

**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL**

**Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación**

PROPUESTA DE SISTEMA DE TELEGESTIÓN PARA LA  
AUTOMATIZACIÓN DE ALUMBRADO PÚBLICO EN SISTEMAS DE  
DISTRIBUCIÓN ELÉCTRICA

**ARTICULO PROFESIONAL DE ALTO NIVEL**

Previo la obtención del Título de:

**MAGÍSTER EN ELECTRICIDAD, MENCIÓN SISTEMAS  
ELÉCTRICOS DE POTENCIA**

Presentado por:

Ing. Sergio Israel Proaño Guevara

GUAYAQUIL - ECUADOR

Año: 2024

## DEDICATORIA

El presente proyecto va dedicado principalmente a Dios que es mi soporte y fortaleza para seguir avanzando en mi vida, como lo dice en su palabra: Filipenses 4:13 ***“Todo lo puedo en Cristo que me fortalece”***, mi familia que me da su respaldo terrenal y mis hijas Valeria, Nia e Isabella que son mi motivación en dar lo mejor día a día.

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradeciendo a principalmente a Dios que siempre me acompaña y me dio una gran cantidad de personas (amistades, compañeros, profesores y familiares) que me supieron dar la mano y ayuda en este objetivo de ser Máster en Electricidad. Gracias a la Escuela Superior Politécnica del Litoral y a el coordinador Msc. Fernando Vaca Urbano por la aceptación a este programa de estudios. Finalmente, a mis excelentes profesores que sin su enseñanza no hubiera llegado hasta aquí.

## **DECLARACIÓN EXPRESA**

“Los derechos de titularidad y explotación, me corresponde conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; Sergio Israel Proaño Guevara y doy mi consentimiento para que la ESPOl realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual”

---

Ing. Sergio Israel Proaño Guevara

# EVALUADORES

.....  
**Fernando Vaca Urbano Msc**

TUTOR

.....  
**Johnny Rengifo Santana PhD**

REVISOR

# Propuesta de Sistema de Telegestión para la Automatización de Alumbrado Público en Sistemas de Distribución Eléctrica

Sergio Proaño Guevara<sup>1</sup> y Fernando Vaca U.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación, Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL), Guayaquil 09-01-5863, Ecuador, Email: siproano@espol.edu.ec, fearvaca@espol.edu.ec

**Resumen**—El presente artículo realiza el estudio de sistemas de gestión, control y administración del alumbrado público existentes en la literatura con el fin de proponer la infraestructura más adeducada para la implementación en los sistemas de distribución eléctrica del Ecuador. El sistema de telegestión de alumbrado público seleccionado debe integrar luminarias multimarca además de cumplir con la Revisión 05, sección 3: Especificaciones técnicas de materiales y equipos del sistema de distribución del Ministerio de Energías y Minas, y la Regulación 007/23 establecida por la Agencia de Regulación y Control de Energía y Recursos Naturales No Renovables (ARCERNNR), realizando un monitoreo en tiempo real del estado y funcionamiento de las luminarias, alertando cuando el servicio de alumbrado público presente problemas por fallas técnicas o no técnicas. De este modo, el sistema planteado maximizará la eficiencia en el uso de los recursos institucionales, sin depender del tipo de tecnología de iluminación implementada. También generará informes que servirán para la toma de decisiones y la mejora del servicio. En caso de imprevistos o interrupciones, el sistema permitirá coordinar rápidamente las actividades de mantenimiento para resolver los problemas de manera eficaz.

**Palabras Claves**—Alumbrado Público, Eficiencia Energética, IoT, Luminarias Leds, Radio Frecuencia, Telegestión, Telemetría.

## I. INTRODUCCIÓN

Durante los últimos años, el interés por implementar tecnologías que optimicen el uso de energía ha crecido, motivado por preocupaciones económicas y ecológicas, y orientado hacia un desarrollo que sea respetuoso con el medio ambiente. Los sistemas de iluminación artificial, en particular, representan un gran potencial de ahorro energético con una iluminación eficiente mediante control electrónico [1]. Alrededor del 15% de la electricidad generada a nivel mundial se emplea para iluminación artificial, según estimaciones actuales [1]–[3]. Mientras que, en ámbito del alumbrado exterior, el alumbrado público representa aproximadamente el 40% del consumo total de energía [1]. En consecuencia, las soluciones que disminuyen el consumo energético en los sistemas de iluminación resultan cruciales, generando impactos tanto económicos como ambientales de gran relevancia.

El sistema de iluminación artificial ha utilizado usualmente lámparas de descarga de alta intensidad para el alumbrado público [4]. A lo largo de los últimos 50 años, estas lámparas han sido valoradas por su mayor eficiencia en comparación con los modelos anteriores, como las lámparas incandescentes y

fluorescentes. Sin embargo, tanto para las lámparas basadas en incandescentes como para las basadas en descargas eléctricas en gases, el proceso de producción de luz está asociado con la elevación de la temperatura, lo que lleva a una alta tasa de pérdida [5]. Por lo tanto, los sistemas iluminación convencionales presentan numerosos problemas de fiabilidad, alto consumo de energía además de presentar grandes desafíos en la administración, operación y mantenimiento de estos [6].

A continuación, se describen algunos de los problemas más comunes [1]–[6]:

- 1) Consumo de energía elevado: Los sistemas de iluminación convencional suelen tener un consumo de energía elevado, lo que puede resultar en costos elevados de electricidad y una huella de carbono significativa. Este problema se agrava si se utilizan luminarias ineficientes o se deja encendida la luz en zonas sin necesidad.
- 2) Fallos frecuentes: Las lámparas incandescentes y halógenas pueden tener una vida útil limitada y tienden a fallar con frecuencia, lo que puede resultar en costos de mantenimiento elevados y en interrupciones en el suministro de luz.
- 3) Luz desigual: Los sistemas de iluminación convencional pueden generar una luz desigual, con sombras y puntos oscuros, lo que puede afectar la calidad de la iluminación y la seguridad en los espacios iluminados.
- 4) Dificultad para controlar la intensidad de la luz: En los sistemas de iluminación convencional, puede ser difícil controlar la intensidad de la luz, lo que puede resultar en un gasto innecesario de energía y en una menor comodidad visual.
- 5) Limitaciones de diseño: Los sistemas de iluminación convencional pueden tener limitaciones en cuanto a diseño y estética, lo que puede limitar la capacidad de los diseñadores para crear espacios visualmente atractivos y funcionales.

Además, el sistema de alumbrado convencional presenta otros desafíos como bajo nivel de inteligencia y poca fiabilidad para la administración y mantenimiento ya que se controlan manualmente. Esto puede conducir a un mayor consumo de energía si no se controla adecuadamente [7], [8]. En el caso del área de concesión de CNEL EP Unidad de Negocio Guayas Los Ríos, el porcentaje de consumo de energía en base a la

energía generada es el 3.76%, donde el sistema de alumbrado público consta del 96.99% de luminaria de sodio y 3.01% de luminaria tipo Led. Por lo tanto, es importante tener en cuenta estos problemas al seleccionar el sistema de iluminación adecuado para un espacio determinado y considerar alternativas más eficientes y sostenibles, como las luminarias led con sistemas de telegestión, que pueden ayudar a mejorar la eficiencia energética y la calidad de la iluminación [4].

En este contexto, los diodos emisores de luz (LED) en iluminación exterior representan un avance tecnológico en los últimos años. Varios estudios recientes indican el uso de LED en el alumbrado público con el fin de mejorar la eficiencia de los sistemas de alumbrado convencional [9]–[11]. Aspectos como la alta eficiencia luminosa (más de 150 lm/W), la durabilidad prolongada (hasta 100.000 horas), la resistencia mecánica superior, un índice de reproducción cromática que alcanza el 70%, la capacidad de atenuación y la emisión de luz blanca, posicionan a la tecnología LED como una solución preferente en el alumbrado público [12], [13]. Además, los LED son más respetuosos con el medio ambiente al no contener gases tóxicos, a diferencia de algunas lámparas de descarga [12], [13]. La integración de luminarias LED con tecnologías de telegestión para controlar las luminarias y otros componentes del alumbrado público puede tener un impacto económico significativo en este sector.

El servicio de alumbrado público en Ecuador sufre constantes interrupciones debido a múltiples factores, como el agotamiento de la vida útil de las luminarias, fallos en los sistemas de encendido, transitorios de tensión y corriente en la red eléctrica, y actos de vandalismo [14], [15]. Los actuales sistemas de supervisión de las redes eléctricas en el país están destinados principalmente a estaciones de conversión y subestaciones, donde los problemas se corrigen en pocas horas [16]. Sin embargo, es necesario desarrollar un sistema que permita el seguimiento, control y gestión remota del servicio de alumbrado público.

La Agencia de Regulación y Control de Energía y Recursos Naturales no Renovables (ARCERNNR), en su regulación No. ARCERNNR 007/23, establece que las empresas distribuidoras de energía eléctrica son las encargadas de controlar el estado y funcionamiento de las luminarias que presenten problemas [16].

Las compañías de distribución de energía eléctrica llevan a cabo el mantenimiento preventivo y correctivo de las luminarias del alumbrado público a través de visitas planificadas, basadas en los informes y quejas de los usuarios finales. Sin embargo, en algunos sectores, pueden transcurrir varios días sin servicio de alumbrado, lo que incrementa la inseguridad y la probabilidad de accidentes. Adicionalmente, el fallo de algunos fotocontroles provoca que las lámparas permanezcan encendidas durante el día, lo que genera un considerable desperdicio de energía. Además, la empresa carece de un informe preciso sobre las lámparas defectuosas debido a la extensa infraestructura del sistema de alumbrado público.

Para solucionar lo antes mencionados se introducen los sistemas de telegestión que integran una gran cantidad de infor-

mación relativa al funcionamiento de las luminarias del alumbrado público como ubicación, horario de funcionamiento, corriente consumida, etc. [13]. Toda esta información ayuda a los prestadores de servicios a optimizar recursos y realizar pruebas y mantenimientos preventivos, así como organizar, detectar y actuar en el menor tiempo posible ante los problemas que se presenten, con el fin de garantizar el funcionamiento permanente del servicio de alumbrado público.

El funcionamiento de un sistema de telegestión se basa en el control y administración a distancia de los puntos de luz, permitiendo manipular el flujo luminoso de las lámparas (reduciendo el gasto con el consumo de energía), verificar en tiempo real el estado en cada punto de luz (consumo, vida útil, puntos de no funcionamiento) y generar informes informando posibles problemas funcionales y daños causados a los componentes del sistema de iluminación, proceso de mantenimiento de fijación [17]. Por tales motivos, la implementación de sistemas de telegestión en alumbrado público supone una evolución importante en la administración y control de la iluminación, permitiendo una gestión más eficiente, cómoda y sostenible de la iluminación en espacios públicos y privados.

