# DISEÑO DE PROTOTIPO FUNCIONAL DE ALUMBRADO PÚBLICO BASADO EN TECNOLOGÍAS IOT PARA LA CIUDAD DE BUCARAMANGA

**EDIER YASSER PEREA GONZALEZ**

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BUCARAMANGA**
**FACULTAD DE INGENIERÍA**
**PROGRAMA DE INGENIERÍA DE SISTEMAS**
**GRUPO DE INVESTIGACIÓN EN TECNOLOGÍAS DE INFORMACIÓN**
**LINEA DE INVESTIGACIÓN EN TELEMÁTICA**
**BUCARAMANGA, OCTUBRE 2020**

# DISEÑO DE PROTOTIPO FUNCIONAL DE ALUMBRADO PÚBLICO BASADO EN TECNOLOGÍAS IOT PARA LA CIUDAD DE BUCARAMANGA

**EDIER YASSER PEREA GONZALEZ**

**Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero de Sistemas**

**Director:**
**M.Sc José David Ortiz Cuadros**

**Co-director:**
**Edinsson Javier Landazabal Hernández**

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BUCARAMANGA**
**FACULTAD DE INGENIERÍA**
**PROGRAMA DE INGENIERÍA DE SISTEMAS**
**GRUPO DE INVESTIGACIÓN EN TECNOLOGÍAS DE INFORMACIÓN**
**LINEA DE INVESTIGACIÓN EN TELEMÁTICA**
**BUCARAMANGA, OCTUBRE 2020**

***A Dios y mi familia***

## AGRADECIMIENTOS

Expreso mis agradecimientos al M.Sc José David Ortiz Cuadros, por su dirección, sugerencias y paciencia durante el desarrollo del proyecto.

**TABLA DE CONTENIDO**

1. INTRODUCCIÓN ..... 10
2. GENERALIDADES ..... 13
2.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA ..... 13
2.2. JUSTIFICACIÓN ..... 15
2.3. PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN ..... 16
2.4. HIPÓTESIS ..... 16
2.5. OBJETIVOS ..... 17
2.5.1. Objetivo general ..... 17
2.5.2. Objetivos específicos ..... 17
3. MARCO REFERENCIAL ..... 18
3.1. MARCO CONCEPTUAL ..... 18
3.1.1. Red informática ..... 18
3.1.2. Sensor ..... 21
3.1.3. Protocolo ..... 22
3.1.4. Microcontrolador ..... 22
3.2. MARCO TEÓRICO ..... 22
3.2.1. Smart City ..... 23
3.2.2. IoT (Internet of Things) ..... 24
3.2.3. Smart Lighting ..... 25
3.2.4. Measurement ..... 26
3.2.5. Sistemas embebidos ..... 27
3.3. ESTADO DEL ARTE ..... 28
3.4. MARCO LEGAL Y POLÍTICO ..... 39
3.4.1. Ahorro de energía ..... 39
3.4.2. Servicio de alumbrado público ..... 39
3.4.3. Determinación de cobros ..... 39
3.4.4. Requerimientos en un sistema de alumbrado público en Colombia ..... 41
4. ASPECTOS METODOLÓGICOS ..... 44
4.1. METODOLOGÍA ..... 44
4.1.1. Diagnóstico ..... 44

4.1.2. Diseño del framework ..... 44
4.1.3. Diseño de la arquitectura del sistema ..... 45
5. RESULTADOS DEL PROYECTO ..... 46
5.1. DIAGNÓSTICO DEL ALUMBRADO PÚBLICO DE LA CIUDAD DE BUCARAMANGA ..... 46
5.1.1. Sistema de alumbrado público de la ciudad de Bucaramanga ..... 46
5.1.2. Financiamiento del alumbrado público ..... 46
5.1.3. Luminarias ..... 46
5.1.4. Cobro del servicio de alumbrado público ..... 48
5.1.5. Reporte de fallas en el alumbrado público ..... 48
5.1.6. Mapa de luminarias de la ciudad ..... 49
5.1.7. Proyectos relacionados con el alumbrado público ..... 50
5.2. DISEÑO DEL FRAMEWORK CONCEPTUAL ..... 52
5.2.1. Diseño de la plataforma web ..... 53
5.3. DISEÑO DE LA ARQUITECTURA DEL SISTEMA ..... 55
5.3.1. Caso de estudio ..... 55
5.3.2. Zona de cobertura ..... 56
5.3.3. Requerimientos del sistema ..... 56
5.3.4. Arquitectura del servidor ..... 63
5.3.5. Descripción del sistema ..... 65
5.3.6. Diseño de la red de sensores ..... 69
5.3.7. Selección de dispositivos ..... 77
5.3.8. Enrutamiento de datos ..... 81
5.3.9. Circuito controlador de intensidad de iluminación ..... 82
6. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS ..... 85
6.1. Trabajos futuros ..... 85
7. REFERENCIAS ..... 88

## LISTADO DE FIGURAS

Figura 1: Gráfica de la cantidad de documentos seleccionados por país en el área de investigación ..... 29
Figura 2: Gráfica de la cantidad de documentos seleccionados por año en el área de investigación ..... 30
Figura 3: Iluminación led en la Carrera 27 ..... 47
Figura 4: Formulario de registro de daño en luminarias ..... 49
Figura 5: Mapa de las luminarias de la ciudad de Bucaramanga ..... 50
Figura 6: Framework conceptual del sistema ..... 53
Figura 7: Vista de inicio de sesión ..... 53
Figura 8: Vista panel de administración ..... 54
Figura 9: Vista de alerta generada ..... 54
Figura 10: Vista de ubicación relacionada al reporte de falla ..... 55
Figura 11: División político-urbana de Bucaramanga ..... 55
Figura 12: Zona de cobertura ..... 56
Figura 13: Arquitectura Cliente/Servidor ..... 64
Figura 14: Diagrama de flujo del encendido autónomo ..... 65
Figura 15: Diagrama de flujo atenuación de iluminación ..... 66
Figura 16: Diagrama de flujo de detección de fallas ..... 66
Figura 17: Diagrama de flujo de la medición de consumo ..... 67
Figura 18: Diagrama de flujo del encendido autónomo ..... 67
Figura 19: Diagrama de flujo de transmisión de datos ..... 68
Figura 20: Diagrama de flujo de supervisión desde un centro de control ..... 69
Figura 21: Arquitectura general del sistema ..... 70
Figura 22: Comparativa de Zigbee con Bluetooth y IEEE 802.11.b ..... 72
Figura 23: Capas de ZigBee ..... 73
Figura 24: Topología de malla ..... 74
Figura 25: Topología de estrella ..... 75
Figura 26: Arquitectura del nodo router ..... 76
Figura 27: Arquitectura del nodo coordinador ..... 76
Figura 28: Arduino nano ..... 77
Figura 29: Raspberry PI 3 B+ ..... 78
Figura 30:Módulo fotosensible LM393 ..... 78
Figura 31: Módulo PIR HC-SR501 ..... 79
Figura 32: Módulo ACS712 ..... 79
Figura 33: Módulo Digi Xbee Pro 900HP ..... 80
Figura 34: Adaptador Xbee para arduino nano ..... 80
Figura 35: HAT 4G para Raspberry PI ..... 81
Figura 36: Enrutamiento en una red ..... 81
Figura 37: Circuito controlador de intensidad de iluminación ..... 83
Figura 38: Circuito detector de cruce por cero ..... 83

## LISTADO DE TABLAS

Tabla 1: Cantidad de documentos seleccionados por país en el área de investigación ..... 29
Tabla 2: Cantidad de documentos seleccionados por año en el área de investigación ..... 29
Tabla 3: Referencias del estado del arte: ..... 30
Tabla 4: Requerimiento funcional REQ-FSE-01 ..... 57
Tabla 5: Requerimiento funcional REQ-FSE-02 ..... 57
Tabla 6: Requerimiento funcional REQ-FSE-03 ..... 57
Tabla 7: Requerimiento funcional REQ-FSE-04 ..... 57
Tabla 8: Requerimiento funcional REQ-FSE-05 ..... 58
Tabla 9: Requerimiento funcional REQ-FSE-06 ..... 58
Tabla 10: Requerimiento funcional REQ-FSE-07 ..... 58
Tabla 11: Requerimiento funcional REQ-FSW-01 ..... 58
Tabla 12: Requerimiento funcional REQ-FSW-02 ..... 59
Tabla 13: Requerimiento funcional REQ-FSW-03 ..... 59
Tabla 14: Requerimiento funcional REQ-FSW-04 ..... 59
Tabla 15: Requerimiento funcional REQ-FSW-05 ..... 59
Tabla 16: Requerimiento funcional REQ-FSW-06 ..... 60
Tabla 17: Requerimiento funcional REQ-FSW-07 ..... 60
Tabla 18: Requerimiento funcional REQ-FSW-08 ..... 60
Tabla 19: Requerimiento funcional REQ-FSW-09 ..... 60
Tabla 20: Requerimiento funcional REQ-FSW-10 ..... 61
Tabla 21: Requerimiento funcional REQ-FSW-11 ..... 61
Tabla 22: Requerimiento funcional REQ-FSW-12 ..... 61
Tabla 23: Requerimiento funcional REQ-FSW-13 ..... 61
Tabla 24: Requerimiento funcional REQ-FSW-14 ..... 62
Tabla 25: Requerimiento funcional REQ-NFS-01 ..... 62
Tabla 26: Requerimiento funcional REQ-NFS-02 ..... 62
Tabla 27: Requerimiento funcional REQ-NFS-03 ..... 62
Tabla 28: Requerimiento funcional REQ-NFS-04 ..... 63
Tabla 29: Requerimiento funcional REQ-NFS-05 ..... 63
Tabla 30: Requerimiento funcional REQ-NFS-06 ..... 63
Tabla 31: Requerimiento funcional REQ-NFS-07 ..... 63
Tabla 32: Características del servidor ..... 64
Tabla 33: Comparativa de las tecnologías de comunicación ..... 70

# INTRODUCCIÓN

El alumbrado público en la ciudad de Bucaramanga no cuenta con un sistema que le otorgue la capacidad de realizar un consumo eléctrico eficiente, así como tomar mediciones respecto al mismo y gestionar el correcto funcionamiento de las luminarias, de manera que se garantice la prestación de un servicio adecuado a los habitantes. Además, cuando las luces no funcionan correctamente, el proceso para repararlas puede ser muy largo, lo que tiene un gran impacto en los aspectos económico, energético y social.

En algunas ciudades del mundo se han integrado sistemas basados en plataformas IoT, mediante los cuales se dinamiza el funcionamiento de las luminarias, logrando de esta manera gestionar los recursos eléctricos y el funcionamiento de forma adecuada.

Se aborda la problemática desde un punto de vista académico, legal y técnico, buscando tomar en cuenta las diferentes opciones posibles en el proceso de desarrollo, no solo desde la tecnología usada en sistemas relacionados, si no también lo establecido en las leyes que se encargan de regular los sistemas de iluminación pública de Colombia.

En el documento se presenta la metodología de trabajo que rige el proceso de desarrollo del diseño del sistema en las distintas etapas correspondientes, así como los resultados obtenidos en cada una de las fases.

# 2. GENERALIDADES

En este capítulo se abordan aspectos relacionados al problema que motiva el desarrollo del proyecto, la justificación, la pregunta de investigación mediante la cual se busca una solución, la hipótesis y los objetivos.

## 2.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Durante esta época el consumo de energía eléctrica se perfila como uno de los mayores problemas existentes. Esto sucede porque gran parte de la energía es producida a partir de la quema de combustibles fósiles, lo que genera que los recursos del planeta sean consumidos más rápido de lo que estos tardan en regenerarse. Ante este panorama, las fuentes de energía renovables aparecen como una posible salida al problema, sin embargo, estas aún no cuentan con la capacidad de suplir la demanda de energía eléctrica existente y creciente. Por estos motivos, se hace necesario buscar formas de reducir el consumo de energía eléctrica o el desperdicio de esta (C. B. Soh*, J. J. Tan, K. J. Tseng, W. L. Woo, & J. W. R. Teo, 2018).

Uno de los sistemas de alumbrado más robustos y necesarios en las ciudades es el alumbrado público, el cual además es responsable de generar un alto consumo de electricidad(P. P. F. Dheena, G. S. Raj, G. Dutt, & S. V. Jinny, 2017) y (S. C. Suseendran, K. B. Nanda, J. Andrew, & M. S. Bennet Praba, 2018) pues cuando se enciende opera todo el tiempo al 100% de su capacidad generando un aumento innecesario de los costos operativos(O. Rudrawar, S. Daga, J. R. Chadha, & P. S. Kulkami, 2018). Alrededor del 30% del consumo eléctrico en las ciudades es producto del alumbrado público (M. Saifuzzaman, N. N. Moon, & F. N. Nur, 2017).

En Colombia, toda la energía que se consume en las luminarias acarrea un costo económico que debe ser asumido, según la Comisión de Regulación de Energía y Gas en su Resolución N° 123 de 2011, por los municipios o distritos correspondientes, ya que estos “son los responsables de la prestación del servicio de alumbrado público” (Resolución N° 123, 2011).

Para establecer el valor a pagar se debe saber primero cuánta energía se consume. Existen dos metodologías para determinar el consumo de energía eléctrica en el servicio de alumbrado público:

En la primera la empresa prestadora del servicio se basa en “la carga resultante de la cantidad de luminarias que se encuentren en funcionamiento en el respectivo municipio o distrito, multiplicada por un factor de utilización expresado en horas/día y por el número de días del periodo de facturación utilizado para el cobro” (Resolución N° 123, 2011). En consecuencia, el valor final de la factura se vería inflado por el cobro que incluiría lámparas que no estén funcionando y que su falla aún no haya sido reportada a la empresa.

La segunda metodología se basa en la existencia de medidores de consumo en el sistema de alumbrado público. En este caso “se cobrará el consumo registrado por el medidor de energía eléctrica” (Resolución N° 123, 2011). De esta manera el impacto de la reducción de gasto de energía se vería reflejado en la disminución del valor final a pagar por el servicio. Además, el mantener las lámparas activas constantemente sin que exista una alta densidad de tráfico en alguna zona específica disminuye el tiempo de vida de las luminarias y representa un aumento en los costos operativos para el mantenimiento de estas (Cook, B., 2000).

En este orden de ideas, la gestión efectiva de energía eléctrica en pro de reducir su consumo y desperdicio es indispensable, especialmente en las horas en las que la densidad de tráfico es escasa, de forma que en esos momentos específicos la intensidad de luminosidad emitida por las lámparas podría ser atenuada buscando reducir el consumo eléctrico (C. B. Soh*, J. J. Tan, K. J. Tseng, W. L. Woo, & J. W. R. Teo, 2018).

## 2.2. JUSTIFICACIÓN

La implementación del paradigma IoT en el alumbrado público plantea una solución a algunos problemas de desarrollo urbano, tales como el excesivo consumo eléctrico y la emisión de contaminantes ambientales, lo cual es primordial en el desarrollo urbano sostenible. Mediante IoT se puede ejercer un control único mediante una estrategia de ajuste inteligente de la farola, de forma que su operación sea eficiente (Chen et al., Nov 2018). Teniendo en cuenta que al ser un servicio convencional el alumbrado está presente en la gran mayoría de calles, por lo que el equipar cada poste con sensores y tecnologías de comunicación permitirá habilitar varios servicios basados en IoT (Mary, M. Caroline Viola Stella, Devaraj, Theepak, Pushparaj, & Esther, Dec 2018).

