I. Wojnicki, S. Ernst, and L. Kotulski, "Economic Impact of Intelligent Dynamic Control in Urban Outdoor Lighting," *Energies*, vol. 9, no. 5, pp. 1–14, 2016.

Disponible en: <http://www.mdpi.com/1996-1073/9/5/314>

[50] C. S. Heysel and Y. R. Filion, "Estimating the payback period of in-line micro turbines with analytical probabilistic models," *Procedia Eng.*, vol. 70, pp. 815–822, 2014.

Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705814000915>

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.02.089>

[51] S. D. Promislow and D. Spring, "Postulates for the internal rate of return of an investment project," *J. Math. Econ.*, vol. 26, no. 3, pp. 325–361, 1996.

Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0304406895007474>

DOI: [https://doi.org/10.1016/0304-4068\(95\)00747-4](https://doi.org/10.1016/0304-4068(95)00747-4)

[52] G. de A. Dantas *et al.*, "Public policies for smart grids in Brazil," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 92, no. January 2017, pp. 501–512, 2018.

Disponibile en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032118303071>

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.04.077>

[53] Y. A. Muñoz, E. Carrillo, G. Serrano, L. J. Carrillo, and J. E. Guerrero, "Methodology for smart energy performance in rural zones of Colombia," *Smart Cities Symp. Prague 2017*, vol. 1, no. 1, pp. 1–7, 2017.

Disponibile en: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7973871/>

DOI: 10.1109/SCSP.2017.7973871

[54] N. R Velaga and A. Kumar, "Techno-economic Evaluation of the Feasibility of a Smart Street Light System: A case study of Rural India," *Procedia - Soc. Behav. Sci.*, vol. 62, pp. 1220–1224, 2012.

Disponibile en: <https://tinyurl.com/y3g5m9o2>

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2012.09.208>

[55] S. K. Kar, A. Sharma, and B. Roy, "Solar energy market developments in India," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 62, pp. 121–133, 2016.

Disponibile en: <https://tinyurl.com/y69zbkvz>

DOI: 10.1016/j.rser.2016.04.043

[56] K. S. Targiel, "Valuation of investment projects in the context of sustainable development: Real option approach," *2013 World Congress on Sustainable Technologies (WCST)*, London, 2013, pp. 90-94.

Disponibile en:

<https://tinyurl.com/y2843bxi>

DOI:10.1109/WCST.2013.6750412

[57] N. T. D. Fernandes *et al.*, "Control strategy for pulsed lead acid battery charger for stand alone photovoltaics," *2015 IEEE 13th Brazilian Power Electronics Conference and 1st Southern Power Electronics Conference (COBEP/SPEC)*, Fortaleza, 2015, pp. 1-6.

Disponibile en:

<https://tinyurl.com/y3y3p5by>

DOI: 10.1109/COBEP.2015.7420020

[58] A. Corazza, S. Giorgi and V. Massaro, "Mercury Dosing in Fluorescent Lamps," *2008 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*, Edmonton, AB, 2008, pp. 1-4.

Disponibile en: <https://tinyurl.com/y4lu6upt>

DOI: 10.1109/08IAS.2008.237

[59] A. Emleh, A. S. de Beer, H. C. Ferreira and A. J. Han Vinck, "On mercury vapor lamps and their effect on the smart-grid PLC channel," *2015 IEEE International Workshop on Applied Measurements for Power Systems (AMPS)*, Aachen, 2015, pp. 78-83.

Disponibile en: <https://tinyurl.com/y3jbxahl>

DOI: 10.1109/AMPS.2015.7312742

[60] C. C. Voigt, K. Rehnig, O. Lindecke, and G. Pētersons, "Migratory bats are attracted by red light but not by warm-white light: Implications for the protection of nocturnal migrants," *wiley Ecol. Evol.*, vol. 1, no. April, pp. 9353–9361, 2018.

Disponibile en: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1002/ece3.4400>

DOI:10.1002/ece3.4400

[61] H. Griffiths, "THE FUTURE OF STREET LIGHTING THE FUTURE OF STREET LIGHTING The potential for new service development FUTURE CITIES CATAPULT THE FUTURE OF STREET LIGHTING," vol. 1, no. 1, pp. 1–48, 2017.

Disponibile en: <https://tinyurl.com/y93I3ym4>

[62] Swedish environmental protection agency, "Intelligent street lighting in Gothenburg saves electricity and lasts longer," *Best Pract. examples energy Effic. klmp-climate Invest. Program.*, vol. 1, no. February, pp. 1–2, 2011.

Disponibile en: <https://tinyurl.com/y48msgle>

[63] E. Erol, E. Kalkan, and D. Atli, "New approaches in street lightings in Turkey," *Int. Conf. Renew. Energy Res. Appl. ICRERA 2015*, pp. 520–524, 2015.