En este contexto, este artículo evalúa diferentes tecnologías y arquitecturas de telegestión y telecontrol integradas en sistemas de iluminación con el fin de mejorar la eficiencia energética, la fiabilidad y mantenimiento del sistema de alumbrado público en los sistemas de distribución eléctrica del Ecuador.

## II. ESTADO DEL ARTE DE LOS SISTEMAS DE TELEGESTIÓN EN ALUMBRADO PÚBLICO

Los sistemas de telegestión son herramientas esenciales para administrar, controlar y supervisar las redes de alumbrado público. Estos sistemas de telecomunicaciones permiten la gestión individual o grupal de lámparas, optimizando sus parámetros de operación [6], [18]. Este sistema facilita el acceso a la información sobre el estado de cada punto de iluminación, abarcando datos como consumo eléctrico, horas de funcionamiento, fallos y parámetros eléctricos. Además, se puede intervenir directamente en el control de las luminarias, permitiendo su encendido o apagado y la regulación del flujo luminoso, mejorando así la eficiencia del sistema de alumbrado [19]–[25]. Los sistemas de telegestión más utilizados operan mediante comunicación por cable (PLC, Power Line Communication) o por radiofrecuencia [6], [18].

### A. Comunicación por línea eléctrica (PLC)

Cuando se migra a un sistema de alumbrado público con control remoto, el mayor costo de infraestructura está asociado a la renovación del cableado que permite controlar las luminarias de la calle. A pesar de esto, gracias a la tecnología PLC [26], es posible controlar las lámparas utilizando las líneas eléctricas existentes, como se representa en la Fig. 1.

El sistema PLC facilita la integración de comunicaciones en las redes de alumbrado público de manera sencilla. Gracias a su naturaleza bidireccional, permite notificaciones de fallas en las lámparas y el monitoreo en tiempo real del consumo

energético, entre otras funciones. Aunque comparte con los sistemas inalámbricos la ventaja de no requerir nuevo cableado, el sistema PLC se ve afectado por ciertos factores, como las ramificaciones en las líneas, la atenuación de la señal y la interferencia de ruido [26]–[29].

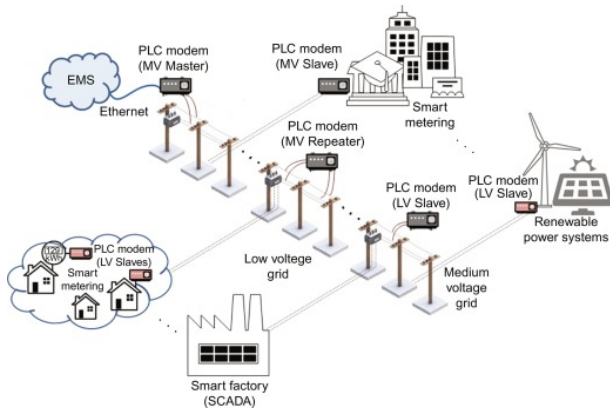


Fig. 1. Arquitectura de un sistema PLC.

Fuente: [27]

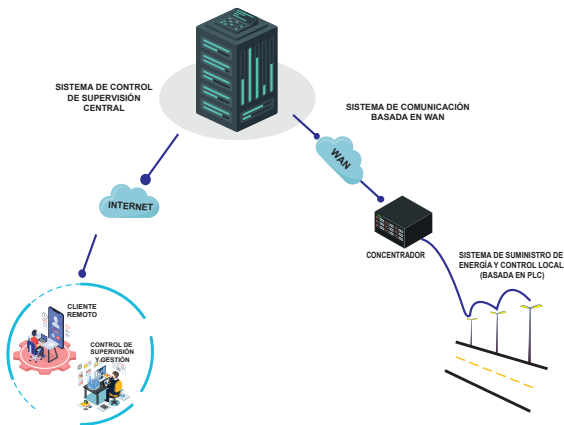


Fig. 2. Arquitectura 1 para el control y monitoreo de alumbrado público con sistema PLC.

Fuente: Propia del Autor (2023)

Los sistemas PLC se dividen en dos tipos: PLC de banda ancha y PLC de banda estrecha [30]. El PLC de banda ancha es adecuado como canal de comunicación para soluciones de hogares inteligentes y la creación de pequeñas redes LAN [26]–[30]. En contraste, el PLC de banda estrecha es apropiado para la adquisición remota de datos y la lectura automática de medidores (AMR) [26]–[30].

PLC de banda estrecha proporciona una solución simple para el control del alumbrado público. El estándar de banda estrecha G3-PLC brinda inmunidad al ruido y un rango de comunicación de hasta 6 millas cuando se cruzan transformadores de medio voltaje con una velocidad transmisión de hasta 150 kbps, mientras que el estándar de banda estrecha PRIME proporciona altas velocidades de datos de hasta 300 kbps [26].



Fig. 3. Arquitectura 2 para el control y monitoreo de alumbrado público con sistema PLC.

Fuente: Propia del Autor (2023)

Un sistema PLC para monitorear y controlar alumbrado público consta de tres segmentos principales: hardware, software y comunicación, tal como se muestra en las Figs. 2 y 3.

1) *Hardware y Comunicación:* El sistema se compone de dos tipos de dispositivos: un dispositivo principal y uno o más dispositivos secundarios. El dispositivo maestro consta de un controlador habilitado con módulo de comunicación que puede ser Wi-Fi, celular o comunicación por línea eléctrica, PLC con el fin de interactuar con el sistema de supervisión y control, mientras que con los esclavos se conecta mediante módulos de comunicación por línea eléctrica para el monitoreo y control de los mismos [31].

Los dispositivos secundarios se conectan directamente a los aparatos eléctricos, midiendo el voltaje, la corriente, la potencia y el factor de potencia, y enviando estos datos al dispositivo principal mediante comunicación por línea eléctrica. El usuario envía señales de control como ENCENDIDO/APAGADO desde el sistema de supervisión y control, el cual está conectado al dispositivo principal a través de un medio de comunicación. La señal de comando enviada por el usuario es transmitida por el dispositivo principal utilizando la comunicación por línea eléctrica. En el otro extremo, los dispositivos secundarios reciben la señal y, en consecuencia, el módulo de relé conecta el aparato eléctrico a la red. Al encender el aparato eléctrico, el dispositivo secundario captura los datos de corriente, voltaje, potencia y factor de potencia, y los transmite al dispositivo principal mediante Power Line Communication.

Finalmente, el dispositivo maestro recopila la información de los dispositivos esclavos y la envía al sistema de supervisión y control mediante un medio de comunicación, donde se realiza la visualización y el análisis de los datos.

2) *Software:* El sistema de software completo se divide generalmente en dos partes: (i) Flujo de control y (ii) Flujo de datos. El flujo de control permite acceder individualmente a los dispositivos conectados a través de un servidor web o una aplicación móvil. Por otro lado, el flujo de datos se utiliza para



monitorear el rendimiento de los dispositivos, proporcionando lecturas de voltaje, corriente, potencia y factor de potencia, entre otros datos permitidos por el usuario y las limitaciones del hardware. La aplicación web está vinculada a una base de datos, la cual se conecta a un servidor para almacenar los datos. El usuario puede alternar los interruptores de carga, ver estadísticas, analizar datos históricos y descargar estadísticas en un archivo para un análisis posterior o la generación de informes.

### B. Comunicación por Radio Frecuencia

La automatización del alumbrado público se realizó inicialmente con conexiones cableadas. Posteriormente, para reducir el coste del cable y facilitar la operación, se sustituye por la tecnología inalámbrica por medio de radio frecuencia. Hoy en día ZigBee [32], Bluetooth [33], LoRa [34], [35], Wi-Fi [3] se aplican como tecnologías para automatizar el sistema de alumbrado público de forma inalámbrica. Bluetooth y ZigBee tienen sus propias limitaciones. Bluetooth, un protocolo de comunicación inalámbrica de corto alcance, está limitado a un rango de 10 metros. Por otro lado, ZigBee, utilizado para redes de área personal, ofrece un alcance de hasta 200 metros con un bajo consumo de energía, siendo más económico que Wi-Fi. Wi-Fi, que se basa en los estándares IEEE 802.11, utiliza tecnología de red inalámbrica basada en protocolos de Internet. Los dispositivos habilitados para Wi-Fi operan en WLAN y puntos de acceso inalámbrico conectados a Internet. Wi-Fi funciona en las bandas de frecuencia industrial, científica y médica de 2.4 GHz (12 cm) y 5 GHz (6 cm), cubriendo un rango de hasta 100 metros. Además, Wi-Fi ofrece una mejor seguridad de datos en comparación con otras tecnologías de capa física [36]. Por último, LoRa es una tecnología LPWAN (Red de Largo Alcance de Bajo Consumo) que opera en bandas de frecuencia sin licencia, permitiendo una comunicación inalámbrica eficiente en términos de energía a distancias muy largas [37]–[39].

Por lo antes mencionado ZigBee, Bluetooth, LoRa y Wi-Fi son diferentes tecnologías de comunicación inalámbrica que pueden utilizarse para el control y monitoreo del alumbrado público. Cada una de ellas tiene sus propias características y ventajas, y la elección dependerá de las necesidades específicas del proyecto.

En la Tabla I se presentan algunas de las principales diferencias entre estas tecnologías en el contexto del alumbrado público [40].

Por lo tanto, la elección de la tecnología dependerá de las necesidades técnicas y comerciales específicas del proyecto de alumbrado público, incluido el alcance, el consumo de energía, la velocidad de datos y el presupuesto. En el contexto del alumbrado público, existen dos tecnologías con más aplicabilidad en este campo, por la gran información para el manejo y transmisión de datos, las cuales son ZigBee y Lora.

La Fig. 4 muestra la topología LoRa donde cada dispositivo se conecta a un radio base que almacena los datos en un servidor y a su vez puede enviar orden de control hacia los dispositivos.

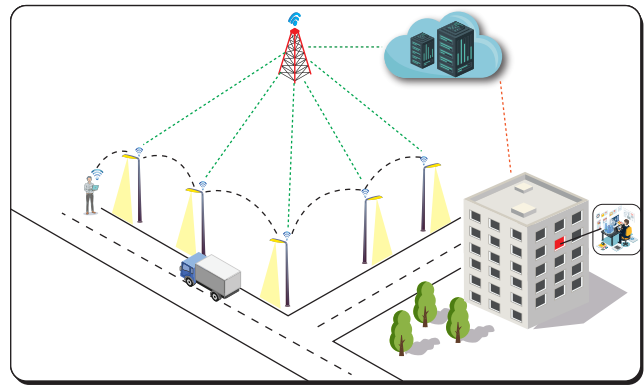


Fig. 4. Arquitectura mediante LoRa con red estrella para el control y monitoreo de alumbrado público.