El alumbrado público tradicional funciona mediante un tiempo fijo de encendido y apagado o un control general basado en área, pero carece de una función de control de iluminación. Además, no es posible ejercer control sobre el funcionamiento de la luminaria para saber si presenta o no alguna falla. Por su parte, el alumbrado inteligente cuenta con un controlador en cada poste, que también está conectado a una red junto a los demás, permitiendo recolectar información en tiempo real de cada luminaria (Chen et al., Nov 2018).

Cuando una luminaria presenta alguna falla, su detección sólo se da hasta que alguna persona reporte el problema. Es por ello que las farolas necesitan la incorporación de dispositivos de detección automática, de forma que se puedan controlar y gestionar la conservación de la energía (Kuo-Hsiung Tseng & Chin-Liang Hsieh, Jun 2016).

A diferencia de la farola tradicional, la farola inteligente ostenta la capacidad de ajustar el brillo de luz emitido según las condiciones de iluminación y condiciones básicas de tráfico (Chen et al., Nov 2018).

## 2.3. PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN

¿De qué manera se puede hacer uso de las tecnologías IoT para desarrollar un sistema de alumbrado público inteligente en la ciudad de Bucaramanga?

## 2.4. HIPÓTESIS

El uso de sensores instalados en las lámparas de alumbrado público permitirá establecer un funcionamiento dinámico del sistema de iluminación, de tal forma que este trabaje a máxima potencia solo cuando sea detectada la presencia de vehículos o peatones en la vía

## 2.5. OBJETIVOS

En este apartado se presenta el objetivo general, y los objetivos específicos que han de servir como plataforma para conseguir el principal.

### 2.5.1. Objetivo general

Diseñar un prototipo funcional de alumbrado público basado en tecnologías IoT para la Ciudad de Bucaramanga.

### 2.5.2. Objetivos específicos

1. Realizar un diagnóstico sobre el sistema de alumbrado público en la Ciudad de Bucaramanga.

2. Diseñar un framework conceptual de una solución de alumbrado público basado en tecnologías IoT.

3. Diseñar la arquitectura del sistema de alumbrado público para el sector de Cabecera de la Ciudad de Bucaramanga.

# 3. MARCO REFERENCIAL

En el presente capítulo se presentan los principales conceptos teóricos y antecedentes relacionados con el tema del proyecto.

## 3.1. MARCO CONCEPTUAL

En este apartado se exponen los conceptos relacionados con la tecnología del internet de las cosas: Red informática, sensor, protocolo y microcontrolador.

### 3.1.1. Red informática

Una red informática se define como un conjunto de sistemas informáticos autónomos e independientes interconectados para permitir el intercambio interactivo de recursos entre cualquier par de sistemas. El objetivo de la red es permitir que los recursos alojados localmente en cada dispositivo que la componen estén disponibles para cualquier dispositivo que también integre la red. Los recursos que pueden ser compartidos incluyen datos, software y hardware, evitando la duplicación de archivos y software, que suele ser muy costosa (Roberts & Wessler, May 5, 1970).

#### 3.1.1.1. Red cableada

Una red cableada, también llamada red Ethernet, es básicamente una colección de dispositivos como computadoras, impresoras u otros, conectados entre sí o con otra red por medio de cables Ethernet (Joshua Muscatello & Joshua Martin, 2005).

#### 3.1.1.2. Red inalámbrica

“Una red inalámbrica es una red que usa ondas de radio para conectar dispositivos, sin necesidad de usar cables de cualquier tipo” (Jordi Salazar, 2017). Los dispositivos pueden ser laptops, teléfonos, impresoras u otros. Funciona de forma similar a la red cableada con la diferencia de que en una red inalámbrica se debe convertir la información en señales, de modo que esta pueda ser transmitida por medio aéreo. Las redes inalámbricas se pueden clasificar en cuatro grupos (Jordi Salazar, 2017).

#### 3.1.1.3. WPAN (Wireless Personal Area Network)

Están basadas en el estándar IEEE 802.15. Cubren distancias inferiores a 10 metros. Son implementadas en dispositivos de usuario, como teléfonos inteligentes y PDAs. Las WPAN están basadas en tecnologías como Bluetooth (Jordi Salazar, 2017).

#### 3.1.1.4. WLAN (Wireless Local Area Network)

Proporcionan acceso inalámbrico en un rango de hasta 100 metros, permitiendo a los usuarios moverse dentro del área de cobertura de la red. WLAN está basada en el estándar IEEE 802.11 y se comercializa bajo la marca Wi-Fi (Jordi Salazar, 2017).

#### 3.1.1.5. WMAN (Wireless Metropolian Area Networks)

Su objetivo es cubrir el área de una ciudad. Hace uso de protocolos como LMDS (Local Multipoint Distribution Service) o MMDS (Multichannel Multipoint Distribution Service) (José Luis Camargo, sf).

#### 3.1.1.6. WWAN (Wireless Wide Area Network)

El objetivo de las redes WWAN es cubrir todo un país o grupo de países. Están basadas en tecnología celular y han aparecido como evolución de las redes de comunicaciones de voz (José Luis Camargo, sf).

#### 3.1.1.7. WSN (Wireless Sensor Network)

Una red de sensores está compuesta por una gran cantidad de nodos los cuales poseen sensores que permiten detectar y recolectar datos de algún fenómeno específico. Además de los sensores, cada nodo posee una capacidad de procesamiento de datos y una unidad de comunicación. Los nodos carecen de posiciones predeterminadas, por lo que es necesario que la red cuente con una capacidad de auto organización (Sushruta Mishra & Hiren Thakkar, 2012).

Los nodos de los sensores hacen uso de su capacidad de procesamiento para realizar cálculos simples localmente y transmitir sólo los datos requeridos y parcialmente procesados (Cauligi Raghavendra et al., 2006).

La capacidad de los nodos de sensores en una red de sensores es variable. Los sensores simples pueden monitorear un solo fenómeno físico, mientras que los dispositivos más complejos pueden combinar muchas técnicas de detección

diferentes. También pueden diferir en sus capacidades de comunicación, por ejemplo, utilizando tecnologías de ultrasonido, infrarrojos o radiofrecuencia con velocidades y latencias de datos variables (Waltenegus Dargie & Christian Poellabauer, 2010).

Los avances en comunicaciones inalámbricas, electrónica digital y dispositivos analógicos han permitido que los nodos de sensores de bajo costo y baja potencia se comuniquen sin ataduras en distancias cortas para colaborar como grupo(Cauligi Raghavendra, Krishna Sivalingam, & Taieb Znati, 2006), para ello ostentan la capacidad de comunicarse entre sí y con una estación base por medio de sus radios inalámbricos, permitiéndoles diseminar sus datos para el procesamiento remoto, visualización, análisis y almacenamiento (Waltenegus Dargie & Christian Poellabauer, 2010).

Para la comunicación entre los nodos se utilizaba inicialmente el estándar IEEE 802.11, cuyo uso se da usualmente en las tecnologías de redes inalámbricas para sistemas móviles. Sin embargo, el alto gasto de energía en este estándar lo hace inviable para redes de bajo consumo (Waltenegus Dargie & Christian Poellabauer, 2010).

En consecuencia, se hizo necesario estandarizar algunos aspectos de las comunicaciones. A partir de ahí se diseñó el estándar IEEE 802.15.4 el cual está destinado a operar en tecnologías de transceptores inalámbricos de baja velocidad de datos con batería de larga duración y muy baja complejidad (Ian F. Akyildiz & Mehmet Can Vuran, 2010).

Los nodos que conforman una red de sensores, según el estándar IEEE 802.15.4, se definen en dos tipos: dispositivos de función completa, los cuales pueden desarrollar todas las funciones en la red, es decir, como coordinador o solo un dispositivo. El otro tipo es el de los dispositivos de función reducida, los cuales cuentan con pocos recursos y poca capacidad de memoria (Salman, Rasool, & Kemp, 2010).

De igual manera se definen dos topologías de red. La primera es la topología de estrella, en la cual la comunicación solo se da entre los dispositivos y el nodo coordinador de la red. La segunda es la topología punto a punto en la cual todos los dispositivos de función completa se pueden comunicar entre ellos mientras los dispositivos de función reducida solo se pueden comunicar con el coordinador de la red (Salman et al., 2010).

Algunos de los esfuerzos en la estandarización en las comunicaciones son ZigBee, WirelessHART y LoWPAN (Ian F. Akyildiz & Mehmet Can Vuran, 2010).

- ZigBee**:** Es un estándar global para la implementación de redes inalámbricas de bajo costo, baja velocidad de datos y corto rango desarrollado por The ZigBee Alliance. Los dispositivos inalámbricos ZigBee funcionan en las bandas de frecuencia de 868 MHz.915 MHz y 2,4 GHz y su máxima velocidad de datos es de 150 K bits por segundo. Los dispositivos ZigBee pasan poco tiempo en alguna actividad, la mayoría del tiempo se encuentran en modo ahorro de energía generando que los dispositivos funcionen por muchos años sin necesidad de cambiar sus baterías (Shahin Farahani, 2011).

- WirelessHART: Es una extensión del protocolo *Highway Addressable Remote Transducer* (HART). HART es el protocolo de comunicación más usado en la automatización y aplicaciones industriales que requieren soporte en tiempo real. Provee un esquema de comunicación maestro/esclavo permitiendo hasta más de dos maestros en la red, por lo que los dispositivos conectados al sistema pueden ser controlados a través de un sistema permanente y dispositivos de mano para fines de monitoreo y control. El estándar *Wireless HART* define 5 tipos de componentes: *WirelessHART field devices* (WFDs) que son sensores y elementos de control conectados a equipos de proceso. El *gateway* proporciona interfaces con porciones inalámbricas de la red y la infraestructura cableada. El *network manager*, encargado de mantener la operación de la red. Los *WirelessHART adapters* los cuales proporcionan compatibilidad con las versiones anteriores. Finalmente, los *handhelds* que proporcionan acceso in situ a la red inalámbrica e interfaz con los WFDs (Ian F. Akyildiz & Mehmet Can Vuran, 2010).

### 3.1.2. Sensor

Es un dispositivo que ofrece una salida eléctrica y puede ser diseñado para cualquier cantidad no eléctrica seleccionando el material adecuado. El sensor sugiere la extensión de nuestra capacidad para adquirir información sobre cantidades físicas no percibidas por los sentidos humanos debido a su naturaleza subliminal o minuciosidad (Pallas-Areny & Webster, 2012).

Los sensores se clasifican de acuerdo con algunos criterios. Si requieren una fuente de alimentación se clasifican como moduladores, cuyas señales de salida vienen de una fuente de poder auxiliar, o auto generadores en los cuales a potencia de salida proviene de una entrada (Pallas-Areny & Webster, 2012.

Considerando las señales de salida podemos clasificar los sensores como analógicos o digitales. En los sensores analógicos la salida cambia de forma

continua en un nivel macroscópico. La información se obtiene generalmente de la amplitud, aunque los sensores con salida en el dominio de tiempo son usualmente considerados analógicos. Los sensores cuya salida tiene una frecuencia variable son llamados cuasi-digitales porque es muy fácil obtener una salida digital de ellos (Pallas-Areny & Webster, 2012).

La salida de los sensores digitales toma la forma de pasos o estados discretos. Los sensores digitales no requieren un ACD, y su salida es más fácil de transmitir que la de un sensor analógico (Pallas-Areny & Webster, 2012).

### 3.1.3. Protocolo

Es un conjunto de reglas que rigen la forma en la que se transmiten datos entre aplicaciones y un cliente y servidor de una base de datos. Las reglas de un protocolo se implementan en un controlador de red. El controlador de red da el formato necesario a los datos cuando estos van a ser transferidos del cliente al servidor de la base de datos y viceversa. El poder de un protocolo de red radica en su capacidad para habilitar la comunicación cliente / servidor a pesar de que el cliente y el servidor de la base de datos están en diferentes computadoras con diferentes arquitecturas y sistemas operativos (IBM, 2014).

### 3.1.4. Microcontrolador

Un microcontrolador es una computadora de propósito especial, pequeña y de bajo costo, diseñada para ejecutar bien una tarea ejecutando un programa específico. Generalmente están integrados en otro dispositivo para controlar las características de este producto por medio de señales que recibe. Para ejercer control envía señales a los diferentes componentes del dispositivo (Marshall Brain, 2019).

## 3.2. MARCO TEÓRICO

En el presente apartado se presenta el desarrollo de algunos postulados teóricos que son base en el proyecto, tales como smart city, smart lightng, IoT y measurement y sistemas embebidos.

### 3.2.1. Smart City

Una ciudad inteligente es definida como “una ciudad innovadora que utiliza las tecnologías de la información y comunicación (TIC) y otros medios para mejorar la toma de decisiones, la eficiencia de las operaciones, la prestación de los servicios urbanos y su competitividad” (Banco Interamericano de Desarrollo, 2016).

A lo largo de la historia se han generado ideas que de alguna forma han ido moldeando el concepto de Smart City. Desde el año 1627 en el que Francis Bacon propone una ciudad desarrollada a la par de la tecnología, en su publicación la Nueva Atlántida. La contribución de Bacon está relacionada con la idea de un entorno en el que se desarrolla e implementa la tecnología y se disfrutan sus beneficios. La obra de Bacon ha influido en la forma, estructura y vida de las ciudades siendo “un hilo recurrente en la evolución de las ciudades y, por lo tanto, de las sociedades humanas” (Cugurullo, 2018).

Durante la segunda revolución industrial se vivió otro momento importante porque se lograron diversos inventos innovadores los cuales tuvieron una gran difusión y aplicación como nunca antes, dando como resultado un desarrollo mancomunado de la tecnología y el urbanismo. Entre los avances más importantes estaba el desarrollo de vehículos, lo que propició la creación de más carreteras, aumentando de este modo el la cantidad de servicios a los que podían acceder las personas, quienes ahora pudiendo desplazarse grandes distancias no tenían que vivir cerca del centro de la ciudad. Durante el siglo XIX también se tuvo una influencia filosófica interesante. Algunos diseños arquitectónicos se basaron en los planteamientos de Nietzsche, dando como resultado una visión individualista del desarrollo y aparición de interés de las personas en la sociedad y el medio ambiente (Cugurullo, 2018).

El futurismo acentuó la conexión entre el desarrollo urbano y el tecnológico. Desde el arte se hacían descripciones del progreso acompañado por el crecimiento urbano e innovación tecnológica, que además de construirse generaban cambios culturales importantes, haciendo estas ideas parte de la vida cotidiana. Esta nueva visión de infraestructura permitió que se iniciara el uso de tecnologías como el teléfono, radio y televisión, siendo estas los primeros elementos de las TIC (Cugurullo, 2018).

El desarrollo de las TIC se dio bastante rápido, su impacto fue profundo pero no inmediato. Mediante este nuevo paradigma se estableció una arquitectura de red que no puede ser controlada centralmente, y que se forma a partir de miles de redes informáticas autónomas. La era de las TIC fue impulsada principalmente por empresas del sector privado, como Apple, IBM e Intel. En la década de los

90 el término Smart City empieza a ser usado en algunos proyectos de desarrollo urbano, como en las ciudades de Cyberjaya y Putrajaya (Malasia), que se desarrollaron bajo el lema de “Smart City”. Smart city fue presentado oficialmente en el año 2009 por IBM, y en el año 2011 se registró como marca de la compañía (Cugurullo, 2018).