Disponibile en: <https://tinyurl.com/yyhphzbo>

DOI: 10.1109/ICRERA.2015.7418467

[64] P. S. Paulo, R. Ribeiro, P. Valverde, and E. D. P. D. Edpd, "Smart led lighting systems implementation in lisbon metropolitan area," vol. 5, pp. 3–6.

Disponibile en: <https://tinyurl.com/yxshlm6j>

DOI: 10.1049/cp.2016.0623

[65] Tekla S. Perry, "San Diego's streetlights get smart". *IEEE Spectrum*, Vol. 55, Jan, pp. 30-31, 2018, DOI. 10.1109/MSPEC.2018.8241729

Disponibile en: <https://tinyurl.com/yxvopyp7>

DOI: 10.1109/MSPEC.2018.8241729

[66] J. T. Kim and T. Hwang, "Feasibility Study on LED Street Lighting with Smart Dimming Systems in Wooi Stream , Seoul" no. May, pp. 425–430, 2017.

Disponible en: <https://tinyurl.com/y3gt3hyc>

DOI: 10.3130/jaabe.16.425

[67] Y. M. Yusoff, R. Rosli, M. U. Kamaluddin, and M. Samad, "Towards smart street lighting system in Malaysia," *IEEE Symp. Wirel. Technol. Appl. ISWTA*, pp. 301–305, 2013.

Disponible en: <https://tinyurl.com/yyxbqozy>

DOI: 10.1109/ISWTA.2013.6688792

[68] I. Lima, C. Marques, R. Moraes, V. Sarmentó and Z. Carvalho, "The Public Policy Strategies Fostering Smart Cities," *2017 IEEE First Summer School on Smart Cities (S3C)*, Natal, 2017, pp. 165-167.

Disponible en: <https://tinyurl.com/y6ktqjgt>

DOI: 10.1109/S3C.2017.8501409

[69] X. Jiang, "Innovation to brisbane city council street lighting system with solar powered LED: A techno-economic feasibility study," *2016 Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC)*, Brisbane, QLD, 2016, pp. 1-6.

Disponible en: <https://tinyurl.com/y3sqzqgs>

DOI: 10.1109/AUPEC.2016.7749376

[70] M. E. Briñón and H. A. Cardona, "DISEÑO DE ILUMINACIÓN LED DE ALTA EFICIENCIA EN EL PROYECTO MICRO-RED DE LA UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA," vol. 1, no. 1, pp. 1–14, 2015.

Disponible en: <https://tinyurl.com/y56l39ne>

[71] J. Ramirez, "Proyecto Piloto de telegestión del servicio de Alumbrado Público de la ciudad de Bucaramanga," *I*, vol. 1, no. 1, pp. 1–32, 2010.

Disponible en: <https://tinyurl.com/y5ue8gtb>

[72] L. F. Herrera-Quintero, W. D. Jalil-Naser, K. Banse, and J. J. Samper-Zapater, "Smart cities approach for Colombian Context. Learning from ITS experiences and linking with government organization," *2015 Smart Cities Symp. Prague, SCSP 2015*, vol. 1, pp. 2–5, 2015.

Disponible en: <https://tinyurl.com/y37hhbxq>

DOI: 10.1109/SCSP.2015.7181557

[73] W. O. Achicanoy M. and J. B. Jimenez, “Electricity demand modeling for rural residential housing: A case study in Colombia,” *2015 IEEE PES Innov. Smart Grid Technol. Lat. Am. (ISGT LATAM)*, pp. 614–618, 2015.

Disponible en: <https://tinyurl.com/y4aaqca9>

DOI: 10.1109/ISGT-LA.2015.7381225

[74] F. J. E. Checa, E. E. Rosero, and O. F. E. De La Cruz, “Comparison between the energy generated from three types of c-Si photovoltaic modules and the temperature and irradiance of the city of Pasto, Colombia,” *2015 IEEE PES Innov. Smart Grid Technol. Lat. Am. ISGT LATAM 2015*, vol. 1, pp. 757–761, 2016.

Disponible en: <https://tinyurl.com/yxfhr8ht>

DOI: 10.1109/ISGT-LA.2015.7381251

[75] E. Duque, A. Isaza, P. Ortiz, S. Chica, and A. Lujan, “Urban sets innovation: design of a solar tree PV system for charging mobile devices in Medellin-Colombia,” *6th Int. Conf. Renew. energy Res. Appl.*, vol. 1, pp. 5–8, 2017.

Disponible en: <https://tinyurl.com/y2xpcuhr>

DOI: 10.1109/ICRERA.2017.8191109