Fuente: Propia del Autor (2023)

La Fig. 5 muestra la red malla con la que puede trabajar la topología LoRa (Fig. 5(a)) y ZigBee (Fig. 5(b)), donde cada dispositivo se comunican entre sí para aumentar el alcance de cobertura hasta llegar al concentrador de datos principal que transmite y almacena los datos en un servidor para el posterior monitoreo y control.

### C. Comunicación por red celular o satelital

Las redes celulares son extremadamente comunes y omnipresentes en la infraestructura mundial de telecomunicaciones. Se consideran una solución rápida para vincular la infraestructura de iluminación a una red central y un centro de control [41]. GPRS, 3G, 4G, 4G/LTE y 5G son ejemplos de tecnología celular [41], [42].

Las tecnologías celulares tienen la ventaja de tener el mayor alcance de comunicación en comparación con otras tecnologías [42], [43] con una distancia de 35 km y una velocidad de transmisión de 9.6 Kbps.

Para lugares al aire libre, Sistema de Posicionamiento Global (GPS) se ha utilizado debido a la precisión de este tipo de posicionamiento [44], [45].

En este contexto, el principio fundamental de funcionamiento se basa en la transmisión y recepción de información a través de la red GPRS, GPS y GSM a un servidor físico incorporado, conectado de una forma u otra a la red de Internet y recibiendo datos de posición y hora exacta del sistema de navegación GPS [41]–[46].

Este modelo está estructurado mediante un módulo de comunicación GSM-GPRS o GPS. El módulo GPRS tiene acceso a Internet lo que permite conectar a los dispositivos y transmitir los datos mediante la red celular. Mientras que el módulo GPS trabaja de manera parecida solo que comunica los dispositivos mediante la red satelital. Todos los datos son almacenados en una nube y enviados a un servidor para el posterior análisis y control de los datos [41]–[46].

TABLA I  
COMPARACIÓN ENTRE LAS PRINCIPALES TECNOLOGÍAS DE COMUNICACIÓN POR RADIO FRECUENCIA.

Tecnología de Comunicación	Rango de Cobertura	Consumo de Energía	Velocidad de Transmisión	Frecuencia y Alcance	Costo de Implementación	Topología de Red	Seguridad
ZigBee	Rango de cobertura moderado. Adecuado para aplicaciones en áreas relativamente pequeñas.	Consumo de energía eficiente. Adecuado para dispositivos de bajo consumo.	Velocidades de datos moderadas, adecuadas para aplicaciones de control y monitoreo, generalmente de 20-250 kbps.	Opera en frecuencias de 2.4 GHz o 900 MHz, dependiendo de la región, con un alcance de 10-100 metros.	Suele ser más económico que Wi-Fi o Bluetooth en términos de hardware, pero los costos pueden variar según la implementación específica.	Utiliza una topología de malla, lo que significa que los dispositivos pueden actuar como enrutadores y extender la red. Esto permite una mayor robustez y alcance.	Ofrecen opciones de seguridad robustas, pero la implementación y configuración adecuadas son fundamentales para garantizar la protección de datos.
Bluetooth	Rango de cobertura corto. Adecuado para aplicaciones de control en proximidad.	Eficiente en consumo de energía en las últimas versiones de Bluetooth (Bluetooth Low Energy o BLE).	Velocidades de datos relativamente altas en comparación con ZigBee, lo que lo hace adecuado para aplicaciones que requieren transmisiones de datos más rápidas, hasta 1-3 Mbps en Bluetooth 5.	Opera en la bande de 2.4 GHz y tiene un alcance de aproximadamente 100 metros en su versión clásica y hasta 300 metros en Bluetooth 5.	Económico, especialmente en aplicaciones de corto alcance.	Principalmente usa una topología estrella o punto a punto, adecuada para aplicaciones de corto alcance con dispositivos emparejados.	Ofrecen opciones de seguridad robustas, pero la implementación y configuración adecuadas son fundamentales para garantizar la protección de datos.
LoRa	Rango de cobertura extremadamente amplio. Ideal para áreas extensas.	Muy eficiente en consumo de energía, lo que permite una larga duración de la batería en dispositivos alimentados por batería.	Velocidades de datos bajas a moderadas, generalmente en el rango de 0.3-50 kbps, pero su ventaja radica en su capacidad para transmitir datos a larga distancia.	Opera en frecuencias ISM (Industrial, Scientific and Medical) en rangos de 433 MHz, 868 MHz o 915 MHz, con largo alcance desde 5 hasta 30 kilómetros.	La infraestructura LoRa puede ser costosa de implementar, pero puede ser rentable a largo plazo debido a su eficiencia energética y alcance.	Utiliza una topología de estrella, donde los nodos transmiten directamente a una estación base. Puede ser extendida con repetidores para aumentar el alcance. Además puede trabajar en topología malla tal como la topología ZigBee.	La seguridad suele implementarse a nivel de aplicación, lo que significa que la seguridad depende en gran medida de cómo se configure y se implemente en la aplicación específica.
Wi-Fi	Rango de cobertura moderado a largo, dependiendo de la configuración de la red.	Consumo de energía más alto en comparación con las otras tecnologías.	Velocidades de datos muy altas, desde 600 Mbps a varios Gbps, dependiendo de la norma y la configuración, ideales para aplicaciones que requieren transmisiones de datos intensivas, pero su consumo de energía es mayor.	Utiliza principalmente 2.4 GHz o 5 GHz con un alcance típico de 30-100 metros, aunque se pueden utilizar antenas y equipos especiales para extender el alcance.	Costosa en términos de infraestructura y consumo de energía en comparación con las otras tecnologías.	Generalmente emplea una topología de estrella o de infraestructura con un punto de acceso central.	Ofrecen opciones de seguridad robustas, pero la implementación y configuración adecuadas son fundamentales para garantizar la protección de datos.

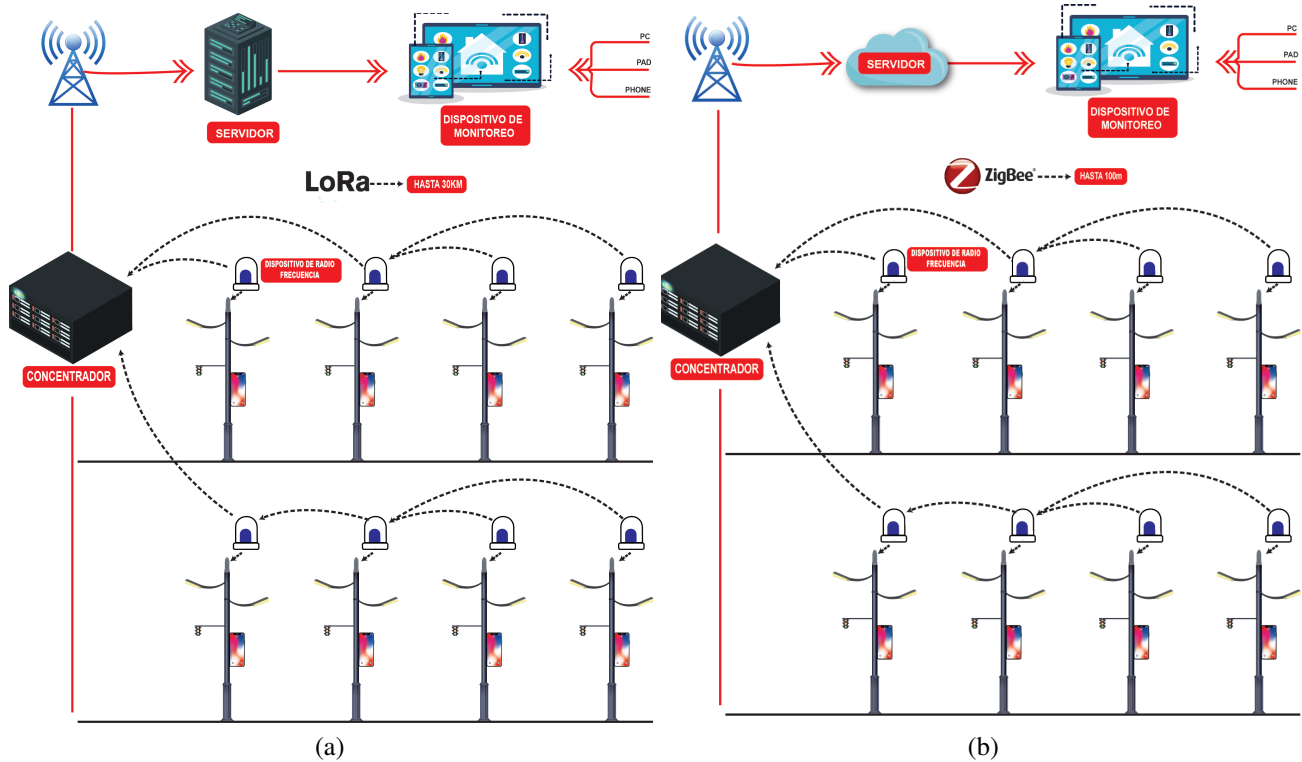


Fig. 5. Arquitectura mediante con topología malla para el control y monitoreo de alumbrado. (a) LoRa; (b) ZigBee

Fuente: Propia del Autor (2023)

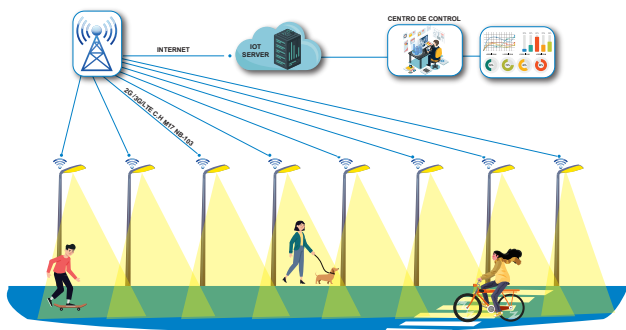


Fig. 6. Gestión y supervisión de alumbrado mediante redes de comunicación celular.

Fuente: Propia del Autor (2023)

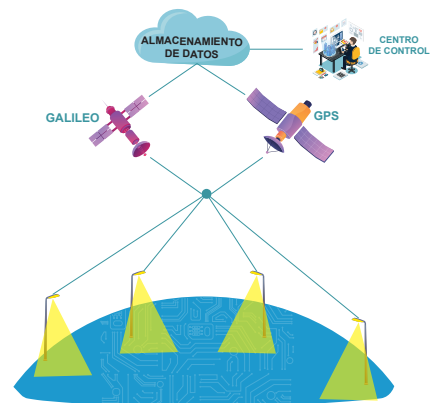


Fig. 7. Control y supervisión del alumbrado utilizando redes satelitales para la comunicación.