El concepto de ciudades inteligentes visto desde la perspectiva de las tecnologías y componentes tiene algunas propiedades específicas dentro de la literatura más amplia de ciudades cibernéticas, digitales e inteligentes. Se centra en los últimos avances en informática móvil y generalizada, redes inalámbricas, middleware y tecnologías de agentes a medida que se integran en los espacios físicos de las ciudades. El énfasis en los dispositivos inteligentes integrados representa una característica distintiva de las Smart Cities en comparación con las Intelligent Cities, que crean sistemas de innovación territorial que combinan actividades intensivas en conocimiento, instituciones para la cooperación y el aprendizaje, y aplicaciones de inteligencia colectiva basadas en la web (Schaffers et al., 2011).

Se anticipa que las soluciones de ciudades inteligentes, con la ayuda de la instrumentación y la interconexión de dispositivos móviles, sensores y actuadores que permitan recopilar y analizar datos urbanos del mundo real, mejorarán la capacidad de pronosticar y gestionar los flujos urbanos e impulsar la inteligencia colectiva de ciudades hacia adelante. Las ciudades inteligentes tienen este potencial de modernización porque no son eventos en la ciberesfera, sino espacios sociales, físicos, institucionales y digitales integrados, en los que los componentes digitales mejoran el funcionamiento de las actividades económicas y de ocio, y la gestión de las infraestructuras físicas de las ciudades, al tiempo que mejora las capacidades de resolución de problemas de las comunidades urbanas (Schaffers et al., 2011).

### 3.2.2. IoT (Internet of Things)

El término “Internet of Things” (IoT) es presentado por primera vez en el año 1999 por Kevin Ashton quien se desempeñaba como assistant brand manager en Procter & Gamble. La idea que soporta IoT para Ashton es que las computadoras e internet dependen casi por completo de los seres humanos para obtener información. “Los datos en internet son capturados y creados por humanos, escribiendo, presionando un botón de grabación, tomando una foto o escaneando un código de barras. El problema es que los humanos tenemos tiempo, atención y precisión limitados, lo que significa que no somos muy buenos capturando datos de las cosas del mundo real” (Kevin Ashton, 2009).

Aunque no existe una definición absoluta del concepto de IoT, si hay nociones comunes entre todos los planteamientos, siendo la idea de datos creados por personas, en un principio, y datos creados por cosas, en su evolución las más usadas. Una de las tantas definiciones enuncia que IoT es “una red abierta y completa de objetos inteligentes que tienen la capacidad de auto organizarse, compartir información, datos y recursos, reaccionar y actuar ante situaciones y cambios en el entorno” (Madakam, Ramaswamy, & Tripathi, 2015).

El IoT es concebido como un paradigma en las comunicaciones inalámbricas modernas. El concepto que le fundamenta la presencia de objetos a nuestro alrededor, que estén etiquetados y que cuenten con la capacidad de comunicarse unos con otros en busca de lograr objetivos comunes (Atzori, Iera, & Morabito, 2010). Para comunicarse, los objetos en cuestión están equipados con microcontroladores, transceptores, y los protocolos que sean adecuados y necesarios para establecer la comunicación (A. Zanella, N. Bui, A. Castellani, L. Vangelista, & M. Zorzi, 2014).

Con el uso de IoT se establece una interacción fácil con objetos tales como electrodomésticos, cámaras de vigilancia, sensores de monitoreo, vehículos, etc. Además, con los datos recolectados de estos dispositivos se pueden desarrollar aplicaciones que hagan uso de esta información, dando enormes beneficios a los ciudadanos, empresas y administraciones públicas (A. Zanella et al., 2014). Entre los beneficios más importantes se encuentra la capacidad de previsibilidad que se tiene al hacer seguimiento de los objetos de uso cotidiano. De esta manera los beneficiarios aumentan la eficiencia en cuanto a los procesos, reducción de errores e incorporación de sistemas organizacionales complejos por medio de IoT (Madakam et al., 2015).

### 3.2.3. Smart Lighting

La historia del alumbrado inicia con la creación en masa de la bombilla incandescente por parte de Thomas Edison (smartenlight, 2017). Durante el siglo XX el modelo de Edison no sufrió muchos cambios, sin embargo, durante las últimas dos décadas estos han hecho su aparición. Se ha sustituido la luz incandescente por bombillas led, generando que las lámparas consuman menos energía siendo hasta 5 veces más eficientes y duren hasta 23 veces más tiempo que sus predecesoras (Kyle Sandburg, 2018).

La implementación led en las bombillas ha permitido ampliar el espacio disponible en ellas, de forma que se ha podido hacer uso de este para diseñar bombillas con chips integrados (Kyle Sandburg, 2018).

El concepto de Smart Lighting ha evolucionado en su percepción a lo largo del tiempo. Hace 20 años el uso de un temporizador que apagara la lámpara a una hora determinada se podría haber considerado inteligente. Hace 15 años el funcionamiento de la lámpara con base en un sensor de movimiento era inteligente y hace 10 años la integración de un sensor de luminosidad para encenderla solo cuando era necesario tenía la misma naturaleza que los anteriores ejemplos. Sin embargo, hoy en día el concepto se ha ampliado sobremanera, porque concebimos como inteligente a “muchos dispositivos diferentes conectados a una red que nos ayudan a monitorear y controlar, automatizar y optimizar varios aspectos” (smartenlight, 2017).

Los sistemas de Smart Lighting son más relevantes en la medida en que introducen el control autónomo de la iluminación por medio de la retroalimentación de sensores integrados, datos del usuario, servicios en la nube y entrada del usuario. Los beneficios potenciales de los sistemas de Smart Lighting son múltiples, y el más inmediato es un mayor ahorro de energía. Como consecuencia, la mayoría de los trabajos en este campo de estudio incipiente se centran actualmente en extraer el máximo ahorro de energía junto con LED de conducción eficiente. De hecho, los sistemas con control de iluminación de ahorro de energía integrado generalmente exhiben ahorros de energía del 17–60% sobre el control de iluminación tradicional, dependiendo de los patrones de uso de los ocupantes (Chew, Karunatilaka, Tan, & Kalavally, 2017).

### 3.2.4. Measurement

La medición es una parte integral de la ciencia moderna, así como de la ingeniería, el comercio y la vida cotidiana. La medición a menudo se considera un sello distintivo de la empresa científica y una fuente privilegiada de conocimiento en relación con los modos cualitativos de investigación. A pesar de su ubicuidad e importancia, hay poco consenso entre los filósofos sobre cómo definir la medición, qué tipo de cosas son medibles o qué condiciones hacen posible la medición. La mayoría (pero no todos) los autores contemporáneos están de acuerdo en que la medición es una actividad que implica la interacción con un sistema concreto con el objetivo de representar aspectos de ese sistema en términos abstractos (por ejemplo, en términos de clases, números, vectores, etc.) Pero esta caracterización también se adapta a varios tipos de actividades perceptivas y lingüísticas que generalmente no se consideran medidas y, por lo tanto, es demasiado amplio para contar como una definición de medida. Además, si "concreto" implica "real", esta caracterización también es demasiado estrecha, Los filósofos han escrito sobre una variedad de temas conceptuales, metafísicos, semánticos y epistemológicos relacionados con la medición. Esta entrada

examinará los puntos de vista filosóficos centrales sobre la naturaleza de la medición, la noción de cantidad medible y los problemas epistemológicos relacionados. Se abstendrá de elaborar sobre los muchos problemas de disciplina específicos asociados con la medición y se centrará en cuestiones que tienen un carácter general (Tal Eran, 2015).

### 3.2.5. Sistemas embebidos

Un sistema embebido es “cualquier dispositivo que incluye un computador programable, pero en sí mismo no es un computador de propósito general” (Marilyn Wolf, 2012). “Cuenta con una función específica y dedicada que está diseñada para que nunca deba necesitar ser reprogramado” (Lambert, 2017).

Se considera como uno de los primeros sistemas embebidos al Apollo Guidance Computer, desarrollado por Charles Stark Draper en el Laboratorio de Instrumentación del MIT. Esta computadora “empleaba circuitos integrados monolíticos recién desarrollados para reducir el tamaño y el peso” (Fahmi Knoegell, 2016) en sistema del programa Apollo. Posteriormente se produjo en masa la computadora de guía Autonetics D-17, la cual fue desarrollada para el misil Minuteman. Para la segunda versión del misil, Minuteman II, se reemplazó la D-17 por una nueva computadora, la cual hacía uso, por primera vez, de un alto volumen de circuitos integrados. A partir de ahí los precios de los circuitos integrados se redujo considerablemente, contrario a la potencia de procesamiento y funcionalidad, la cual aumentó de forma dramática permitiendo hacer un uso comercial de los mismos (Fahmi Knoegell, 2016).

En el año 1978 la Asociación Nacional de Fabricantes de Ingeniería, en Estados Unidos, estableció estándares para la fabricación de microcontroladores programables, incluyendo “casi todos los controladores basados en computadora, tales como computadoras de placa única, controladores numéricos y basados en eventos” (Fahmi Knoegell, 2016).

Como causa de la disminución del costo de los microcontroladores se pudo reemplazar costosos componentes analógicos basados en perillas. Además, se pudo hacer uso de sistemas embebidos en aplicaciones en las cuales usar computadores de uso general era muy costoso (Fahmi Knoegell, 2016).

Los sistemas embebidos están conformados por un hardware y un software embebido, siendo los microcontroladores el tipo más común de ellos. Pueden ser independientes o formar parte de un sistema mayor (David Perez, 2009).

El uso de los sistemas embebidos se da en diferentes áreas y tecnologías, por ejemplo, teléfonos móviles, puentes de red, cámaras digitales, hornos microondas, lavadoras, etc. Debido a la confiabilidad necesaria en los sistemas embebidos estos son diseñados basados en microcontroladores, desde cero y con un software integrado especial para su funcionamiento (Jabeen et al., 2016).

Un sistema embebido cuenta con tres componentes principales:

#### 3.2.5.1. Hardware:

Un microcontrolador o circuito integrado, “que es un pequeño sistema informático en un solo circuito integrado. Algunos ejemplos comunes de este tipo de sistema embebido vienen en forma de microcontroladores Arduino o Teensy” (Lambert, 2017).

#### 3.2.5.2. Software

Es un software integrado especial que permite un funcionamiento específico. Para la creación del software se hace uso de lenguajes de programación de alto nivel cuidando que mediante este se cumplan los requisitos particulares del programa (Jabeen et al., 2016).

#### 3.2.5.3. Sistema operativo

Generalmente se hace uso de un sistema operativo en tiempo real, el cual es compatible con el dispositivo (hardware). Las características necesarias para el sistema operativo son: confiabilidad, portabilidad y capacidad de configuración (Jabeen et al., 2016).

## 3.3. ESTADO DEL ARTE

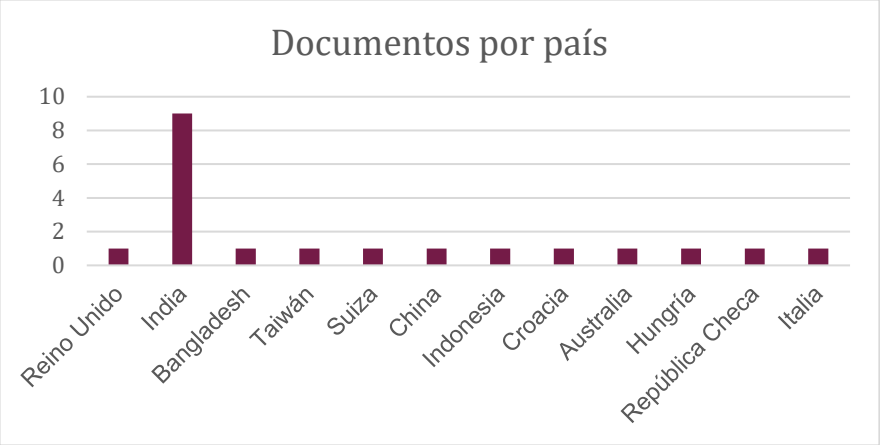
La revisión del estado del arte se desarrolló en dos partes. Una primera revisión se realizó durante el mes de agosto del año 2019 y una segunda en el mes de julio de 2020, utilizando la base de datos IEEE. Las palabras clave en la búsqueda son: Smart City, IoT, Smart Lighting, Measurement. La búsqueda se hizo cambiando los conectores en los filtros de búsqueda con el fin verificar cuál combinación daba los resultados más acordes al proyecto. Se seleccionaron los documentos cuya relación con el proyecto propuesto era más fuerte, considerando aquellos artículos cuyo hilo de desarrollo se centra en ciudades inteligentes y sistemas de alumbrado público inteligente. A continuación, se presenta la caracterización del área de acuerdo con las condiciones de selección de artículos incluidos en el presente documento.

*Tabla 1: Cantidad de documentos seleccionados por país en el área de investigación*

| Documentos por país | |
|---|---|
| **País** | **Cantidad** |
| Reino Unido | 1 |
| India | 9 |
| Bangladesh | 1 |
| Taiwán | 1 |
| Suiza | 1 |
| China | 1 |
| Indonesia | 1 |
| Croacia | 1 |
| Australia | 1 |
| Hungría | 1 |
| República Checa | 1 |
| Italia | 1 |

*Fuente: Elaboración propia*

*Figura 1: Gráfica de la cantidad de documentos seleccionados por país en el área de investigación*



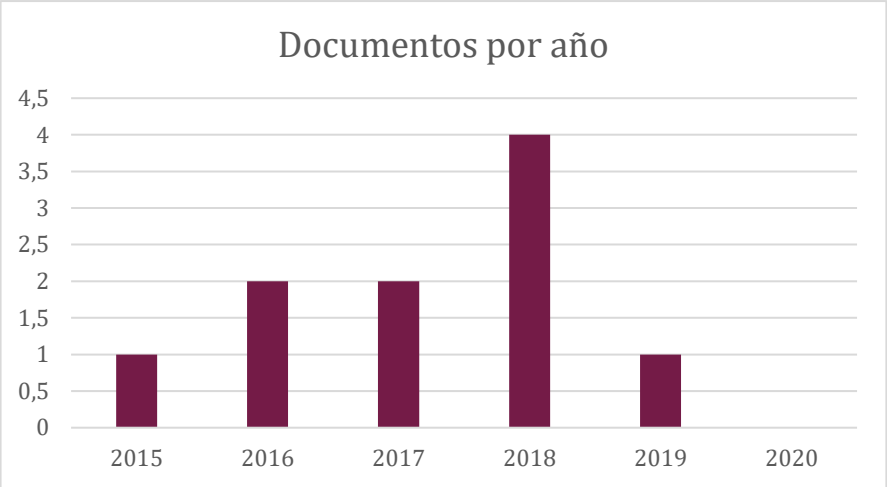

*Fuente: Elaboración propia*

*Tabla 2: Cantidad de documentos seleccionados por año en el área de investigación*

| Documentos por año | |
|---|---|
| **Año** | **Cantidad** |
| 2015 | 1 |
| 2016 | 4 |
| 2017 | 5 |
| 2018 | 9 |
| 2019 | 1 |
| 2020 | 0 |

*Fuente: Elaboración propia*

Figura 2: Gráfica de la cantidad de documentos seleccionados por año en el área de investigación