Fuente: Propia del Autor (2023)

### III. ARQUITECTURA IoT PARA LA GESTIÓN Y SUPERVISIÓN DE SISTEMAS DE ILUMINACIÓN PÚBLICA INTELIGENTE

De acuerdo con la Fig. 8, un sistema típico de gestión del alumbrado se compone de tres elementos fundamentales: luminarias inteligentes, una red de comunicaciones y un sistema de control en un centro remoto. Estos sistemas son aplicables en diversas áreas de las ciudades inteligentes. [47], [48].

La implementación de sistemas IoT en redes inteligentes permite reducir los costos de mantenimiento, ya que proporcionan información en tiempo real sobre el estado operativo

en una ubicación centralizada, eliminando la necesidad de rondas de inspección rutinarias por parte de los técnicos. Además, los costos operativos pueden disminuirse mediante la adopción de estrategias de control dinámico que se ajusten a las necesidades de iluminación, minimizando así el consumo de energía.

Como se ilustra en la Fig. 9, las diversas configuraciones de sistemas de gestión de alumbrado público presentadas en la

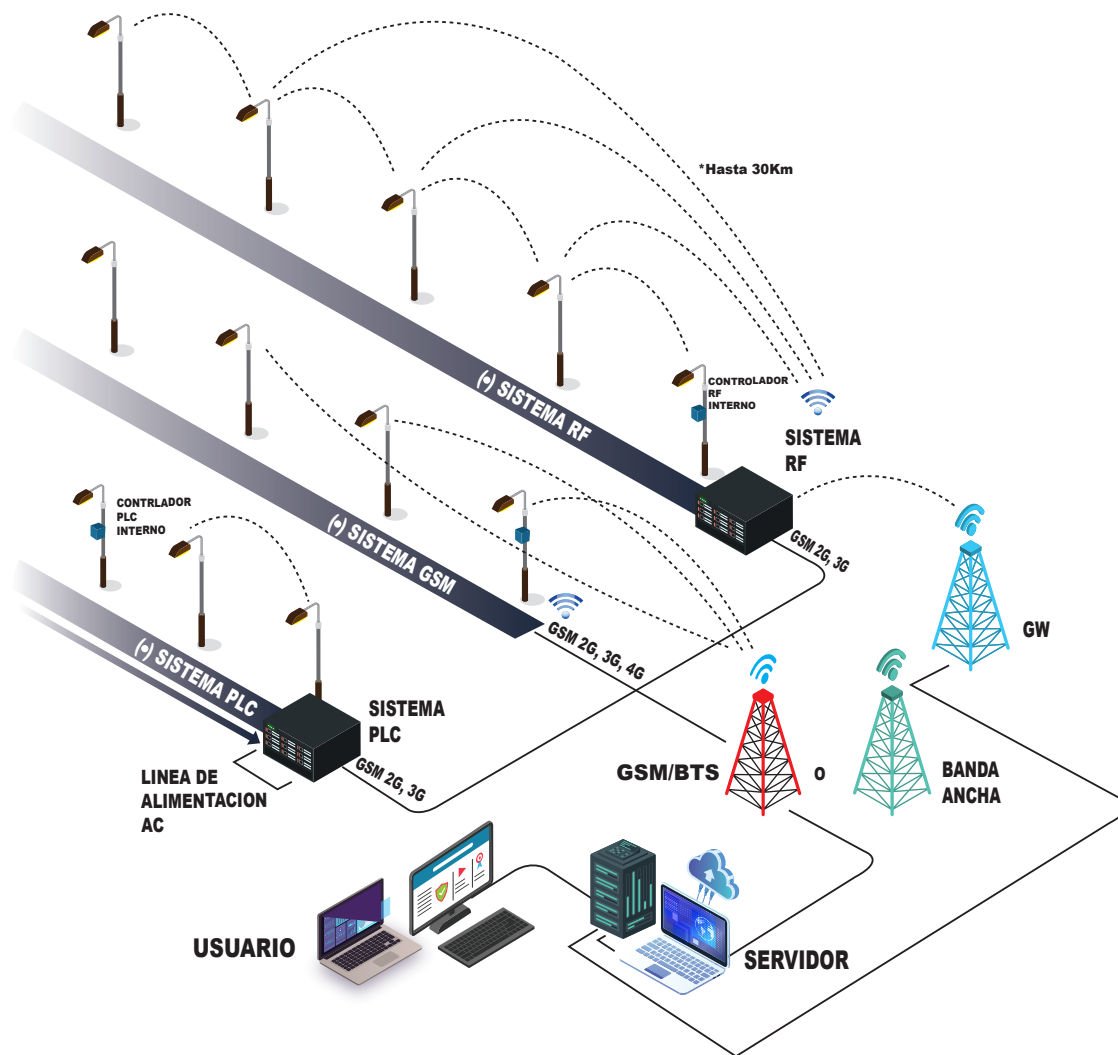


Fig. 8. Elementos típicos de un sistema de gestión de alumbrado público.  
 Fuente: Propia del Autor (2023)

literatura se pueden analizar en el contexto de la arquitectura IoT de 3 niveles. Estos sistemas IoT se dividen en tres capas: Aplicación, Comunicación, Percepción y Control. [49].

En la parte inferior están las “Cosas” o luminarias. Los dispositivos electrónicos para sensar y de controlar se encuentran en la capa de percepción y control, que sería el nivel 1. Estos dispositivos se encargan de recopilar datos como la densidad del tráfico, luz, temperatura, etc, y ajustar la salida de iluminación de la luminaria [48]. El propósito del nivel de comunicación (nivel 2) es ofrecer un intercambio seguro de datos entre el nivel de percepción y control y el nivel de aplicación. Para permitir la comunicación a través de Internet, o una red de enlace de datos propia, el diseñador del sistema debe seleccionar la mejor tecnología e infraestructura. El tercer nivel integra una plataforma computacional que permite la ejecución de algoritmos esenciales para ofrecer servicios específicos. Este sistema puede ser controlado de

forma remota utilizando la infraestructura en la nube o un centro de datos propio. La interacción con los usuarios se facilita mediante interfaces gráficas (GUI) proporcionadas por el nivel de aplicación [50]. En los sistemas de gestión de alumbrado público, este nivel de aplicación típicamente incluye servicios complementarios, además de los servicios de iluminación eficientes que se esperan [48].

#### A. Nivel Cero: “Cosas”

El término “Cosas” abarca todos los dispositivos periféricos que forman parte de un sistema de alumbrado, los cuales incluyen principalmente luminarias de diversas tecnologías, como LED, sodio o vapor de mercurio, que son monitoreadas y controladas. En este nivel, también es posible integrar fuentes de energía renovable, como paneles solares y turbinas eólicas, para complementar el funcionamiento de las luminarias.



Fig. 9. Estructura para sistema de gestión de alumbrado público basado en IoT

Fuente: Propia del Autor (2023)

El uso de energía renovable generada localmente para reducir la dependencia de la red eléctrica en el alumbrado público ha ganado relevancia en la investigación [51]. No obstante, los elevados costos iniciales de los sistemas solares fotovoltaicos y eólicos aún limitan su adopción a gran escala. A medida que los precios de estas tecnologías sigan disminuyendo, es probable que su implementación en el alumbrado público se vuelva más común.

### B. Nivel uno: Percepción y Control

Los sensores para recopilar los datos de las variables de entrada y salidas para gestionar y controlar el sistema de alumbrado público comprenden la capa de percepción y control. Los sensores se eligen en función de las necesidades de la aplicación. Como se muestra en la Fig. 10, las variables de entrada del sensor se pueden dividir en las categorías de datos ambientales, tiempo, ocupación y energía. Los actuadores se utilizan principalmente para atenuar o encender/apagar luces [52]. Además, los sistemas inteligentes de alumbrado público utilizan tres métodos de atenuación para el control: modulación de ancho de pulso (PWM), señales de voltaje de entrada (0–10 V) e interfaz de iluminación direccionable digital (DALI).

### C. Nivel dos: Comunicación

La capa de comunicación, como se observa en la Fig. 11, se organiza en tecnologías de corto y largo alcance. Junto con la infraestructura de red, esta capa también abarca las medidas de ciberseguridad, indispensables para garantizar la protección y el funcionamiento seguro de los sistemas de alumbrado público inteligente.

Las numerosas tecnologías de comunicación empleadas en la literatura pueden clasificarse como de corto o largo alcance [48], [52]. Las redes celulares/GPS y las redes de

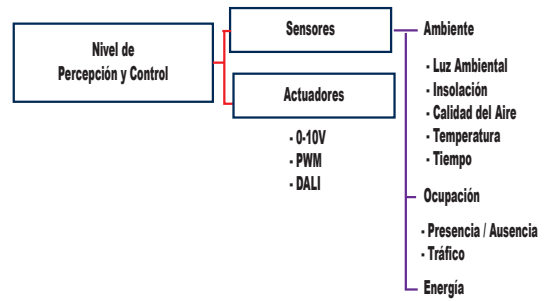


Fig. 10. Estructura y clasificación de la capa de percepción y control.

Fuente: Propia del Autor (2023)

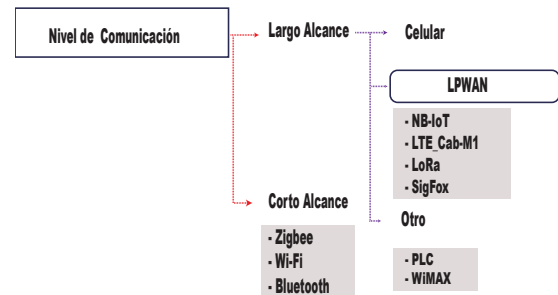


Fig. 11. Estructura y clasificación de la capa de comunicación.

Fuente: Propia del Autor (2023)

área amplia de baja potencia (LPWAN) se encuentran entre otras tecnologías como WiMAX y PLC que son ejemplos de tecnologías de comunicación de largo alcance utilizadas en sistemas inteligentes de alumbrado público.

Las redes celulares/GPS son extremadamente comunes y omnipresentes. Se considera como uno de las soluciones más prácticas para vincular la infraestructura de iluminación a una red central y un centro de control, debido a que la infraestructura de telecomunicaciones se encuentra ya implementada [41]. Tecnologías celulares como GPRS, 3G, 4G, 4G/LTE y 5G son algunos ejemplos de opciones disponibles para la comunicación. En contraste, las comunicaciones de largo alcance se pueden implementar mediante LPWAN, una red diseñada para ofrecer alta fiabilidad, bajo costo, capacidad de autorreparación y eficiencia energética [52]. Entre las LPWAN utilizadas en los sistemas de alumbrado público inteligente se encuentran SigFox, NB-IoT, LoRa y LTE-Cat-M1.

La tecnología LoRa, de largo alcance, emplea una modulación de espectro ensanchado en la capa física, que facilita comunicaciones de baja velocidad a largas distancias con un consumo energético muy bajo, como se mencionó en la Sección III. SigFox, aunque limitado en términos de velocidad de datos, sobresale por su alta resistencia al ruido y su capacidad de cubrir grandes áreas [55], [56]. NB-IoT, específicamente diseñado para redes LPWAN en entornos celulares, asegura una implementación eficiente de estos sistemas [53], [54], [62]. Tanto LTE-Cat-M1 como NB-IoT ofrecen una

TABLA II  
CARACTERÍSTICAS DE LAS TECNOLOGÍAS DE LA COMUNICACIÓN

Tecnología	Rango	Velocidad de datos	Referencia
Tecnologías de Larga Distancia			
NB-IoT	10 Km	250 Kbps	[53], [54]
GPRS	35 Km	9.6 Kbps	[41], [42]
PLC	1.2 km	500 Mbps	[26], [27]
SigFox	40 Km rural, 10 Km urbano	600 a 100 bps	[55], [56]
LoRa	15 Km rural, 5 Km urbano	hasta 21.9 Kbps	[34], [35]
WiMAX	480 Km	74 a 100 Mbps	[57], [58]
Tecnologías de Corta Distancia			
ZigBee	20 a 80 m	20 a 250 Kbps	[59]
Bluetooth Low Energy	100 m	1 a 3 Mbps	[60], [61]
Wi-Fi	100 m	2 a 600 Mbps	[57]

extensa cobertura, bajo consumo de energía, costos reducidos y seguridad avanzada, lo que les permite gestionar hasta 100 mil conexiones simultáneas en un único sector dentro de los sistemas inteligentes de alumbrado público [55].

WiMAX (Interoperabilidad Mundial para Acceso por Microondas) se asemeja a Wi-Fi (Fidelidad Inalámbrica) en muchos aspectos, pero ofrece mayores velocidades de conexión y una cobertura más amplia, permitiendo servir a un mayor número de usuarios. En áreas rurales donde la cobertura 3G es deficiente, se sugiere optar por WiMAX debido a sus ventajas. [58].

La tecnología PLC fue ampliamente adoptada en su momento para los sistemas de control de alumbrado público. Para lograr la comunicación a través de las líneas eléctricas, se utiliza una técnica de modulación conocida como desplazamiento de frecuencia modificado (FSK) [63]. Banda estrecha, banda ancha y banda ultraestrecha son los tres tipos de PLC, los cuales normalmente no se recomienda utilizar en los sistemas inteligentes de alumbrado público debido a sus bajas velocidades de datos y rango de cobertura. Sin embargo, dado que el PLC de banda estrecha tiene un alcance mayor es el que comúnmente se utiliza en los sistemas inteligentes de alumbrado público [63].

En las investigaciones sobre sistemas avanzados de alumbrado público, ZigBee se destaca como la tecnología de comunicación más utilizada para distancias cortas [42]. Las lámparas están interconectadas a través de una red en malla ZigBee que se enlaza con un controlador o un concentrador de datos de iluminación pública [50], permitiendo la comunicación entre los nodos de iluminación. ZigBee, sin necesidad de licencias, es especialmente útil en zonas sin cobertura móvil [59]. Las redes en malla ZigBee experimentan menos problemas de alcance y son más eficientes en el ajuste en tiempo real de la intensidad luminosa [55]. Aunque los sistemas de iluminación pública inteligentes funcionan mejor con una red privada en topología de malla, esto puede representar retos adicionales para la infraestructura de telecomunicaciones [59].

Wi-Fi y Bluetooth son dos tecnologías adicionales para la comunicación a distancias reducidas. Bluetooth 5 puede

ser una solución efectiva para la gestión de sistemas de iluminación pública, proporcionando conectividad a corta distancia [60], [61]. En la literatura, Wi-Fi se emplea en pocas aplicaciones, aunque puede ser una opción excelente para proyectos de IoT [57].

Las características de diferentes métodos de comunicación se detallan en la Tabla II. Aunque las tecnologías celulares y WiMAX tienen la ventaja de un alcance de comunicación extenso, WiMAX es costoso de implementar debido a la necesidad de nueva infraestructura. LPWAN, por el contrario, es más económico y eficiente en términos de energía. PLC sufre de problemas de interferencia de señal, mientras que ZigBee generalmente no enfrenta problemas de cobertura. A pesar de que Wi-Fi consume más energía en comparación con otras tecnologías inalámbricas de corto alcance, es ampliamente accesible. Bluetooth, con una velocidad de datos moderada, es adecuado para aplicaciones de comunicación a corta distancia.

#### D. Nivel tres: Aplicación

La capa de aplicación tiene la responsabilidad de ofrecer servicios a los usuarios. Entre sus funciones esenciales, los sistemas de alumbrado público proporcionan iluminación eficiente en términos de energía para carreteras, senderos y comunidades. Estos servicios, junto con otros, se entregan a través de Internet o enlaces de datos dedicados, empleando principalmente computadoras remotas que operan mediante programas de monitoreo y control. Además, se está desarrollando una investigación coordinada para diseñar y probar diversos métodos que permitan ofrecer estas aplicaciones. La Fig. 12 presenta una clasificación de los aspectos relacionados con la capa de aplicación.

## IV. ARQUITECTURA PROPUESTA PARA EL SISTEMA DE TELEGESTIÓN

A continuación se realiza el análisis de las opciones y tendencias tecnológicas por capa del marco arquitectónico:

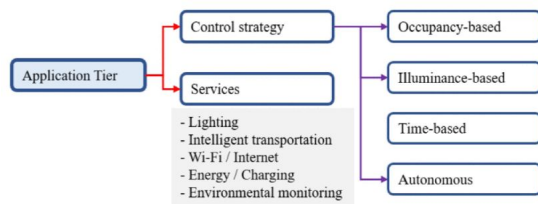


Fig. 12. Estructura y clasificación de la capa de aplicación.

Fuente: Propia del Autor (2023)

### A. Nivel Cero: “Cosas”

La principal tendencia actual en los sistemas de alumbrado público es modernizar las luminarias tradicionales con LED modernos para minimizar el consumo de energía y ofrecer luminarias más duraderas, reduciendo así los costos de mantenimiento.

El alumbrado público inteligente aprovecha energías renovables, como la solar, para minimizar su dependencia de la red eléctrica convencional. Actualmente, la energía solar no es económicamente viable para una amplia gama de aplicaciones, incluido el alumbrado público, según diversas investigaciones. No obstante, se proyecta que esta realidad cambie en el futuro cercano, a medida que los costos de los sistemas solares fotovoltaicos continúan reduciéndose.

El alumbrado público solar puede ser autónomo o estar conectado a un parque solar centralizado. Sin embargo, las luces solares independientes no son viables en muchas situaciones. Los postes de alumbrado están diseñados para soportar el peso de las luminarias actuales, y agregar paneles solares incrementa el peso y la resistencia al viento, lo que aumenta el riesgo de caída de los postes. Además, las sombras de árboles y edificios pueden impedir una carga adecuada de las baterías, y estos sistemas requieren mantenimiento regular y son susceptibles al robo. Por el contrario, un parque solar centralizado puede evitar estos problemas.

### B. Nivel uno: Percepción y Control

1) *Sensores: Medio Ambiente:* De acuerdo con la literatura [64], estos sensores no solo monitorean factores ambientales para ajustar la iluminación, sino que también brindan servicios adicionales. La función principal de un sensor de resistencia dependiente de la luz (LDR) es activar o desactivar las luminarias en función de la cantidad de luz solar disponible [65]. La resistencia del LDR varía según la intensidad de la luz solar. Los sistemas S-PLS emplean estos sensores para recopilar datos sobre los niveles de luz ambiental [55], [65]. Sin embargo, su rendimiento puede verse comprometido por la acumulación de polvo en su superficie.

En los sistemas de alumbrado público inteligentes, las variables ambientales juegan un papel crucial en la optimización de la iluminación [66], [67]. Por ejemplo, la presencia de niebla puede requerir el encendido de las luminarias durante el día o el aumento de su brillo en la noche. La detección de gases peligrosos, como el monóxido de carbono y el dióxido de azufre, se realiza mediante la atenuación de la luz infrarroja

[68]. De manera similar, los sensores de humo utilizan la dispersión de radiación infrarroja en lugar de la atenuación [69], [70]. Los sensores LDR, cuya resistencia cambia con la intensidad de la luz solar, son empleados en los sistemas S-PLS para evaluar los niveles de luz ambiental.

Adicionalmente, los sistemas de alumbrado inteligente están equipados con sensores de temperatura y humedad, proporcionando funcionalidades extra [1], [64].

2) *Sensores: Ocupación:* Los sistemas inteligentes de alumbrado público emplean sensores infrarrojos pasivos (PIR) para detectar la presencia, la ocupación y realizar recuentos de objetos en movimiento. Estos sensores pueden configurarse para responder únicamente al calor emitido por objetos específicos, como peatones, animales o ciclistas, y son capaces de funcionar bien bajo diferentes condiciones climáticas. Sin embargo, no son recomendables para carreteras con tráfico rápido y denso, debido a sus limitaciones en la velocidad de escaneo y posibles interferencias. En tales situaciones, las cámaras inteligentes ofrecen una solución más eficiente.

Las cámaras inteligentes, aunque son complicadas y difíciles de implementar, ofrecen una solución para la detección de vehículos en carreteras de alta velocidad. Sin embargo, su efectividad puede verse afectada por diversos factores como la forma del objeto, la iluminación y el fondo.

Por otro lado, los sensores PIR y ultrasónicos tienen la ventaja de medir características como la distancia de forma inmediata, eliminando la necesidad de cálculos adicionales.

Una de las principales ventajas de los magnetómetros es su resistencia a condiciones climáticas extremas, como la lluvia, la niebla y la nieve, lo que los convierte en una herramienta valiosa para el conteo de vehículos [71]. Tanto los magnetómetros como los acelerómetros ofrecen un seguimiento preciso del movimiento vehicular en las carreteras, pero no son capaces de detectar la ocupación de personas estáticas, ya que requieren movimiento para recopilar datos. La instalación de estos sensores, que se realiza bajo o sobre la calzada, es compleja y los expone a posibles daños debido a su método de montaje.

3) *Sensores: Energía:* Los sistemas inteligentes de alumbrado público monitorean el voltaje y la corriente para medir la demanda energética y la generación en situaciones específicas [1], [58]. Para la medición de corriente, se emplea un sensor de efecto Hall junto con un transformador de corriente, que transforman la corriente en una señal de voltaje proporcional [40]. Asimismo, las luminarias pueden ser gestionadas a través de sensores de voltaje, que permiten su encendido y apagado [72].