*Fuente: Elaboración propia*

*Tabla 3: Referencias del estado del arte:*

| Autor | Año | Título | País | Palabras clave | Citaciones |
|---|---|---|---|---|---|
| C. B. Soh*, J. J. Tan, K. J. Tseng, W. L. Woo, & J. W. R. Teo | 2018 | Intelligent Street Lighting for Smart Cities | Reino Unido | Light Emitting Diodes;Street Lighting;Microcontroller;sensors;Communication | 0 |
| P. P. F. Dheena; G. S. Raj; G. Dutt; S. V. Jinny | 2017 | IOT Based Smart Street Light Management System | India | Internet of Things(IOT);Arduino Nano;LDR;DHT11;Relay;Wi-Fi module;LED | 2 |
| M. Saifuzzaman; N. N. Moon; F. N. Nur | 2017 | IoT based street lighting and traffic management system | Bangladesh | IoT;Adruino Uno;IR motion sensor;LDR;LED; Servo motor;Solar panel;automation; energy efficiency;monitoring | 2 |
| S. C. Suseendran; K. B. Nanda; J. Andrew; M. S. Bennet Praba | 2018 | Smart Street Lighting System | India | IoT;LDR;Video Vehicle Detection;Python Raspberry Pi | 0 |
| K. S. Murthy; P. Herur; B. R. Adithya; H. Lokesh | 2018 | IoT-Based Light Intensity Controller | India | IoT;Street Light;Intensity control;MQTT;Node MCU ESP8266 | 0 |

| Autor | Año | Título | País | Palabras clave | Citaciones |
|---|---|---|---|---|---|
| M. C. V. S. Mary; G. P. Devaraj; T. A. Theepak; D. J. Pushparaj; J. M. Esther | 2018 | Intelligent Energy Efficient Street Light Controlling System based on IoT for Smart City | India | Smart Street Lighting System;IoT;Intelligent On/Off Switching;Progressive Dimming | 0 |
| K. Tseng; C. Hsieh | 2016 | A solution for intelligent street lamp monitoring and energy management | Taiwan | IoT;G3-PLC;Zigbee;Concentrator;Modbus RTU;Modbus TCP | 1 |
| S. S. Badgelwar; H. M. Pande | 2017 | Survey on Energy Efficient Smart Street Light System | India | LED lamps;Raspberry Pi;Sensor;LDR | 2 |
| O. Rudrawar; S. Daga; J. R. Chadha; P. S. Kulkami | 2018 | Smart street lighting system with light intensity control using power electronics | India | IoT;Lighting System;Power Electronics;TRIAC | 0 |
| N. Ouerhani; N. Pazos; M. Aeberli; M. Muller | 2016 | IoT-based dynamic street light control for smart cities use cases | Suiza | Smart Cities;Internet of Things;Dynamic street lighting (DLS);Sensor Fusion;Sensor Networks;Wireless communication protocols;Outdoor Light Controller (OLC) | 11 |
| A. Shaikh; M. Thapar; D. Koli; H. Rambade | 2018 | IOT Based Smart Electric Pole | India | automatic circuit fault detection;pole inclination detection;automatic light sensing | 0 |
| B. Abinaya, S. Gurupriya and M. Pooja | 2017 | Iot based smart and adaptive lighting in street lights | India | Street light; panic button; sensor; microcontroller; cloud account; CCTV camera | 7 |
| S. Chen, G. Xiong, J. Xu, S. Han, F. Wang and K. Wang | 2018 | The Smart Street Lighting System Based on NB-IoT | China | Smart street lighting system; NB-IoT; IoT; smart city | 2 |
| B. Siregar, A. B. Azmi Nasution and F. Fahmi | 2016 | Integrated pollution monitoring system for smart city | Indonesia | wireless sensor network; smart cities; waspmote; pollution; dust; luminosity; humidity; noise | 22 |
| J. Perko, D. Topić and D. Šljivac | 2016 | Exploitation of public lighting infrastructural possibilities | Croacia | energy efficiency; intelligent traffic system;LED; | 6 |

| Autor | Año | Título | País | Palabras clave | Citaciones |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | | smart city; smart public lighting | |
| V. A. Niţă, M. L. Noguero, R. Slinksc, C. Bruschi, R. Gundacker, M. A. M. Martinz, H. Mierzwinski, M. Richard, C. Braune and T. Felberbauer | 2018 | Smart Sensor Box for Alivemaps Based on NB-IOT | Austria | pollution maps; NB-IoT; real-time | 1 |
| B. C. Csáji, Z. Kemény, G. Pedone, A. Kuti and J. Váncza | 2017 | Wireless Multi-Sensor Networks for Smart Cities: A Prototype System With Statistical Data Analysis | Hungría | Wireless sensor networks; databases; signal analysis; statistical learning; forecasting; extrapolation | 10 |
| U. Bhagat, N. Gujar and S. Patel | 2018 | Implementation of IOT in development of intelligent campus lighting system using mesh network | India | wireless mesh networ; sensor; Wi-Fi; Web Based control; cloud account; IOT | 0 |
| M. Babiuch, P. Foltýnek and P. Smutný | 2019 | Using the ESP32 Microcontroller for Data Processing | República Checa | ESP32; IoT; microcontroller; measurement; display; development boards; environment | 1 |
| E. R. Sanseverino, G. Scaccianoce, V. Vaccaro, G. Zizzo and S. Pennisi | 2015 | Smart city and public lighting | Italia | smart city; public lighting; energy efficiency; sustainable urban planning | 9 |

*Fuente: Elaboración propia*

(C. B. Soh* et al., 2018) plantean un sistema de alumbrado público inteligente basado en IoT para el país de Singapur. El sistema propuesto se compone por una serie de nodos los cuales forman una red. Cada nodo hace referencia a las lámparas de alumbrado que componen el sistema. Cada lámpara cuenta con una serie de sensores, un microcontrolador y un módulo de conexión inalámbrica. El funcionamiento se basa en la detección de la intensidad de iluminación ambiente para encender la farola y en la detección de movimiento por medio de un sensor infrarrojo. Al detectarse un peatón o vehículo el sistema se enciende a máxima potencia, de lo contrario la luz se atenúa hasta un 50%.

Dheena et al. (2017) plantean, ante la deficiencia del alumbrado público en India, automatizar las farolas de alumbrado público aumentando la productividad y precisión del sistema de forma rentable, así como dar acceso remoto para el monitoreo y control. El sistema se vale de un fotorresistor, un relé, un microcontrolador y un sensor de temperatura y humedad. Cada uno de los dispositivos ensamblados está en capacidad de controlar entre 6 y 8 lámparas. Para la comunicación inalámbrica se usa un módulo Wi-Fi, mediante el cual la información recolectada es enviada a una base de datos, que es accedida desde una aplicación web desde la que se monitorea y administra el sistema.

La intensidad de la luz es controlada por el fotorresistor, el cual varía su resistencia en función de las condiciones de iluminación externas. Por su parte los sensores de humedad y temperatura recolectan los datos relativos al entorno en el que se instala el sistema (P. P. F. Dheena et al., 2017).

En las farolas se implementa un cambio importante al reemplazar las lámparas de sodio por lámparas LED, las cuales tienen un consumo de energía bajo y proporcionan una iluminación eficiente (P. P. F. Dheena et al., 2017).

(M. Saifuzzaman et al., 2017) plantean la atenuación de la iluminación en el alumbrado público cuando no exista tráfico en las calles. El funcionamiento de este sistema de alumbrado se basa en la detección de sí es de día o de noche. Cuando es de noche, por medio de un sensor infrarrojo, se obtiene información relativa al tráfico, por lo que sí existen vehículos en circulación el sistema aumentará la iluminación al máximo. De lo contrario esta es atenuada. Además, propone la instalación de celdas solares para proporcionar alimentación primaria al alumbrado. En caso de presentar fallas con las celdas se hace uso de la alimentación secundaria, la cual corresponde a la red eléctrica común.

(S. C. Suseendran et al., 2018) proponen un alumbrado público inteligente haciendo uso de un fotorresistor para la detección de la intensidad de luz en un momento específico. Para la detección de vehículos se hace uso de un sensor incorporado a una cámara. Este dispositivo registra las imágenes que detectan el vehículo y los peatones que se mueven alrededor de la unidad de la lámpara hasta un cierto radio dependiendo de la capacidad de la cámara (Video Vehicle Detection). Un módulo ZigBee transmite los datos de los sensores al backend, el cual está formado por una Raspberry Pi. En la Raspberry la información es procesada y se proporciona una respuesta que dicta las acciones a realizar por la lámpara, ya sea encenderla, apagarla o atenuar la intensidad de la luz.

El sistema tiene un umbral de iluminación establecido. Cuando el fotorresistor detecta un valor inferior al umbral la lámpara es encendida de forma que la iluminación exterior alcance dicho umbral. La intensidad de la lámpara es inversamente proporcional a la intensidad de luz solar. A partir de ahí se activa la cámara de detección de vehículos y peatones. En el momento en que se detecta un movimiento la lámpara emite luz a una intensidad más alta que el umbral, en función de los datos recopilados por el fotorresistor, hasta que el vehículo cruza la zona (S. C. Suseendran et al., 2018).

(K. S. Murthy, P. Herur, B. R. Adithya, & H. Lokesh, 2018) proponen un alumbrado público inteligente basado en las condiciones de iluminación ambientales para la India, que permita la reducción en el consumo de energía eléctrica. El sistema consta de dos partes, la primera se encarga de obtener los datos relativos a la iluminación ambiente por medio de un fotorresistor y enviarlos a un servidor usando un microcontrolador con módulo Wi-Fi integrado. La segunda parte, encargada de controlar la intensidad de la luz, toma los datos alojados en el servidor, los compara con unos valores de iluminación preestablecidos y cambia, o no, la intensidad de iluminación producida por la lámpara en función de los resultados de la comparación. El protocolo de transmisión de datos usado es el Message Queuing Telemetry Transport (MQTT) porque asegura una alta tasa de entrega y también es liviano porque opera en un ancho de banda bajo y tiene huellas de baja potencia.

(M. C. V. S. Mary, G. P. Devaraj, T. A. Theepak, D. J. Pushparaj, & J. M. Esther, 2018) proponen un alumbrado público inteligente compuesto por dos unidades. La unidad de la lámpara se encarga de la detección de iluminación del dispositivo LED para ajustar la intensidad de brillo que se produce mediante un microcontrolador y un dispositivo de comunicación. La unidad de sensores consta de un sensor de movimiento, el cual al detectar la presencia de algún peatón o vehículo se comunica con las demás unidades para que todas se enciendan iluminando el camino. Una vez se deja de detectar movimiento la luz se atenúa. Luego de un tiempo establecido sin lecturas de movimiento la luz se apaga.

En la unidad de sensores hay también un fotorresistor el cual detecta la intensidad de iluminación ambiente, sí esta es baja el sistema se enciende, mientras que sí es alta el sistema se mantiene apagado mediante el controlador y la acción de un relé. La unidad de sensores se instala en postes o cercas de casas, a diferencia de la unidad de la lámpara que se instala en la lámpara. Para la comunicación inalámbrica entre los dispositivos se hace uso de la tecnología ZigBee. Todos los datos obtenidos en las unidades se envían a una plataforma en la nube mediante un módulo Wi-Fi conectado a cada uno de los controladores. De esta forma es posible monitorear el estado y la operación de las luminarias

K. Tseng & C. Hsieh (2016) presentan una solución para el monitoreo de un alumbrado público inteligente. Uno de los principales problemas es que cuando se presenta una falla en alguna lámpara del alumbrado, esta no puede ser reparada hasta que alguien reporte el problema o alguna patrulla de los encargados haga la detección. Además, las fallas sin reparar bajan el nivel de eficiencia de la iluminación en las calles influyendo negativamente en la seguridad de los habitantes de la ciudad. Por estos motivos es necesario un sistema que genere reportes automáticos en tiempo real ante las fallas presentadas en el alumbrado público. El sistema planteado tiene la capacidad de detectar las fallas en las farolas y notificar al personal encargado de la reparación de estas.

S. S. Badgelwar & H. M. Pande (2017) plantean el uso de video como entrada de un alumbrado público inteligente. Mediante la metodología de comparación de Marco de Nivel de Objetos se detectan los vehículos y los peatones que transitan en las calles para encender solamente las lámparas necesarias para proveer iluminación a los usuarios. El procesamiento de los datos está a cargo de una Raspberry Pi, seleccionada por su capacidad de RAM. Para que el sistema se active sólo cuando las condiciones de iluminación lo demanden se hace uso de un fotorresistor. Además, se cuenta con un sistema de alerta de fallas, el cual funciona con un botón instalado en cada poste. Cuando hay una falla los usuarios presionan el botón y el sistema emite una notificación a los encargados de solucionar el problema. Las alertas generadas por el sistema se transmiten mediante GSM.

O. Rudrawar et al. (2018) presentan una simulación de un circuito controlador de alumbrado público. El sistema completo propuesto tiene la capacidad de controlar la intensidad de la iluminación variando el voltaje aplicado a las luces mediante un TRIAC, basado en la medición del tráfico hecha por un sensor de ultrasonido. El cerebro del sistema es un Arduino, el cual recibe los datos de los sensores y los envía a un servidor por medio de un módulo Wi-Fi. Mediante esos datos almacenados se hace un análisis para extraer tendencias periódicas que se utilizan para establecer la intensidad. Mediante la simulación se implementó un circuito alimentado por corriente alterna (CA), usando un TRIAC y un generador de modulación de ancho de pulso para disparar el TRIAC, así como una resistencia que representa la farola. Como resultado se obtuvieron los ángulos de disparo necesarios para controlar la intensidad mediante el TRIAC.

El sistema se enciende y apaga automáticamente cuando el sol se oculta y sale, respectivamente, basado en información disponible en internet. Cuando es necesario que esté encendido se activa el circuito de control de intensidad de luz y los sensores. Cuando se detectan vehículos la intensidad de iluminación aumenta. Cuando se obtiene información de que el sol ha salido nuevamente el

circuito de control de intensidad de apaga y se envían los datos recolectados al servidor para ser analizados (O. Rudrawar et al., 2018).

N. Ouerhani, N. Pazos, M. Aeberli, & M. Muller (2016) presentan una solución probada en la ciudad de St-Imier en Suiza, para el control y la gestión dinámica del alumbrado público, que permite un ahorro de energía de aproximadamente un 56%. El sistema propuesto está compuesto por 3 capas. La primera la conforman los sensores, los cuales obtienen dos indicadores considerados relevantes para el control dinámico de la luz: la luminosidad ambiente y la actividad en la calle. En la segunda capa se encuentra la plataforma basada en IoT, cuya función es recopilar los datos detectados y procesarlos para estimar el nivel de intensidad de luz necesario y enviar un comando de control de intensidad de luz a la luminaria. En la tercera capa se encuentran las luminarias y un controlador de luz exterior, el cual recibe los comandos desde la segunda capa para dar los niveles de intensidad demandados. La conexión entre cada capa se da por medio de una puerta de enlace. Para la comunicación entre la segunda y tercera capa se hace uso del protocolo ZigBee utilizando el módulo Xbee, mediante el cual el controlador de luz exterior recibe el nivel de intensidad (en porcentaje) que ha sido calculado por el módulo de toma de decisiones de la plataforma central (N. Ouerhani et al., 2016).

El funcionamiento del control de intensidad es simple: si la intensidad de luz ambiente es inferior a un umbral establecido se activan los sensores de movimiento. Si se detecta movimiento la intensidad de luz se establece al 100%, de lo contrario funciona a un 30%. Si la luminosidad exterior es superior al umbral establecido el sistema mantiene apagadas las luces (N. Ouerhani et al., 2016).