### C. Nivel dos: Comunicación

WiMAX y las redes celulares, como 3G, NB-IoT y 4G, se caracterizan por su baja latencia, es decir, un mínimo retraso en la transmisión de datos, lo que las convierte en soluciones óptimas para la regulación dinámica de luminarias. No obstante, la incompatibilidad de WiMAX con las redes celulares aumenta los costos de configuración, ya que exige la instalación de estaciones base adicionales y especializadas.

Las redes SigFox, bajo control exclusivo de la empresa SigFox, enfrentan problemas de costos similares a los de las redes celulares. Además, están sujetas a estrictas limitaciones de transmisión de datos, permitiendo solo 140 mensajes ascendentes y 4 descendentes por día [73]. Por otro lado, LoRa ofrece la ventaja de ser propiedad privada del operador del sistema de alumbrado público, lo que resulta en una reducción significativa de los costos operativos tras la instalación de la red. Las puertas de enlace LoRaWAN pueden distribuirse ampliamente para mejorar la cobertura. Aunque SigFox y LoRa enfrentan desafíos de cobertura comparables a los de las redes celulares, las puertas de enlace LoRa son más fáciles de reubicar que las estaciones base celulares.

El sistema PLC, bien establecido en la comunicación, aprovecha las líneas eléctricas ya instaladas como infraestructura, lo que representa una ventaja significativa. No obstante, sufre de sensibilidad a interferencias en su banda de frecuencia [74]. Esta limitación impide que PLC pueda manejar eficientemente la creciente demanda de dispositivos IoT, lo que sugiere que, desde un punto de vista técnico, no es la opción más adecuada para los futuros sistemas inteligentes de alumbrado público.

La elección de la tecnología de comunicación puede afectar significativamente la infraestructura de la red de comunicación. En sistemas inteligentes de alumbrado público con un gran número de luminarias que necesitan ser controladas centralizadamente por un único controlador, el autor considera que una disposición en red con concentradores de datos es la mejor opción.

Aunque la ciberseguridad de los sistemas inteligentes de alumbrado público ha sido poco tratada en la literatura, es crucial abordar numerosas preocupaciones de seguridad al diseñar una infraestructura de este tipo [53], [75]. Las vulnerabilidades posibles en el centro de control remoto incluyen el secuestro de sesión, la falsificación de solicitudes entre sitios, el secuestro de clics, la exposición de IP privada y la divulgación de rutas. Algunos protocolos de comunicación incorporan medidas de seguridad adicionales, como el cifrado de extremo a extremo en LoRa y el salto de frecuencia en ZigBee.

#### D. Nivel tres: Aplicación

La investigación actual se enfoca en el desarrollo de estrategias de control híbridas, que superan la dependencia exclusiva de métodos basados en el tiempo o el tráfico. La tecnología de detección utilizada juega un papel fundamental en las decisiones de diseño del nivel de aplicación. Por ejemplo, la detección de ocupación puede influir en los métodos de control basados en el tiempo, ajustando la iluminación según la densidad del tráfico. Asimismo, la iluminación ambiental puede determinar los parámetros de control temporal. Del mismo modo, el sistema puede adaptarse a las condiciones climáticas, permitiendo, por ejemplo, atenuar automáticamente las luces en situaciones de niebla. Además, el sistema también puede ofrecer servicios esenciales de vigilancia ambiental, monitoreando la concentración de gases nocivos en el aire.

#### E. Infraestructura de Alumbrado Público Final en Ecuador

De acuerdo con la infraestructura de alumbrado instalada actualmente en las redes de distribución del Ecuador, la mejor opción para implementar un sistema inteligente de alumbrado público que integre un cantidad extensa de luminarias es la tecnología por radio frecuencia de largo alcance.

Entre las tecnologías inalámbricas abordadas en el presente artículo, la tecnología RF LoRa ofrece una solución confiable y eficiente para abordar los desafíos de controlar una amplia red de luminarias en una zona urbana extensa y diversa. Su capacidad para transmitir datos a larga distancia con un bajo consumo de energía y una alta resistencia a las interferencias lo convierte en el medio ideal para una gestión eficaz y centralizada del alumbrado público.

La tecnología RF LoRa permite la comunicación para control y monitoreo de equipos a kilómetros de distancia. Con el monitoreo es factible la medición de voltaje, corriente y factor de potencia eléctrica; así también, la información de eventos como cortes de energía y sobrecorriente de cargas.

La Fig. 13 muestra la arquitectura escogida para la implementación del centro de control de Alumbrado Público aplicando telegestión mediante enlaces inalámbricos basados en LoRa (tecnología de comunicación inalámbrica de largo alcance y bajo consumo energético) y dispositivos IoT (luminarias con sistema de monitoreo y control).

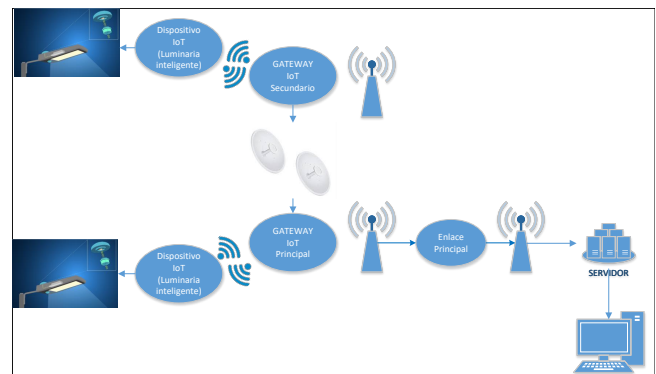


Fig. 13. Diagrama de Bloques de Infraestructura Final.

Fuente: Propia del Autor (2023)

La arquitectura escogida consta de las siguientes partes:

- **Dispositivos IoT (Luminarias Inteligentes):** Son aquellos dispositivos finales que permiten el encendido o apagado de luminarias, así también recopilar variables como la Intensidad de la luz, Voltaje, Potencia, entre otros.
- **Gateway IoT secundario:** Son aquellos dispositivos que actúan como un intermediario entre los dispositivos IoT y la red de comunicación principal. La implementación de gateways secundarios ayuda a mejorar la escalabilidad, la eficiencia y la gestión de la red IoT, especialmente cuando se manejan grandes volúmenes de datos o cuando los dispositivos IoT están distribuidos en diferentes ubicaciones geográficas. Cada nivel de gateway puede agregar una capa adicional de procesamiento, filtrado y seguridad antes de que los datos lleguen al destino final.



- Gateway IoT principal: Es un dispositivo o software que actúa como el punto central de conexión entre los dispositivos IoT y la infraestructura de red más amplia, como la nube o un servidor central. Por lo tanto, facilita la conectividad, la gestión y la transmisión eficiente de datos desde los dispositivos IoT hasta la infraestructura central, lo que permite un funcionamiento integrado y eficaz del sistema en su conjunto.
- Enlace de comunicación principal: Se refiere a una conexión de comunicación que se establece con o sin la necesidad de cables físicos. En el caso del uso de un medio alámbrico se realiza mediante fibra óptica. Los enlaces por fibra óptica se utilizan ampliamente en diversas aplicaciones, como las redes de telecomunicaciones, la transmisión de datos a larga distancia, la conexión a Internet de alta velocidad, la transmisión de video de alta definición y aplicaciones industriales que requieren una comunicación rápida y confiable. Estos enlaces ofrecen ventajas clave, como la inmunidad a las interferencias electromagnéticas, la resistencia a la degradación de la señal a larga distancia y una mayor capacidad de ancho de banda en comparación con las conexiones de cobre. Otra opción en lugar de utilizar cables, se emplean tecnologías de transmisión de señales a través del aire, permitiendo la comunicación inalámbrica entre dispositivos electrónicos. Los enlaces de comunicación inalámbricos ofrecen flexibilidad y movilidad, lo que los hace ideales para muchas aplicaciones, como internet inalámbrico, transmisión de datos, control remoto, seguimiento de objetos, sensores inalámbricos y mucho más. Sin embargo, también pueden estar sujetos a limitaciones de alcance, interferencia y seguridad, que deben ser consideradas al implementar y utilizar estas tecnologías.
- Servidor (Centro de datos): Es un tipo de computadora o sistema informático que proporciona servicios, recursos o datos a otras computadoras o dispositivos, conocidos como clientes, a través de una red. El término "servidor" puede referirse tanto al hardware físico como al software que se ejecuta en ese hardware para proporcionar los servicios. Los servidores pueden estar ubicados en centros de datos especializados y mantenerse en funcionamiento las 24 horas del día, los 7 días de la semana, para garantizar la disponibilidad y la accesibilidad de los servicios que ofrecen. Además, los servidores están diseñados para manejar múltiples solicitudes y conexiones simultáneas de los clientes y proporcionarles los recursos que necesitan para cumplir con sus funciones.
- Aplicación final: Es una plataforma que permite a los usuarios monitorear, controlar y analizar datos provenientes de múltiples dispositivos IoT de manera centralizada, teniendo como objetivo brindar una solución completa para la administración eficiente y segura de datos de dispositivos IoT en tiempo real.

De acuerdo con la infraestructura de telecomunicaciones actual en las redes de distribución, el enlace principal entre

el gateway principal (concentrador de datos) y el centro de control (centro de datos) puede ser de dos formas, inalámbrico mediante tecnología RF LoRa o alámbrico mediante enlaces de fibra óptica, tal como se presenta en la Fig. 14.

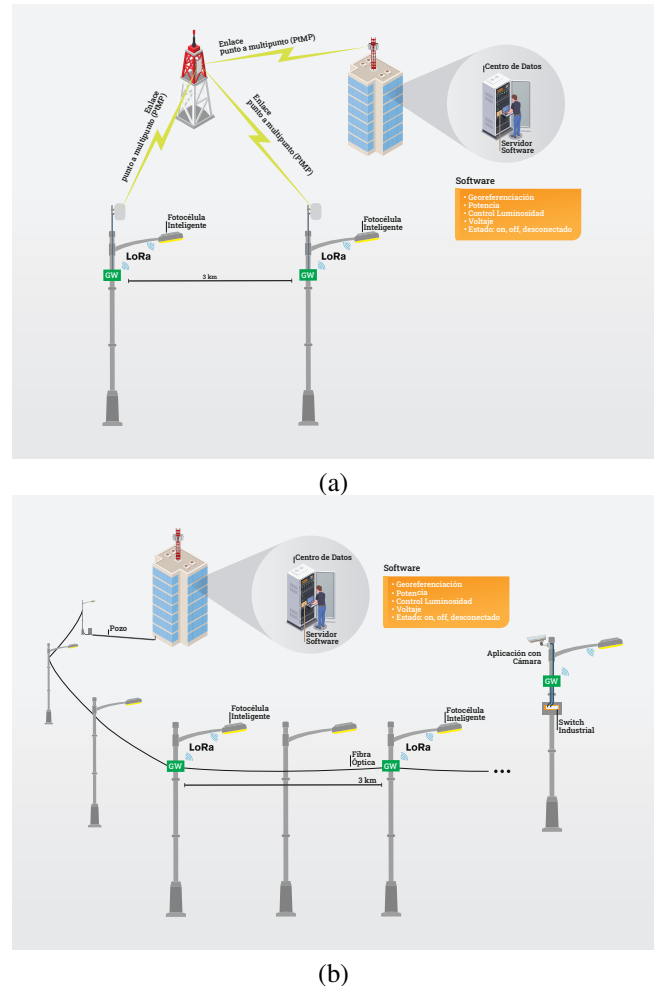


Fig. 14. Infraestructura Final para la implementación de un sistema inteligente de alumbrado público. (a) Enlace principal Inalámbrico; (b) Enlace principal Alámbrico

Fuente: Propia del Autor (2023)

## V. CONCLUSIONES

El marco arquitectónico de IoT de 3 capas proporciona un medio simple pero adecuado para analizar las tecnologías aplicadas en la gestión de sistemas de alumbrado público inteligente. Por lo tanto, el análisis de este artículo ha simplificado el diseño de una infraestructura en un ejercicio de optimización para seleccionar las tecnologías y técnicas más adecuadas de acuerdo con la actualidad del alumbrado público en las redes de distribución del Ecuador.