Según los resultados obtenidos, luego de dos meses de pruebas con el sistema funcionando 24/7, el ahorro osciló alrededor del 56%, además, cuando las lámparas estuvieron encendidas, solo el 20% del tiempo estuvieron a máxima capacidad. El restante 80% operaron al 30% de intensidad (N. Ouerhani et al., 2016).

(A. Shaikh, M. Thapar, D. Koli, & H. Rambade, 2018) presentan una propuesta para desarrollar una aplicación basada en IoT, mediante la cual se permita monitorear las luminarias del alumbrado público de forma que se automatice su encendido y apagado, y que detecte y reporte las fallas en ellas, sin intervención humana. De esta forma se busca ahorrar energía y recursos.

(B. Abinaya, S. Gurupriya, & M. Pooja, 2017) abordan dos áreas, el consumo eléctrico y la inseguridad en las calles. Por un lado, se plantea la automatización del encendido y apagado de las luminarias, basado en la intensidad de iluminación ambiente. De esta manera se ahorra energía, puesto que el actual

sistema esta creado para estar encendido toda la noche. Por otra parte, se integra un botón de pánico instalado en los postes, que cuando es presionado envía una alerta a la estación de policía más cercana. Además, guarda las imágenes tomadas por una cámara de video que hace parte del sistema.

(S. Chen et al., 2018) plantean un sistema de alumbrado público inteligente basado en la tecnología NB-IoT. Cada farola hará las veces de un nodo en la red, que estará compuesto por varios sensores que automatizarán el funcionamiento del alumbrado, así como un módulo de comunicación NB-IoT mediante el cual se permitirá establecer una conexión inalámbrica para enviar datos a una plataforma de gestión, la cual almacenará la información, analizará los datos y gestionará el funcionamiento de las luminarias

(B. Siregar, A. B. Azmi Nasution, & F. Fahmi, 2016) plantean un sistema de monitoreo de contaminación para ciudades inteligentes. Para ello se hace uso de una red de sensores inalámbricos, mediante la cual toma datos relativos a polvo, humedad, luminosidad y un micrófono para ruido. Los datos son recolectados y almacenados en una tarjeta SD por una placa Waspmote pro, para ser posteriormente ser enviados a un sistema en la nube mediante conectividad 3G. En el sistema en la nube se analizan los datos para generar alertas en caso de que alguna de las mediciones sobrepase los umbrales establecidos.

(J. Perko, D. Topić, & D. Šljivac, 2016) analizan las posibilidades que se encuentran en una infraestructura robusta como la del alumbrado público. Se propone un sistema de iluminación inteligente, que a altas horas de la noche atenúe la iluminación y solo la aumente cuando detecte tráfico en la zona. Además, propone un sistema interconectado, en el que cada lámpara se comunica con las otras y con una base de control. Durante el día, que las luminarias no están encendidas, se pueden implementar otras tecnologías, como por ejemplo análisis del tránsito.

El documento, (V. A. Niţă et al., 2018) plantean la creación de un sistema de mapas de contaminación en tiempo real de una ciudad. Para ello se instalan cajas inteligentes en diferentes puntos, los cuales recopilan datos relativos a contaminación del aire, la contaminación acústica, la calidad de la luz natural y el índice UV, las áreas calientes y la seguridad de los edificios. Mediante la tecnología NB-IoT se envía esta información a un servidor web cada media hora para monitorear la evolución de los parámetros en colación. A partir del análisis de los datos, se genera un mapa de contaminación en el que se visualizan las zonas buenas y malas en la ciudad.

(B. C. Csáji, Z. Kemény, G. Pedone, A. Kuti, & J. Váncza, 2017) plantean una propuesta de ciudad inteligente aplicada en Budapest, Hungría. El sistema se basa en la instalación de múltiples sensores en el sistema de alumbrado público, cuyo propósito es recolectar una serie de datos relativos al ambiente. Toda esta información se envía a un módulo en la nube que se encarga de procesar estadísticamente los datos. Este módulo tiene la capacidad de realizar su análisis con datos faltantes, inconsistentes o ruidosos. Además, puede extrapolar las mediciones para crear pronósticos a corto plazo. En sí, no se especifica un fin específico del sistema, puesto que el planteamiento es versátil y su uso puede variar en función de las necesidades de la ciudad.

En el documento, (U. Bhagat, N. Gujar, & S. Patel, 2018) proponen un sistema de alumbrado público basado en IoT, mediante una red de malla Wi-Fi. En la farola se instala un controlador con varios sensores para medir la potencia y detectar objetos. Desde una base central se hace el monitoreo y control de las farolas mediante el uso de Adafruit.io. Un controlador se instala en cada farola con los sensores listados anteriormente. Los datos recopilados se envían por medio del módulo WiFi a la nube. La raspberry accede a los datos en la nube y envía las señales de control a cada nodo (lámpara) en función de los datos existentes. Las farolas se encienden o apagan en 2 casos. Primero en función de los datos estacionales almacenados. Segundo mediante el tablero de la sala de control central. Si durante la media noche no se detecta presencia, las farolas atenúan la intensidad de luz a un 50%. La comunicación para la transmisión de datos se da por medio del protocolo MQTT, porque es liviano y de bajo consumo. La red Wi-Fi está configurada en malla.

En este artículo, (E. R. Sanseverino, G. Scaccianoce, V. Vaccaro, G. Zizzo, & S. Pennisi, 2015) presentan la problemática relacionada con la forma en la que la ciudad puede servir como solución a los futuros problemas ambientales, económicos y políticos que se causan porque aproximadamente la mitad de las personas viven en zonas urbanas. Se exponen algunos casos de ejemplo de aplicación de proyectos de iluminación inteligente, entre ellos el de la ciudad de Vallelunga, que buscaba reducir las emisiones de carbono. La ciudad planteó 4 escenarios. El primero era reemplazar las lámparas de sodio por lámparas HPS, el segundo agregar un control de iluminación independiente a cada lámpara. El tercero se basa en reemplazar las lámparas de sodio por luminarias LED, el cuarto agregar un sistema de control de iluminación independiente.

## 3.4. MARCO LEGAL Y POLÍTICO

En Colombia el alumbrado público es un servicio que ha de ser prestado por el gobierno nacional. Para ejecutar esta tarea se han creado una serie de regulaciones políticas que guían a las empresas encargadas del sector energético del país.

### 3.4.1. Ahorro de energía

Según el Artículo 4 de la Ley 143 de 1994, es responsabilidad del estado el abastecer a la comunidad del servicio eléctrico “en un marco de uso racional y eficiente de los diferentes recursos energéticos del país”. Por su parte, los Artículos 66 y 67 de la misma ley, señalan que uno de los objetivos fundamentales ha de ser el ahorro y uso eficiente de la energía en el sector eléctrico, así como “la formulación y ejecución de programas que propendan por el uso eficiente de la energía” (Secretaría del Senado, 1994).

### 3.4.2. Servicio de alumbrado público

El alumbrado público es definido como “el servicio público no domiciliario que se presta con objetivo de proveer iluminación a los bienes de uso público y espacios de libre circulación con tránsito vehicular o peatonal, dentro del perímetro urbano y rural de un Municipio o Distrito” según el Decreto No. 2424 de 2006. Además, se señala en el Artículo Quinto que se debe incluir en la planeación la expansión del servicio en cuanto a factibilidad e ingeniería, siempre cumpliendo las normas técnicas para el uso de energía eficiente del Ministerio de Minas y Energía (Ministerio de Minas y Energía, 2006).

### 3.4.3. Determinación de cobros

Mediante la resolución 123 de 2011 se presentan los mecanismos para el establecimiento del costo del cobro por el servicio de alumbrado público en el país. El Artículo 9 de dicha resolución regula la determinación el costo máximo del suministro de alumbrado público (Ministerio de Minas y Energía, 2011) mediante la siguiente fórmula:

$$CSEE = \sum_{n=1}^{2} (TEEn * CEEn)$$

Dónde:

- $n$ = Nivel de tensión 1 o 2
- $CSEE$= Valor del costo del suministro de energía eléctrica para el Servicio de Alumbrado Público en pesos.
- $TEEn$: Tarifa de suministro de energía eléctrica para el Servicio de Alumbrado Público en el nivel de tensión $n$ en $/kWh.
- $CEEn$: Consumo de energía eléctrica del Servicio de Alumbrado Público en el nivel de tensión $n$ en kWh.

Por su parte, en el Artículo 12 del mismo decreto se establece que el consumo de energía para el servicio de alumbrado público se determina, en caso de contar con medidor, por el consumo registrado en dicho medidor. En caso contrario, cuando no existe como establecer la medida de consumo, se determina "con base en la carga resultante de la cantidad de luminarias en funcionamiento en el municipio, multiplicada por un factor de utilización expresado en horas/día y por el número de días del periodo de facturación utilizado para el cobro" (Ministerio de Minas y Energía, 2011), de la siguiente manera:

$$CEEn = \sum_{i=1}^{3} (Q_{n,i} * T_{n,i} * DPF_n)$$

Dónde:

- $n$=Nivel de tensión 1 o 2.

- $i$=Clase de iluminación del SALP: 1 vías vehiculares; 2 vías para el tráfico peatonal; 3 otras áreas de espacio público.

- $CEEn$= Consumo de energía eléctrica para el Servicio de Alumbrado Público, en el nivel de tensión $n$ en kWh.

- $Q_{n,i}$= Carga instalada, corresponde a la carga en KW de las luminarias (incluye la de la bombilla y los demás elementos internos para su funcionamiento), de los activos del SALP puestos en funcionamiento en el nivel de tensión $n$, de la clase de iluminación del SALP $i$. $Q_{n,1}$Carga de las luminarias de la iluminación de vías vehiculares; $Q_{n,2}$ $Q_{n,1}$Carga de las luminarias de la iluminación de vías para tráfico peatonal y ciclistas y $Q_{n,3}$ Carga de luminarias de otras áreas de espacio público.

- $T_{n,i}$= Número de horas del periodo de facturación de las luminarias en el nivel de tensión $n$ de la clase de iluminación$i$. De acuerdo con las condiciones generales de operación de los sistemas de iluminación de las

vías vehiculares y de las vías para tráfico peatonal y ciclistas, las horas de prestación del servicio se establecen entre las 6 p.m y las 6 a.m, El número de horas es entonces igual a 12 horas/día.

- $DPF_n$= Número de días del periodo de facturación acordado entre el municipio y/o distrito y la empresa comercializadora que suministra la energía eléctrica para las diferentes clases de iluminación que componen el SALP en el nivel de tensión$n$.

En caso de que exista deficiencia en el funcionamiento en la infraestructura del Servicio de Alumbrado Público, esta ha de ser descontada del cobro de remuneración de inversión, conforme a lo establecido en el Artículo 22 (Ministerio de Minas y Energía, 2011) mediante la siguiente fórmula.

$$ID = 1 - \sum_{i=1}^{m} \left(\frac{Wi * HSSi}{WT * T}\right)$$

Dónde:

- $ID$= Índice de disponibilidad e la infraestructura, para el periodo de remuneración.
- $Wi$= Potencia de la luminaria $i$ en kW (incluye la carga de la bombilla y de los demás elementos internos para su funcionamiento), reportada al registro de quejas y reclamos de alumbrado público.
- $HSSi$= Número total de horas sin servicio de la luminaria $i$.
- $m$= Número total de luminarias reportadas al registro de quejas y reclamos de alumbrado público del municipio o distrito para el periodo de remuneración.
- $WT$= Potencia total instalada en kW de las luminarias que componen el Sistema de Alumbrado Público de un municipio o distrito.
- $T$= Número de horas del periodo de facturación de las luminarias.

### 3.4.4. Requerimientos en un sistema de alumbrado público en Colombia

Según los requerimientos el Reglamento Técnico de Iluminación y Alumbrado Público (RETILAP), en un sistema de alumbrado público se debe tener en cuenta “los niveles óptimos de iluminación requeridos en la tarea a desarrollar, las condiciones visuales de quien las desarrolla, el tiempo de permanencia y los fines específicos que se pretendan con la iluminación” (Ministerio de Minas y

Energía, 2009). Además, con referencia al mantenimiento, “se debe estructurar un plan de mantenimiento del sistema que garantice atender los requerimientos de iluminación durante la vida útil del proyecto, garantizando los flujos luminosos dentro de los niveles permitidos, lo cual se denominará el flujo luminoso mantenido” (Ministerio de Minas y Energía, 2009).

En la sección 210.1 se establece que “en los proyectos de iluminación se deben aprovechar los desarrollos tecnológicos de las fuentes luminosas, las luminarias, los dispositivos ópticos y los sistemas de control, de tal forma que se tenga el mejor resultado lumínico con los menores requerimientos de energía posibles” (Ministerio de Minas y Energía, 2009).

Los sistemas de iluminación, para cumplir los requisitos del RETILAP, deben ser eficientes y por tanto deben contemplar el uso racional y eficiente de energía, siguiendo los siguientes requisitos:

- Usar al máximo posible la luz natural

- En los proyectos nuevos o remodelaciones de sistemas de iluminación de avenidas, grandes áreas o parques deportivos, donde se tienen altos consumos de energía, se debe considerar la posibilidad de reducir los consumos en las horas de baja circulación de personas o vehículos, mediante la instalación de tecnologías o prácticas apropiadas de control.

- En zonas donde se instale alumbrado con bombillas que no permitan cambios de tensión como método de reducción de potencia, se deben prever los circuitos eléctricos necesarios o los fotocontroles temporizados, para controlar el encendido de las bombillas.
  (Ministerio de Minas y Energía, 2009)

En la sección 210.3 del RETILAP se hace referencia al uso racional y eficiente de energía de iluminación. Allí se establece, entre otras cosas, que se debe controlar el horario de encendido y apagado de los sistemas de iluminación, sin comprometer la seguridad (Ministerio de Minas y Energía, 2009).

En la sección 220 del RETILAP referente a la gestión de riesgos, se establece que el alumbrado público debe mantener unos niveles óptimos de iluminación. Además, se deben mantener un nivel de uniformidad en las luminancias, de tal forma que no se afecte al usuario (Ministerio de Minas y Energía, 2009).

En la sección 320.3 del RETILAP se establece que, para proyectos de alumbrado público ubicados en zonas de alta exposición al vandalismo, se podrán diseñar

y proponer sistemas resistentes al vandalismo, tales como: tornillos, soldaduras, cinta bandit, candados, entre otros (Ministerio de Minas y Energía, 2009).

En la sección 500 del RETILAP se establecen los requerimientos de seguridad del sistema de alumbrado público, puesto que el objetivo de este es permitir a los usuarios de la calzada y del andén, circular sobre ellos en las horas de la noche, de manera segura, cómoda y a velocidades preestablecidas. Según el documento, la seguridad se logra si el alumbrado permite a los usuarios que circulan a velocidad normal evitar un obstáculo cualquiera. La iluminación debe permitir, en particular, ver a tiempo los bordes, las aceras, separadores, encrucijadas, señalización visual y en general toda la geometría de la vía (Ministerio de Minas y Energía, 2009).

- La seguridad de un peatón se logra si este puede distinguir el obstáculo a una distancia de 10 m o más.
- La seguridad de un automovilista depende esencialmente de su velocidad. A velocidad media de 60 km/h, él debe percibir este obstáculo a una distancia hasta 100 m. Para velocidades superiores, esta distancia oscila entre 100 y 200 m.