La implementación de un sistema de gestión inteligente de alumbrado público a través de la tecnología LoRa representa una solución innovadora que ofrece beneficios significativos, como la reducción del consumo de energía, el ahorro económico, la mejora en la calidad de vida de los ciudadanos, el mantenimiento proactivo y la recopilación de datos para la

toma de decisiones informadas, además de la transmisión de datos a larga distancia. Esta propuesta se alinea con la visión de ciudades inteligentes y sostenibles, y su implementación requerirá una cuidadosa planificación y una inversión inicial, pero promete una mejora significativa en la eficiencia y la sostenibilidad de la iluminación urbana.

En resumen, la propuesta de un sistema de gestión inteligente de alumbrado público mediante tecnología LoRa, junto con enlaces eficientes al centro de control, representa una solución holística y avanzada para la optimización de la iluminación urbana. La combinación de la tecnología LoRa para el control y la monitorización de las luminarias con enlaces de comunicación efectivos al centro de control permite no solo un ahorro sustancial de energía y recursos, sino también una respuesta rápida a las necesidades cambiantes de iluminación. La capacidad de recopilar datos en tiempo real y tomar decisiones informadas para la gestión de la iluminación no solo mejora la eficiencia, sino que también contribuye al desarrollo de ciudades más inteligentes y sostenibles. Esta propuesta presenta un camino claro hacia una gestión del alumbrado público más eficiente y orientada hacia el futuro.

Es esencial considerar cuidadosamente la planificación, la inversión inicial y la infraestructura requerida para garantizar el éxito de este proyecto y mejorar la eficiencia energética de las redes alumbrado público.

#### REFERENCIAS

- [1] G. Shahzad, H. Yang, A. W. Ahmad, and C. Lee, "Energy-efficient intelligent street lighting system using traffic-adaptive control," *IEEE Sensors Journal*, vol. 16, no. 13, pp. 5397–5405, 2016.
- [2] En.lighten. (2015) Efficient lighting for developing and emerging countries. [Online]. Available: <http://www.enlighten-initiative.org/>
- [3] H. Deng, X. Xie, W. Ma, and Y. Han, "A led street lamp monitoring system based on bluetooth wireless network and labview," in *2016 2nd IEEE International Conference on Computer and Communications (ICCC)*, Chengdu, 2016, pp. 2286–2291.
- [4] U. Bhagat, N. Gujar, and S. Patel, "Implementation of iot in development of intelligent campus lighting system using mesh network," in *2018 International Conference on Smart Systems and Inventive Technology (ICSSIT)*, Tirunelveli, India, 2018, pp. 251–256.
- [5] 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 Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 3, no. 3, pp. 599–608, 2015.
- [6] F. J. Nogueira, I. D. Melo, V. M. Albuquerque, L. H. Gouveia, C. G. Casagrande, D. P. Pinto, and H. A. Braga, "Street lighting led luminaires using telemanagement systems: Study of case," in *2014 11th IEEE/IAS International Conference on Industry Applications*, Juiz de Fora, Brazil, 2014, pp. 1–8.
- [7] S. Biansoongnern and B. Plangklang, "Efficiency improvement of energy management for led streetlightings," in *2017 International Electrical Engineering Congress (iEECON)*, 2017, pp. 1–4.
- [8] J. P. Pallo, S. Manzano, D. Chicaiza, C. Nunez, F. Placencia, and F. Nuñez, "Wireless system for control, monitoring and preventive maintenance of public street lighting," in *2018 13th Iberian Conference on Information Systems and Technologies (CISTI)*, Caceres, Spain, 2017, pp. 1–6.
- [9] Z. Kaleem, T. M. Yoon, and C. Lee, "Energy efficient outdoor light monitoring and control architecture using embedded system," *IEEE Embedded Systems Letters*, vol. 8, no. 1, pp. 18–21, 2016.
- [10] S. Kumar, A. Deshpande, S. S. Ho, J. S. Ku, and S. E. Sarma, "Urban street lighting infrastructure monitoring using a mobile sensor platform," *IEEE Sensors Journal*, vol. 16, no. 12, pp. 4981–4994, 2016.
- [11] M. Mahoor, F. R. Salmasi, and T. A. Najafabadi, "A hierarchical smart street lighting system with brute-force energy optimization," *IEEE Sensors Journal*, vol. 17, no. 9, pp. 2871–2879, 2017.
- [12] C. C. Abarro, A. C. Caliwag, E. C. Valverde, W. Lim, and M. Maier, "Implementation of iot-based low-delay smart streetlight monitoring system," *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 9, no. 19, pp. 18461–18472, 2022.
- [13] E. Bompari, E. Carpaneto, G. Chicco, P. Ribaldone, and C. Vercellino, "The impact of public lighting on voltage distortion in low voltage distribution systems," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 16, no. 4, pp. 752–757, 2001.
- [14] M. Dwiyanti, A. B. Kusumaningtyas, S. Wardono, K. Sri Lestari, and Tohazen, "A real-time performance monitoring of iot based on integrated smart streetlight," in *2022 6th International Conference on Electrical, Telecommunication and Computer Engineering (ELTICOM)*, 2022, pp. 131–135.
- [15] A. Tama. (2012) La revolución del alumbrado público. [Online]. Available: <https://www.dspace.espol.edu.ec/xmlui/handle/123456789/25739>
- [16] Agencia de Regulación y Control de Energía y Recursos Naturales NO Renovables. (2020) Regulación Nro. ARCERNNR 007/23. [Online]. Available: <https://www.controlrecursosyenergia.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2023/07/27.-Regulacion-Nro.-ARCERNNR-007-23.pdf>
- [17] T. Maggi, "Estudo e implementação de uma luminárias de iluminação pública à base de leds," 2013.
- [18] K. Thopate, S. More, K. Thakare, R. Waware, J. Gangurde, and A. Ghuge, "Smart street light monitoring system for enhanced energy efficiency," in *2023 4th International Conference on Electronics and Sustainable Communication Systems (ICESC)*, 2023, pp. 1798–1805.
- [19] C. C. Abarro, A. C. Caliwag, E. C. Valverde, W. Lim, and M. Maier, "Implementation of iot-based low-delay smart streetlight monitoring system," *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 9, no. 19, pp. 18461–18472, 2022.
- [20] D. Minoli, K. Sohraby, and B. Occhiogrosso, "Iot considerations, requirements, and architectures for smart buildings—energy optimization and next-generation building management systems," *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 4, no. 1, pp. 269–283, 2017.
- [21] G. Parise, L. Martirano, and M. Mitolo, "Electrical safety of street light systems," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 26, no. 3, pp. 1952–1959, 2011.
- [22] Y.-C. Chang and Y.-H. Lai, "Campus edge computing network based on iot street lighting nodes," *IEEE Systems Journal*, vol. 14, no. 1, pp. 164–171, 2020.
- [23] Y. Jiang, Y. Shuai, X. He, X. Wen, and L. Lou, "An energy-efficient street lighting approach based on traffic parameters measured by wireless sensing technology," *IEEE Sensors Journal*, vol. 21, no. 17, pp. 19134–19143, 2021.
- [24] P. Mohanty, U. C. Pati, K. Mahapatra, and S. P. Mohanty, "bslight: Battery-less energy autonomous street light management system for smart city," *IEEE Transactions on Sustainable Computing*, pp. 1–15, 2023.
- [25] Z. Lv, B. Hu, and H. Lv, "Infrastructure monitoring and operation for smart cities based on iot system," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 16, no. 3, pp. 1957–1962, 2020.
- [26] P. Mlynek, M. Koutny, J. Misurec, and Z. Kolka, "Measurements and evaluation of plc modem with g3 and prime standards for street lighting control," in *18th IEEE International Symposium on Power Line Communications and Its Applications*, 2014, pp. 238–243.
- [27] P. M. Rao and B. Deebak, "Chapter 4 - role of power line communications in the smart grid: applications, challenges, and research initiatives," in *Sustainable Networks in Smart Grid*, B. Deebak and F. Al-Turjman, Eds. Academic Press, 2022, pp. 73–98.
- [28] L. Lampe and L. Berger, "Chapter 16 - power line communications," in *Academic Press Library in Mobile and Wireless Communications*, S. K. Wilson, S. Wilson, and E. Biglieri, Eds. Oxford: Academic Press, 2016, pp. 621–659.
- [29] M. Kamran, "Chapter 1 - introduction to smart grids," in *Fundamentals of Smart Grid Systems*, M. Kamran, Ed. Academic Press, 2023, pp. 1–22. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780323995603000089>
- [30] S. Galli, A. Scaglione, and Z. Wang, "For the grid and through the grid: The role of power line communications in the smart grid," *Proceedings of the IEEE*, vol. 99, no. 6, pp. 998–1027, 2011.
- [31] L. N. S. Varanasi and S. P. K. Karri, "An edge device for monitor and control of electrical appliances using smart power line communication," in *2022 IEEE 2nd International Conference on Sustainable Energy and Future Electric Transportation (SeFeT)*, 2022, pp. 1–4.