# 4. ASPECTOS METODOLÓGICOS

El presente capítulo presenta el procedimiento a seguir en el desarrollo del proyecto, a fin de conseguir los objetivos planteados.

## 4.1. METODOLOGÍA

El desarrollo del diseño del prototipo de alumbrado público inteligente aplicado a la ciudad de Bucaramanga se llevó a cabo en 3 fases.

### 4.1.1. Diagnóstico

Durante esta fase se hace una revisión del estado del sistema de alumbrado público de la ciudad de Bucaramanga, tomando en cuenta el contexto del problema planteado.

- Identificar el funcionamiento del sistema actual
- Identificar las mejoras que se han implementado y que se busca implementar
- Realizar una revisión en la literatura relacionada con el tema del proyecto

### 4.1.2. Diseño del framework

Durante la fase de diseño del framework se definen los criterios sobre los cuales se soportará el diseño de la arquitectura del prototipo de alumbrado público inteligente, usando como referencia los resultados obtenidos en la fase previa.

- Seleccionar los protocolos de comunicación que se implementarán en la red, teniendo en cuenta el tipo de datos y la densidad de estos en el proceso de transmisión.
- Seleccionar el dispositivo controlador del circuito que se integrará en las lámparas del alumbrado público, asegurándose de que este sea compatible con el protocolo de comunicación seleccionado.
- Realizar la selección de los sensores que sean necesarios para garantizar el funcionamiento adecuado del circuito, por ende, del sistema.

### 4.1.3. Diseño de la arquitectura del sistema

En esta fase se toman como referencia los postulados propuestos en el diseño del framework conceptual, para definir la forma en la que cada uno de los aspectos planteados se relacionan entre sí, de forma que el sistema interactúe de forma correcta.

En esta fase se busca:

- Definir requerimientos
- Seleccionar dispositivos
- Diseñar la red

# 5. RESULTADOS DEL PROYECTO

En este capítulo se presentan los resultados del proyecto, correspondientes a cada uno de los objetivos.

## 5.1. DIAGNÓSTICO DEL ALUMBRADO PÚBLICO DE LA CIUDAD DE BUCARAMANGA

En el presente apartado se muestra el resultado de la indagación respecto al estado actual del sistema de alumbrado público de la ciudad de Bucaramanga, así como los proyectos de mejoramiento en ejecución

### 5.1.1. Sistema de alumbrado público de la ciudad de Bucaramanga

El suministro de energía eléctrica para el alumbrado público en la ciudad de Bucaramanga es prestado por la Electrificadora de Santander (ESSA), así como el servicio de facturación y recaudo de impuestos relacionados con el alumbrado (ESSA, 2019).

La administración municipal se encarga de definir qué uso se da a los recursos recaudados producto de los impuestos del alumbrado público, además se encarga del mantenimiento de las luminarias, los postes y el reemplazo de las piezas que sufran daños (ESSA, 2019).

### 5.1.2. Financiamiento del alumbrado público

El financiamiento del alumbrado público de Bucaramanga es producto del impuesto creado por el Consejo municipal. Este recaudo es usado para mantenimiento, expansión del servicio o proyectos municipales (ESSA, 2019).

### 5.1.3. Luminarias

Las luminarias del alumbrado público de la ciudad de Bucaramanga han sido cambiadas en su mayoría. Inicialmente operaban las clásicas bombillas de sodio con luz amarilla. Sin embargo, la alcaldía de la ciudad implementó un proyecto de modernización bajo el concepto de sostenibilidad ambiental, mediante el cual

adquirieron 24.300 luminarias LED (ALCALDIA DE BUCARAMANGA, 2019d) y se instalaron más de 22 mil de ellas. Con esta nueva iluminación se “produce menos dióxido de carbono, se reconstruye los núcleos de vida social, cultural y comercial en las diferentes zonas de la capital santandereana” (ALCALDIA DE BUCARAMANGA, 2019b). Estas luminarias fueron instaladas en las comunas 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10 y 11 de la ciudad. El cambio implementado permite al municipio obtener eficiencia energética en pro de las políticas ambientales globales, así como generar un ahorro del 25% de energía eléctrica (ALCALDIA DE BUCARAMANGA, 2019).

Figura 3: Iluminación led en la Carrera 27

*Fuente: (Alumbrado Público de Bucaramanga, 2014)*

En la continuación del proyecto de modernización del alumbrado público de la ciudad, durante el mes de agosto, se adjudicaron los recursos económicos para la ejecución de la segunda parte del proyecto que beneficiará a las comunas 12, 13, 14, 15, 16 y 17 de la ciudad. El cambio implica la compra de 6.591 luminarias, para de esta manera actualizar el 100% de las bombillas operativas en la infraestructura de iluminación pública de Bucaramanga, haciendo uso de las restantes de la primera fase. En total se instalarán 8.148 luminarias LED (ALCALDIA DE BUCARAMANGA, 2019a).

Se espera que el proyecto finalice antes de la culminación del año 2019. Según estimaciones de la Alcaldía, como resultado, el ahorro de energía podría cuantificarse monetariamente en un ahorro cercano a los 1000 millones de pesos anuales (ALCALDIA DE BUCARAMANGA, 2019c).

### 5.1.4. Cobro del servicio de alumbrado público

El cobro del alumbrado público en la ciudad de Bucaramanga se basa en el consumo de energía eléctrica del mismo. Al no contar las luminarias con medidores de consumo, el este se obtiene, según el artículo 12 de la resolución 123 de 2011, “con base en la carga resultante de la cantidad de luminarias en funcionamiento en el municipio, multiplicada por un factor de utilización expresado en horas/día y por el número de días del periodo de facturación utilizado para el cobro” (Ministerio de Minas y Energía, 2011).

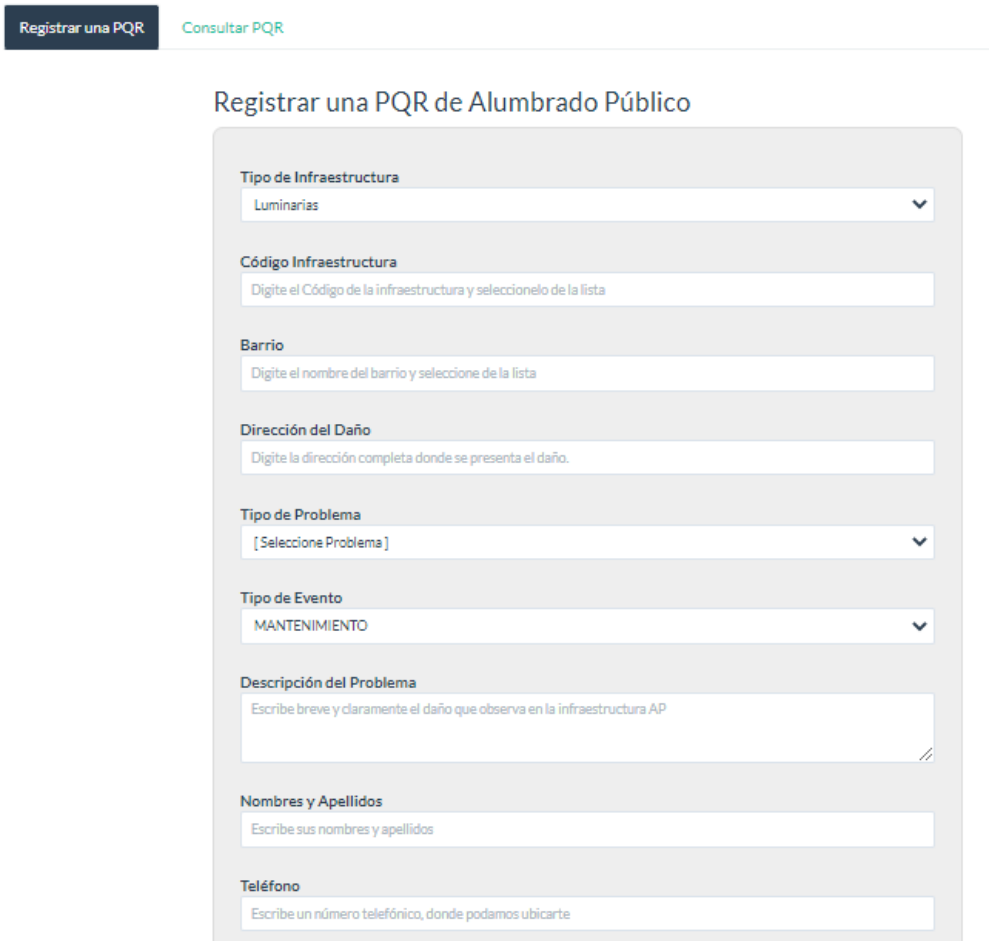
### 5.1.5. Reporte de fallas en el alumbrado público

Según la ESSA “el reporte de daños, solicitudes de instalación de luminarias y la solución de fallas en el alumbrado público, se deben tramitar en las alcaldías municipales y/ concesiones” (ESSA, 2019). Para ello se puede asistir a la oficina respectiva, llamar a los números telefónicos indicados para el municipio o hacer uso de la plataforma web alumbrado.bucaramanga.gov.co.

Hay disponibles 3 metodologías para generar el reporte de una falla:

- Asistir presencialmente a la oficina respectiva
- Llamar a los números telefónicos indicados por el municipio
- Reporte web: En la plataforma alumbrado.bucaramanga.gov.co se puede gestionar un reporte mediante un formulario que capta la información necesaria para establecer el tipo de daño, el lugar en el que se presenta y la luminaria específica.

Figura 4: Formulario de registro de daño en luminarias




*Fuente: (Registro y consulta de PQR's de alumbrado público bucaramanga.)*

Existen, sin embargo, quejas de los habitantes de algunos sectores de la ciudad, como por ejemplo en la zona del Paseo del Comercio, quienes han hecho múltiples reportes a la Oficina de Alumbrado Público buscando que se reparen las luminarias que están dañadas desde hace ya varios meses, y que representan un peligro para los habitantes del sector puesto que la oscuridad permite a los delincuentes aprovechar la situación para hacer de las suyas (Cesar Augusto Gonzalez Quiroga, 2020).

### 5.1.6. Mapa de luminarias de la ciudad

En la plataforma web alumbrado.bucaramanga.gov.co existe un mapa mediante el cual se muestran todas las luminarias instaladas en la ciudad de Bucaramanga. Cada luminaria está etiquetada con un código único y la dirección en la que está instalada.

Figura 5: Mapa de las luminarias de la ciudad de Bucaramanga

*Fuente: (Luminarias de la ciudad.)*

### 5.1.7. Proyectos relacionados con el alumbrado público

En este apartado se muestran los proyectos de la alcaldía de Bucaramanga enfocados en el mejoramiento del sistema de alumbrado público de la ciudad.

#### 5.1.7.1. Poda de árboles y despeje de luminarias

Buscando generar “entornos más seguros y evitar posibles accidentes que afecten los techos de las viviendas o los transeúntes” (Félix Cristancho, 2020), se inició el proceso para la adjudicación de un contrato para un proyecto que busca despejar las áreas en las que las ramas de los árboles obstruyen las luminarias, o representan un peligro para la circulación en la vía. La inversión para el contrato ronda los $811 millones de pesos.

#### 5.1.7.2. Licitación para el mantenimiento del alumbrado público

Esta licitación busca adjudicar un contrato de aproximadamente $1472 millones de pesos, con el que se elegirá una propuesta entre las 39 presentadas, para efectuar obras de mantenimiento en el alumbrado público de Bucaramanga, así como de los 3 corregimientos de la ciudad. Se espera que la duración de las obras sea de 7 meses, iniciando en junio (Prensa Alcaldía de Bucaramanga, 2020).

#### 5.1.7.3. Reactivación de las obras de modernización del alumbrado público

La situación extraordinaria presentada en el país por la pandemia provocada por el Sars-Cov-2, así como las medidas de aislamiento preventivo obligatorio

tomadas por el gobierno nacional para frenar la expansión del virus, generaron la detención en las obras de modernización del alumbrado público de Bucaramanga.

Posteriormente el gobierno incluyó el desarrollo de obras civiles entre las excepciones al decreto de aislamiento, por lo que se esperaba que desde el 20 de abril se reactivaran las actividades en los trabajos de modernización del alumbrado (ALCALDIA DE BUCARAMANGA, 2020). Sin embargo, la reanudación se dio recién el 03 de agosto en las comunas 12, 13, 14, 15, 16 y 17. “En barrios como Cabecera, Pan de Azúcar, Terrazas, Antonia Santos, entre otros, aún existen bombillos de sodio” (José Luis Pineda, 2020). Según las proyecciones, al finalizar el año 2020 el 100% del área urbana de la ciudad contará con iluminación LED.

Según el coordinador de la Oficina de Alumbrado Público de Bucaramanga, Carlos Hernández, la nueva tecnología electrónica en las luminarias permitirá la futura incorporación de “dispositivos tecnológicos complementarios para tele medir y tele gestionar el sistema de alumbrado público” los cuales “harán posible que la ‘Ciudad Bonita’ cuente con un sistema inteligente, que realizaría el apagado, encendido y ajustaría la intensidad de cada luz de forma automática” (José Luis Pineda, 2020).

#### 5.1.7.4. Alumbrado público inteligente para Bucaramanga

El gobierno local de la ciudad de Bucaramanga se ha propuesto invertir cerca de $45 mil millones de pesos en tecnología para implementar un sistema de alumbrado público. Según Carlos Hernández, coordinador de la Oficina de Alumbrado Público de Bucaramanga, se busca instalar fotocontroles, de manera que se pueda supervisar el funcionamiento, obtener datos de consumo, así como si la luminaria está en funcionamiento o no. Además, las luminarias podrán atenuar la intensidad de iluminación para ahorrar energía. Se espera instalar unos 30 mil puntos de fotocontrol en primer lugar en el área urbana, posteriormente en el área rural (José Luis Pineda, 2020).

Se planea que las 30 mil luminarias modificadas puedan “enviar los datos generados a un centro integrado de control, a través de una gran big data, que nos permita hacer gestiones inmediatas” (José Luis Pineda, 2020). Las nuevas luminarias instaladas mediante el proyecto de modernización del alumbrado público permitirán instalar elementos como sensores, por ejemplo, para medir la polución.

## 5.2. DISEÑO DEL FRAMEWORK CONCEPTUAL

En el presente apartado se presenta el diseño del framework conceptual planteado para el sistema de alumbrado público inteligente en la ciudad de Bucaramanga.

El modelo se basa en la arquitectura TCP/IP, la cual es considerada una de las bases de internet. “Con los protocolos que se engloban en este término es posible transportar paquetes de datos tanto en una red de área local (LAN) como en una red de área amplia (WAN), y también en la World Wide Web” (Ionos, 2020).

La arquitectura se describe en las siguientes capas: capa física, capa de comunicación, capa de servicios y capa de aplicación.

En la capa física se encuentran las luminarias y el sistema embebido, que incluye el módulo fotosensible LM393, el módulo PIR HC-SR501 y el sensor de corriente ACS712, así como el circuito controlador de intensidad de iluminación. Los datos tomados por los sensores se envían a la capa de comunicación, en donde hacen presencia las tecnologías ZigBee y 4G, mediante la cuales se establece la comunicación entre la red de sensores, y con el servidor web. En la capa de servicios se encuentra el procesamiento y almacenamiento en la nube de los datos recibidos desde la red, y finalmente, en la capa de aplicación se presenta la aplicación web, encargada de permitir la visualización de información y el monitoreo de la operación de la red de sensores.

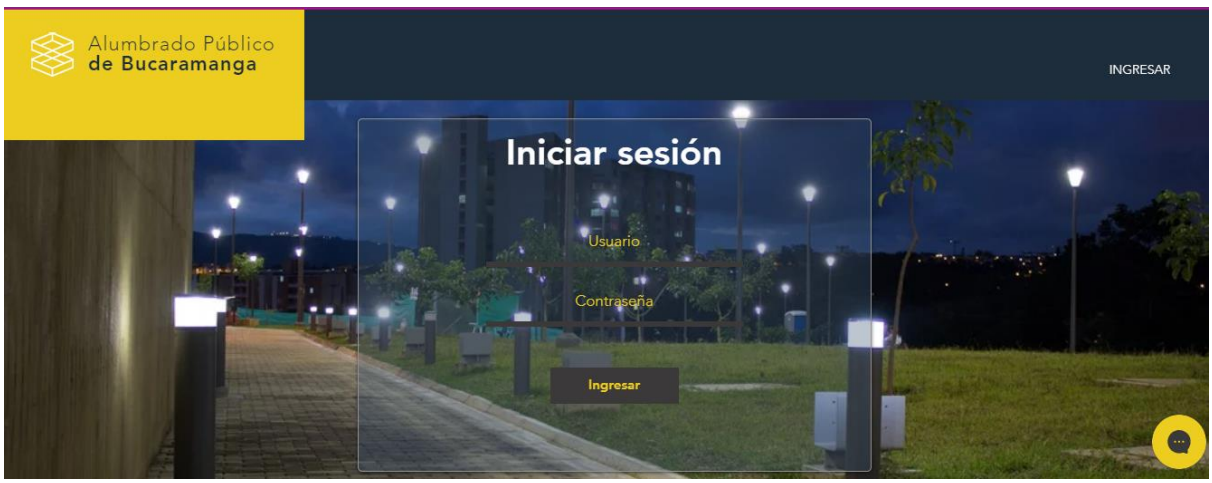
Figura 6: Framework conceptual del sistema

*Fuente: Elaboración propia*

### 5.2.1. Diseño de la plataforma web

En las figuras 6, 7, 8 y 9 se presentan algunas de las vistas principales de la propuesta de plataforma web para el sistema de alumbrado público inteligente.

Figura 7: Vista de inicio de sesión

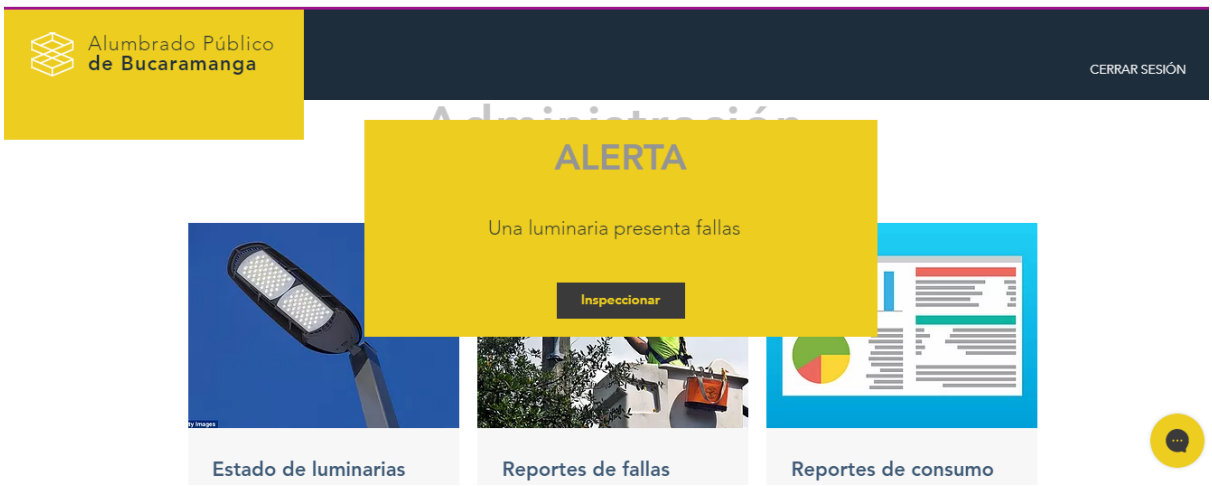



*Fuente: Elaboración propia*

Figura 8: Vista panel de administración

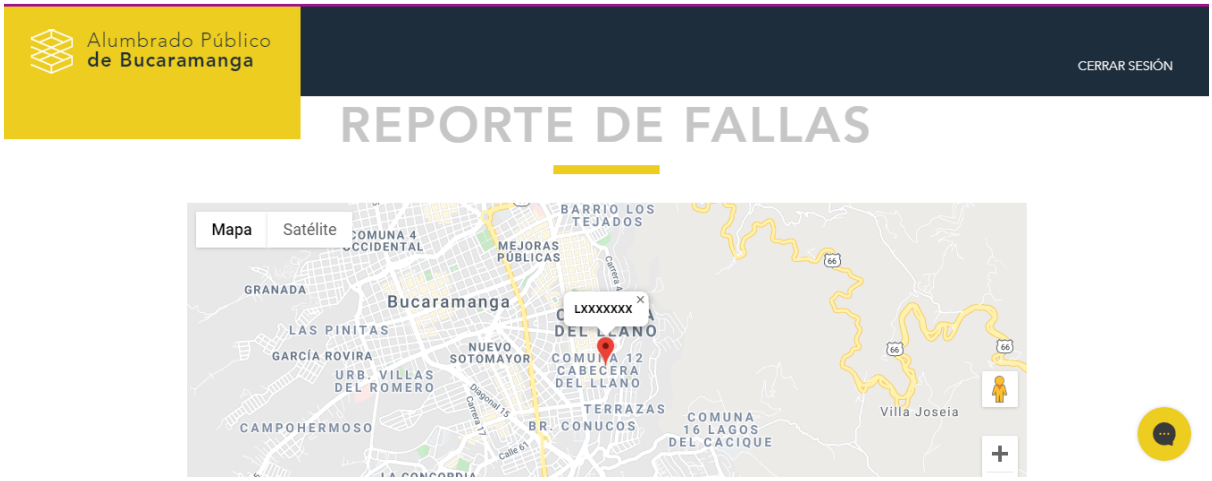
*Fuente: Elaboración propia*

Figura 9: Vista de alerta generada




*Fuente: Elaboración propia*

Figura 10: Vista de ubicación relacionada al reporte de falla



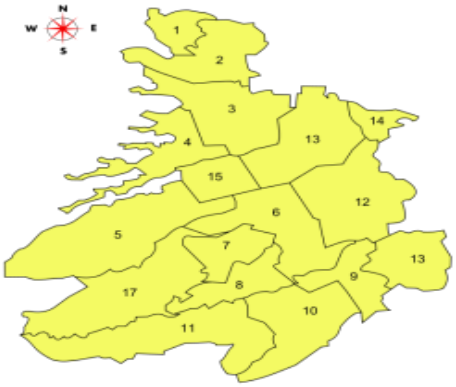

*Fuente: Elaboración propia*

## 5.3. DISEÑO DE LA ARQUITECTURA DEL SISTEMA

### 5.3.1. Caso de estudio

El proyecto está enfocado a implementarse en la ciudad de Bucaramanga, en el departamento de Santander. La ciudad cuenta con alrededor de 580.000 habitantes, su área es de 162Km2 y está dividida en 17 comunas, que son: 01 - Comuna Norte, 02 - Comuna Nororiental, 03 – Comuna San Francisco, 04 – Comuna Occidental, 05 – Comuna García Rovira, 06 – Comuna La Concordia, 07 – Comuna Ciudadela Real de Minas, 08 – Comuna Suroccidente, 09 – Comuna La Pedregosa, 10 -Comuna Provenza, 11 – Comuna Sur, 12 – Comuna Cabecera del Llano, 13 – Comuna Oriental, 14 – Comuna Morrorico, 15 – Comuna Centro, 16 – Comuna Tejar, 17 – Comuna Mutis.

Figura 11: División político-urbana de Bucaramanga

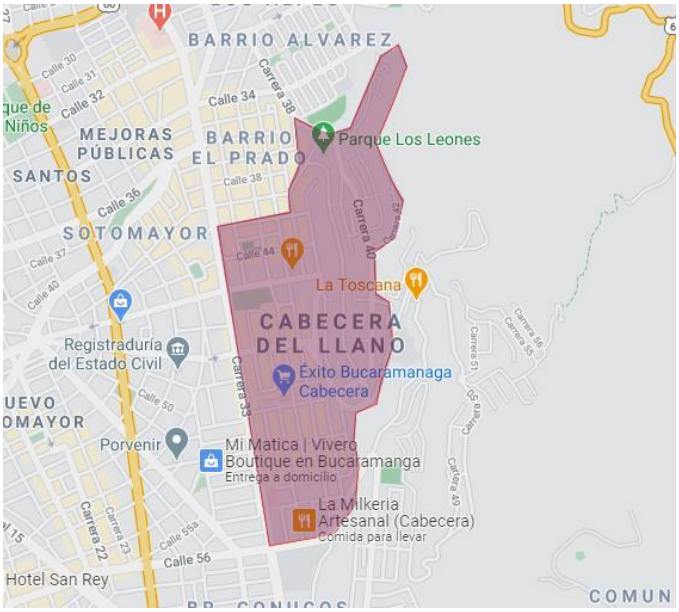



*Fuente: (Alcaldía de Bucaramanga, 2018)*

### 5.3.2. Zona de cobertura

En este apartado se presenta la zona específica en la que se enfoca el sistema de alumbrado público. El sistema propuesto se plantea para el barrio Cabecera del Llano, ubicado en la Comuna 12 – Cabecera del llano.

Figura 12: Zona de cobertura




*Fuente: Elaboración propia*

### 5.3.3. Requerimientos del sistema

En la presente sección se muestran los requerimientos funcionales y no funcionales del sistema de alumbrado público inteligente.

#### 5.3.3.1. Requerimientos funcionales

Las tablas en el rango de la 2 a la 22 presentan la descripción de los requerimientos funcionales, divididos en dos apartados: requerimientos del sistema embebido y requerimientos de la plataforma de control del sistema.

- Requerimientos del sistema embebido

*Tabla 4: Requerimiento funcional REQ-FSE-01*

| REQ-FSE-01 | |
|---|---|
| Requerimiento | Leer datos de intensidad de luminosidad del ambiente: El sistema debe permitir obtener la intensidad de luz ambiente. |
| Prioridad | Alta |
| Precondición | |
| Postcondición | Activa el sensor de movimiento. |

*Fuente: Elaboración propia*

*Tabla 5: Requerimiento funcional REQ-FSE-02*

| REQ-FSE-02 | |
|---|---|
| Requerimiento | Detectar movimiento en la vía: Debe poder detectar los vehículos y peatones que circulen en la zona en la que se implemente el sistema. |
| Prioridad | Alta |
| Precondición | El sistema debe activarse mediante la lectura del LDR. |
| Postcondición | Aumenta al máximo la intensidad de iluminación. |

*Fuente: Elaboración propia*

*Tabla 6: Requerimiento funcional REQ-FSE-03*

| REQ-FSE-03 | |
|---|---|
| Requerimiento | Controlar la intensidad de luminosidad: El sistema debe aumentar la intensidad de luz emitida por la lámpara cuando se detecte movimiento, y atenuar la luminosidad en el caso contrario. |
| Prioridad | Alta |
| Precondición | Se debe detectar movimiento. |
| Postcondición | N/A |

*Fuente: Elaboración propia*

*Tabla 7: Requerimiento funcional REQ-FSE-04*

| REQ-FSE-04 | |
|---|---|
| Requerimiento | Medir el consumo eléctrico del alumbrado: El sistema debe tener la capacidad de medir el consumo eléctrico en la lámpara en la que esté instalado el dispositivo. |
| Prioridad | Alta |
| Precondición | Las luminarias deben estar encendidas. |
| Postcondición | N/A |

*Fuente: Elaboración propia*

*Tabla 8: Requerimiento funcional REQ-FSE-05*

| REQ-FSE-05 | |
|---|---|
| Requerimiento | Establecer comunicación: Los dispositivos instalados en la lámpara deben comunicarse con las lámparas vecinas y con el servidor web para leer datos externos. |
| Prioridad | Alta |
| Precondición | N/A |
| Postcondición | Transmite los datos necesarios |

*Fuente: Elaboración propia*

*Tabla 9: Requerimiento funcional REQ-FSE-06*

| REQ-FSE-06 | |
|---|---|
| Requerimiento | Transmitir datos: Los dispositivos en cada lámpara deben transmitir los datos recopilados a un servidor web. |
| Prioridad | Alta |
| Precondición | Establecer comunicación |
| Postcondición | N/A |

*Fuente: Elaboración propia*

*Tabla 10: Requerimiento funcional REQ-FSE-07*

| REQ-FSE-07 | |
|---|---|
| Requerimiento | Reportar fallas: El sistema debe poder generar un reporte de falla cuando sea necesario. |
| Prioridad | Alta |
| Precondición | Lectura del sensor de corriente. |
| Postcondición | Envía un dato de alerta. |

*Fuente: Elaboración propia*

- Requerimientos del sistema de la plataforma de control

*Tabla 11: Requerimiento funcional REQ-FSW-01*

| REQ-FSW-01 | |
|---|---|
| Requerimiento | Iniciar sesión: El sistema debe permitir el ingreso mediante un usuario y contraseña. |
| Prioridad | Alta |
| Precondición | Debe existir un administrador de sistema único.<br>La plataforma está conectada a una base de datos relacionada. |
| Postcondición | Al usuario se le asigna un rol (administrador, usuario común). |

*Fuente: Elaboración propia*

*Tabla 12: Requerimiento funcional REQ-FSW-02*

| REQ-FSW-02 | |
|---|---|
| Requerimiento | Cerrar sesión: El sistema debe permitir finalizar una sesión activa. |
| Prioridad | Media |
| Precondición | Debe existir una sesión abierta. |
| Postcondición | Luego de un tiempo de inactividad, la sesión se debe cerrar automáticamente. |

*Fuente: Elaboración propia*

*Tabla 13: Requerimiento funcional REQ-FSW-03*

| REQ-FSW-03 | |
|---|---|
| Requerimiento | Recuperar clave: El sistema debe permitir tener un mecanismo de recuperación de contraseña. |
| Prioridad | Alta |
| Precondición | El usuario debe existir en la base de datos.<br>El usuario debe tener acceso al email vinculado a la cuenta. |
| Postcondición | Por medio del email el usuario recibirá un vínculo para registrar la nueva contraseña. |

*Fuente: Elaboración propia*

*Tabla 14: Requerimiento funcional REQ-FSW-04*

| REQ-FSW-04 | |
|---|---|
| Requerimiento | Rol de usuario: El sistema debe poseer roles de usuario. |
| Prioridad | Alta |
| Precondición | El administrador del sistema debe ser quien registra el rol de usuario. |
| Postcondición | El usuario accederá a información determinada según su rol. |