- [32] F. Leccese, "Remote-control system of high efficiency and intelligent street lighting using a zigbee network of devices and sensors," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 28, no. 1, pp. 21–28, 2013.
- [33] H. Deng, X. Xie, W. Ma, and Y. Han, "A led street lamp monitoring system based on bluetooth wireless network and labview," in *2016 2nd IEEE International Conference on Computer and Communications (ICCC)*, 2016, pp. 2286–2291.
- [34] A. Toubal, B. Bengherbia, M. Ouldzmirli, and M. Maazouz, "Energy efficient street lighting control system using wireless sensor networks," in *2016 8th International Conference on Modelling, Identification and Control (ICMIC)*, 2016, pp. 919–924.
- [35] A. S.R., H. R. S. R., and N. P. S., "A literature survey on artificial intelligence-based smart city automation using lora and iot for street lights and air quality check," in *2022 International Conference on Computer, Power and Communications (ICCCP)*, 2022, pp. 149–152.
- [36] N. S. Gujar, "Message queuing telemetry transport (mqtt) based hybrid smart streetlight system for smart applications," in *2019 International Conference on Smart Systems and Inventive Technology (ICSSIT)*, 2019, pp. 832–836.
- [37] M. S. A. Muthanna, M. M. A. Muthanna, A. Khakimov, and A. Muthanna, "Development of intelligent street lighting services model based on lora technology," in *2018 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EConRus)*, 2018, pp. 90–93.
- [38] Y. SARR, B. GUEYE, and C. SARR, "Performance analysis of a smart street lighting application using lora wan," in *2019 International Conference on Advanced Communication Technologies and Networking (CommNet)*, 2019, pp. 1–6.
- [39] M. C. V. S. Mary, G. P. Devaraj, T. A. Theepak, D. J. Pushparaj, and J. M. Esther, "Intelligent energy efficient street light controlling system based on iot for smart city," in *2018 International Conference on Smart Systems and Inventive Technology (ICSSIT)*, 2018, pp. 551–554.
- [40] F. Sánchez Sutil and A. Cano-Ortega, "Smart public lighting control and measurement system using lora network," *Electronics*, vol. 9, no. 1, p. 124, 2020.
- [41] G. Pasolini, P. Toppan, F. Zabini, C. De Castro, and O. Andrisano, "Design, deployment and evolution of heterogeneous smart public lighting systems," *Applied Sciences*, vol. 9, no. 16, 2019. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/2076-3417/9/16/3281>
- [42] S. Park, B. Kang, M. in Choi, S. Jeon, and S. Park, "A micro-distributed ess-based smart led streetlight system for intelligent demand management of the micro grid," *Sustainable Cities and Society*, vol. 39, pp. 801–813, 2018. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2210670717304754>
- [43] I. Kabir, S. U. Ahamad, M. N. Uddin, S. M. Hossain, F. Farjana, P. P. Datta, M. R. A. Riad, and M. Hossam-E-Haide, "Gsm-gprs based smart street light," in *2021 2nd International Conference on Robotics, Electrical and Signal Processing Techniques (ICREST)*, 2021, pp. 67–71.
- [44] S. Kadirova, T. Nenov, and D. Kajtsanov, "Iot based automatic electronic system for monitoring and control of street lighting," in *2020 IEEE 26th International Symposium for Design and Technology in Electronic Packaging (SIITME)*, 2020, pp. 122–126.
- [45] M. A. Nassar, L. Luxford, P. Cole, G. Oatley, and P. Koutsakis, "Real-time localisation system for gps-denied open areas using smart street furniture," *Simulation Modelling Practice and Theory*, vol. 112, p. 102372, 2021. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1569190X21000824>
- [46] M. Patel and S. Mukherjee, "Lighting control protocols and standards," in *Handbook of Advanced Lighting Technology*. Springer, 2017, pp. 559–582.
- [47] F. K. Shaikh, S. Zeadally, and E. Exposito, "Enabling technologies for green internet of things," *IEEE Systems Journal*, vol. 11, no. 2, pp. 983–994, 2017.
- [48] M. K. Manyake and T. N. Mathaba, "An internet of things framework for control and monitoring of smart public lighting systems: A review," in *2022 International Conference on Artificial Intelligence, Big Data, Computing and Data Communication Systems (icABCD)*, 2022, pp. 1–9.
- [49] C.-H. Chen and C.-T. Liu, "A 3.5-tier container-based edge computing architecture," *Computers & Electrical Engineering*, vol. 93, p. 107227, 2021. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0045790621002160>
- [50] K. Aarika, M. Bouhlal, R. A. Abdelouahid, S. Elfilali, and E. Benlahmar, "Perception layer security in the internet of things," *Procedia Computer Science*, vol. 175, pp. 591–596, 2020, the 17th International Conference on Mobile Systems and Pervasive Computing (MobiSPC), The 15th International Conference on Future Networks and Communications (FNC), The 10th International Conference on Sustainable Energy Information Technology. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877050920317853>
- [51] Z. Chen, C. Sivaparthipan, and B. Muthu, "Iot based smart and intelligent smart city energy optimization," *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 49, p. 101724, 2022. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2213138821007384>
- [52] M. Mahoor, Z. S. Hosseini, A. Khodaei, A. Paaso, and D. Kushner, "State-of-the-art in smart streetlight systems: a review," *IET Smart Cities*, vol. 2, no. 1, pp. 24–33, 2020. [Online]. Available: <https://ietresearch.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1049/iet-smc.2019.0029>
- [53] P. L. Sikdar and P. Kumar Guha Thakurta, "An improved energy-efficient street lighting system," in *2020 7th International Conference on Signal Processing and Integrated Networks (SPIN)*, 2020, pp. 372–376.
- [54] X. Zeng and J. Zhang, "Design of intelligent light control system based on nb-iot," in *2022 International Conference on Wearables, Sports and Lifestyle Management (WSLM)*, 2022, pp. 84–87.
- [55] S. Latif, H. Afzaal, A. Rehman, and N. A. Zafar, "Deterministic formal modeling of smart lightning system using internet of things," in *2018 12th International Conference on Mathematics, Actuarial Science, Computer Science and Statistics (MACS)*, 2018, pp. 1–6.
- [56] A. Kama, M. Diallo, M. S. Drame, M. L. Ndiaye, A. Ndiaye, and P. A. Ndiaye, "Monitoring the performance of solar street lights in sahelian environment: Case study of senegal," in *2017 10th International Conference on Developments in eSystems Engineering (DeSE)*, 2017, pp. 56–61.
- [57] M. Centenaro, G. Ministeri, and L. Vangelista, "A comparison of energy-efficient harq protocols for m2m communication in the finite block-length regime," in *2015 IEEE International Conference on Ubiquitous Wireless Broadband (ICUWB)*, 2015, pp. 1–6.
- [58] M. Y. Mukta, M. A. Rahman, A. T. Asyhari, and M. Z. Alam Bhuiyan, "Iot for energy efficient green highway lighting systems: Challenges and issues," *Journal of Network and Computer Applications*, vol. 158, p. 102575, 2020. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1084804520300497>
- [59] X. Xu, A. Zhan, and X. Li, "Design and implementation of street light control system based on power line carrier communication," *Procedia Computer Science*, vol. 155, pp. 734–739, 2019, the 16th International Conference on Mobile Systems and Pervasive Computing (MobiSPC 2019), The 14th International Conference on Future Networks and Communications (FNC-2019), The 9th International Conference on Sustainable Energy Information Technology. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877050919310221>
- [60] M. Kuzlu, M. Pipattanasomporn, and S. Rahman, "Assessment of communication technologies supporting smart streetlighting applications," in *2018 IEEE International Smart Cities Conference (ISC2)*, 2018, pp. 1–7.
- [61] M. Collotta, G. Pau, T. Talty, and O. K. Tonguz, "Bluetooth 5: A concrete step forward toward the iot," *IEEE Communications Magazine*, vol. 56, no. 7, pp. 125–131, 2018.
- [62] Sneha, P. K. Malik, N. Bilandi, and A. Gupta, "Narrow band-iot and long-range technology of iot smart communication: Designs and challenges," *Computers & Industrial Engineering*, vol. 172, p. 108572, 2022. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360835222005733>
- [63] M. Bernas, B. Płaczek, W. Korski, P. Loska, J. Smyła, and P. Szymała, "A survey and comparison of low-cost sensing technologies for road traffic monitoring," *Sensors*, vol. 18, no. 10, 2018. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/1424-8220/18/10/3243>
- [64] S. Chen, G. Xiong, J. Xu, S. Han, F.-Y. Wang, and K. Wang, "The smart street lighting system based on nb-iot," in *2018 Chinese Automation Congress (CAC)*, 2018, pp. 1196–1200.
- [65] 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," in *2017 International Conference on Trends in Electronics and Informatics (ICEI)*, 2017, pp. 509–512.
- [66] P. Mohandas, J. S. A. Dhanaraj, and X.-Z. Gao, "Artificial neural network based smart and energy efficient street lighting system: A case study for residential area in hosur," *Sustainable Cities and Society*, vol. 48, p. 101499, 2019. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2210670718317530>

- [67] A. Szalai, T. Szabó, P. Horváth, A. Timár, and A. Poppe, "Smart ssl: Application of iot/cps design platforms in led-based street-lighting luminaires," in *2016 IEEE Lighting Conference of the Visegrad Countries (Lumen V4)*, 2016, pp. 1–6.
- [68] S. Ernst, L. Kotulski, T. Lerch, M. Rad, A. Sedziwy, and I. Wojnicki, "Application of reactive power compensation algorithm for large-scale street lighting," *Journal of Computational Science*, vol. 51, p. 101338, 2021. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877750321000363>
- [69] M. Z. A. Bhuiyan, G. Wang, W. Tian, M. A. Rahman, and J. Wu, "Content-centric event-insensitive big data reduction in internet of things," in *GLOBECOM 2017 - 2017 IEEE Global Communications Conference*, 2017, pp. 1–6.
- [70] M. Mahbub, "Nb-iot: applications and future prospects in perspective of bangladesh," *International Journal of Information Technology*, vol. 12, pp. 1183–1193, 2020.
- [71] E. Petritoli, F. Leccese, S. Pizzuti, and F. Pieroni, "Smart lighting as basic building block of smart city: An energy performance comparative case study," *Measurement*, vol. 136, pp. 466–477, 2019. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263224118312405>
- [72] P. du Toit, C. Kruger, G. P. Hancke, and T. D. Ramotsela, "Smart street lights using power line communication," in *2017 IEEE AFRICON*, 2017, pp. 1581–1586.
- [73] G. Pasolini, P. Toppan, F. Zabini, C. De Castro, and O. Andrisano, "Design, deployment and evolution of heterogeneous smart public lighting systems," *Applied Sciences*, vol. 9, no. 16, 2019. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/2076-3417/9/16/3281>
- [74] K. Bernacki, D. Wybrańczyk, M. Zygmanski, A. Latko, J. Michalak, and Z. Rymarski, "Disturbance and signal filter for power line communication," *Electronics*, vol. 8, no. 4, 2019. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/2079-9292/8/4/378>
- [75] M. A. Ferrag, M. Babaghayou, and M. A. Yazici, "Cyber security for fog-based smart grid scada systems: Solutions and challenges," *Journal of Information Security and Applications*, vol. 52, p. 102500, 2020. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214212619311408>