*Fuente: Elaboración propia*

*Tabla 15: Requerimiento funcional REQ-FSW-05*

| REQ-FSW-05 | |
|---|---|
| Requerimiento | Crear usuario: El sistema debe permitir al administrador crear usuarios. |
| Prioridad | Alta |
| Precondición | El administrador es el único que puede crear usuarios.<br>El usuario no debe existir en la DB.<br>Se deben ingresar los datos correspondientes. |
| Postcondición | N/A |

*Fuente: Elaboración propia*

*Tabla 16: Requerimiento funcional REQ-FSW-06*

| REQ-FSW-06 | |
|---|---|
| Requerimiento | Modificar usuario: El sistema debe permitir que el administrador modifique usuarios. |
| Prioridad | Media |
| Precondición | Se debe tener el rol de administrador.<br>El usuario debe existir en la DB. |
| Postcondición | N/A |

*Fuente: Elaboración propia*

*Tabla 17: Requerimiento funcional REQ-FSW-07*

| REQ-FSW-07 | |
|---|---|
| Requerimiento | Eliminar usuario: El sistema debe permitir que el administrador elimine usuarios. |
| Prioridad | Media |
| Precondición | Se debe ser administrador.<br>El usuario debe existir en la DB. |
| Postcondición | N/A |

*Fuente: Elaboración propia*

*Tabla 18: Requerimiento funcional REQ-FSW-08*

| REQ-FSW-08 | |
|---|---|
| Requerimiento | Verificar usuarios únicos: El sistema debe validar que no existan usuarios repetidos. |
| Prioridad | Alta |
| Precondición | El usuario debe ingresar el nombre de usuario para comparar. |
| Postcondición | Si el usuario existe, se solicita un nombre de usuario diferente. |

*Fuente: Elaboración propia*

*Tabla 19: Requerimiento funcional REQ-FSW-09*

| REQ-FSW-09 | |
|---|---|
| Requerimiento | Conectarse al servidor web: El sistema debe conectarse al servidor web. |
| Prioridad | Alta |
| Precondición | N/A |
| Postcondición | Se obtienen los datos del servidor. |

*Fuente: Elaboración propia*

*Tabla 20: Requerimiento funcional REQ-FSW-10*

| REQ-FSW-010 | |
|---|---|
| Requerimiento | Obtener datos del servidor: El sistema debe poder obtener los datos alojados en el servidor web. |
| Prioridad | Alta |
| Precondición | Establecer conexión con el servidor. |
| Postcondición | Se visualizan los datos en el sistema. |

*Fuente: Elaboración propia*

*Tabla 21: Requerimiento funcional REQ-FSW-11*

| REQ-FSW-11 | |
|---|---|
| Requerimiento | Almacenar los datos: El sistema debe poder almacenar datos en una base de datos local. |
| Prioridad | Alta |
| Precondición | Se deben obtener los datos del servidor. |
| Postcondición | N/A |

*Fuente: Elaboración propia*

*Tabla 22: Requerimiento funcional REQ-FSW-12*

| REQ-FSW-12 | |
|---|---|
| Requerimiento | Visualizar información: El sistema debe permitir la visualización de los datos obtenidos. |
| Prioridad | Alta |
| Precondición | Se deben obtener los datos del servidor. |
| Postcondición | |

*Fuente: Elaboración propia*

*Tabla 23: Requerimiento funcional REQ-FSW-13*

| REQ-FSW-13 | |
|---|---|
| Requerimiento | Generar alertas: El sistema debe generar alertas cuando sea necesario. |
| Prioridad | Alta |
| Precondición | Detectar el mal funcionamiento de un nodo de la red. |
| Postcondición | Presenta un mensaje en la interfaz del sistema. |

*Fuente: Elaboración propia*

*Tabla 24: Requerimiento funcional REQ-FSW-14*

| REQ-FSW-14 | |
|---|---|
| Requerimiento | Enviar órdenes: El sistema debe poder enviar órdenes al servidor web. |
| Prioridad | Alta |
| Precondición | Establecer conexión con el servidor.<br>Un usuario debe tener la sesión activa. |
| Postcondición | |

*Fuente: Elaboración propia*

#### 5.3.3.2. Requerimientos no funcionales

Las tablas en el rango de la 23 a la 29 presentan la descripción de los requerimientos no funcionales del sistema.

*Tabla 25: Requerimiento funcional REQ-NFS-01*

| REQ-NFS-01 | |
|---|---|
| Requerimiento | Disponibilidad: El sistema debería permanecer activo el 100% del tiempo mientras posea alimentación eléctrica. |
| Prioridad | Media |

*Fuente: Elaboración propia*

*Tabla 26: Requerimiento funcional REQ-NFS-02*

| REQ-NFS-02 | |
|---|---|
| Requerimiento | Escalabilidad: El sistema debe desarrollarse de forma que permita la integración de nuevos módulos, de manera que se puedan implementar mejoras al sistema. |
| Prioridad | Media |

*Fuente: Elaboración propia*

*Tabla 27: Requerimiento funcional REQ-NFS-03*

| REQ-NFS-03 | |
|---|---|
| Requerimiento | Seguridad: El acceso al sistema será restringido, tanto en la base de control, como en la comunicación de cada uno de los nodos, de manera que no sea accesible para personal no deseado. |
| Prioridad | Media |

*Fuente: Elaboración propia*

*Tabla 28: Requerimiento funcional REQ-NFS-04*

| REQ-NFS-04 | |
|---|---|
| Requerimiento | Usabilidad: El sistema no debe generar alteraciones en la interacción con el usuario final, y su interfaz debe ser intuitiva para el personal de control. |
| Prioridad | Media |

*Fuente: Elaboración propia*

*Tabla 29: Requerimiento funcional REQ-NFS-05*

| REQ-NFS-05 | |
|---|---|
| Requerimiento | Mantenibilidad: El sistema debe tener la capacidad de asimilar modificaciones relacionadas a mejoras o corrección de errores, sin impactar sobremanera su utilidad y funcionamiento. |
| Prioridad | Media |

*Fuente: Elaboración propia*

*Tabla 30: Requerimiento funcional REQ-NFS-06*

| REQ-NFS-06 | |
|---|---|
| Requerimiento | Tolerancia: El sistema debe tener la capacidad de mantener su funcionamiento aun cuando se presente alguna falla en alguno de sus componentes. |
| Prioridad | Alta |

*Fuente: Elaboración propia*

*Tabla 31: Requerimiento funcional REQ-NFS-07*

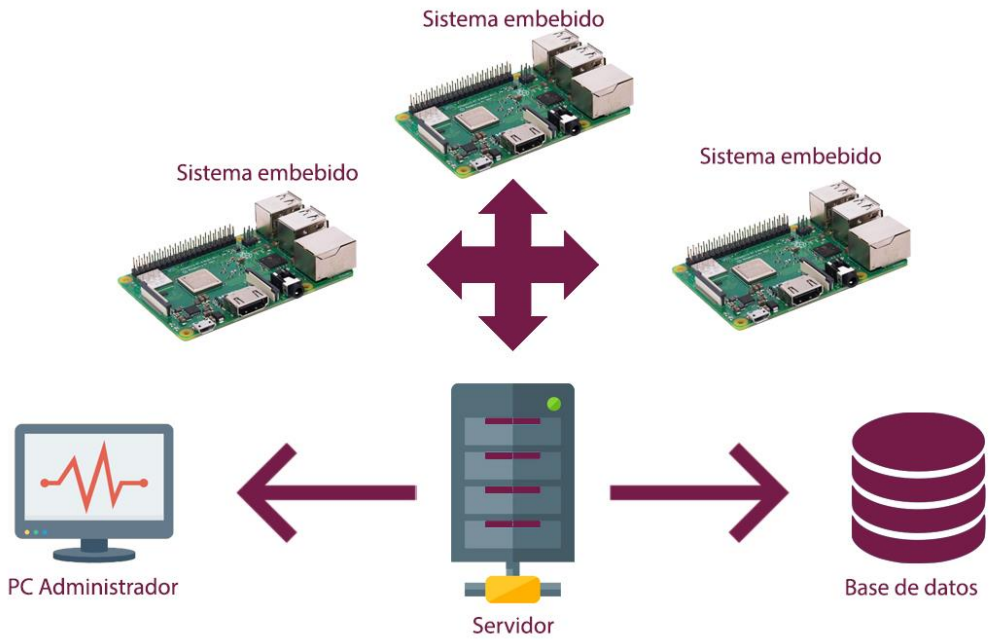
| REQ-NFS-07 | |
|---|---|
| Requerimiento | Confiabilidad: El sistema debe otorgar un alto índice de seguridad a los usuarios en el cumplimiento de sus funciones. |
| Prioridad | Media |

***Fuente**: Elaboración propia*

### 5.3.4. Arquitectura del servidor

En la Figura 13 se define la arquitectura cliente/servidor, siendo esta una arquitectura distribuida, que permite a los usuarios el acceso a la información, permite la fácil integración de nuevas tecnologías, permitiendo de esta manera el crecimiento de la infraestructura.

Figura 13: Arquitectura Cliente/Servidor




*Fuente: Elaboración propia*

En el servidor se almacena la plataforma web y los datos, razón por la cual la capacidad de almacenamiento debe ser suficiente. Por otro lado, la memoria RAM recibirá múltiples peticiones que han de requerir almacenamiento, por lo que debe tener una capacidad que le permita funcionar correctamente.

El servidor ejecutará el sistema operativo Linux, con el LitteSpeed, puesto que este servidor tiene la capacidad de soportar altas cantidades de conexiones simultáneas, con un bajo consumo de recursos (Esteban Borges, 2018).

*Tabla 32: Características del servidor*

| Característica | Parámetro |
|---|---|
| Procesador | Intel Xeon |
| Velocidad de procesamiento | 2.93 GHz |
| Número de procesadores | 2 |
| Memoria RAM | 64 GB |
| Disco duro | 8TB |
| Interfaz de red | NIC |

*Fuente: Elaboración propia a partir de datos de Dell*

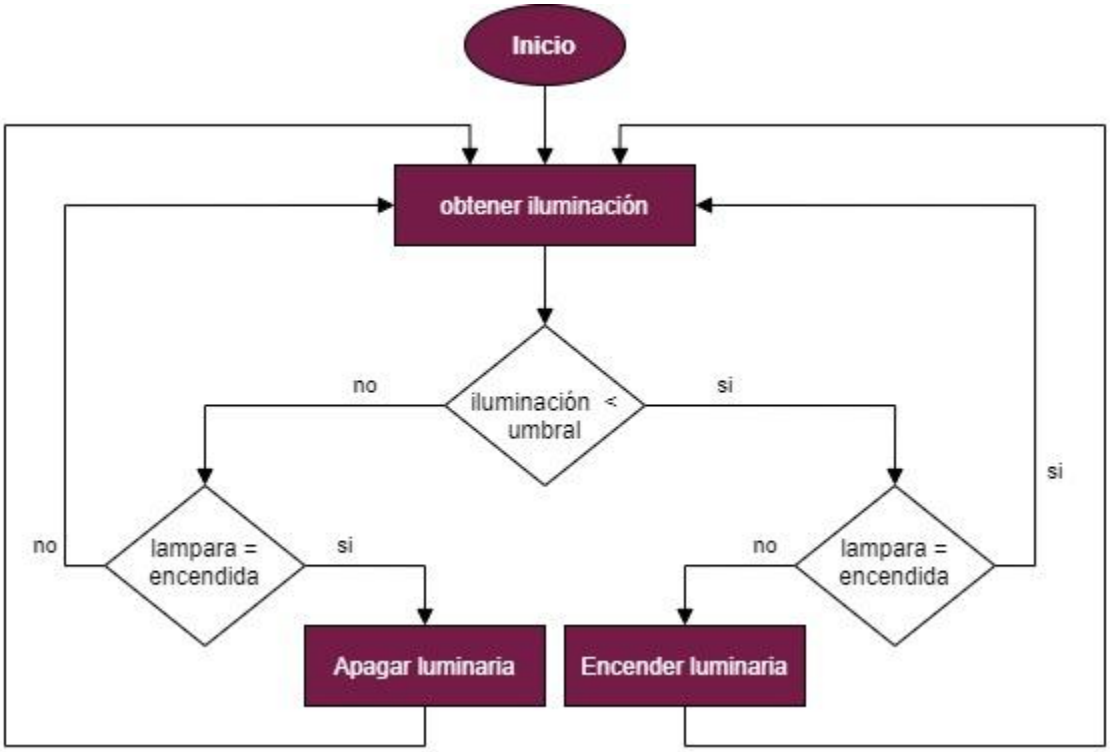
### 5.3.5. Descripción del sistema

En este apartado se presenta la descripción de las principales funciones que deberá llevar a cabo el sistema, de forma que su funcionamiento cumpla con los requerimientos planteados.

#### 5.3.5.1. Encendido autónomo

Por medio de un sensor de LDR, la unidad en la lámpara obtiene datos relativos a la intensidad de luminosidad en el ambiente. En caso de que dicha iluminación sea inferior a un umbral establecido, la lámpara inicia su operación

Figura 14: Diagrama de flujo del encendido autónomo

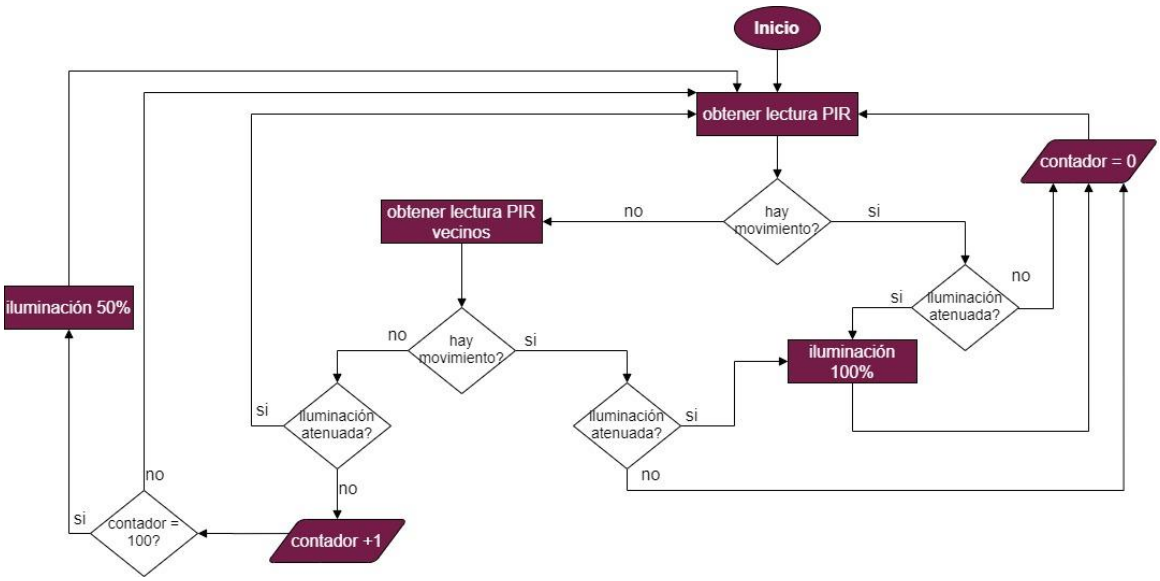



*Fuente: Elaboración propia*

#### 5.3.5.2. Atenuación de la iluminación

Cada luminaria tiene la capacidad de detectar el tránsito vehicular o peatonal en la vía. Cuando se obtiene una lectura, la luminaria se enciende al 100% de su capacidad. Cuando se deja de detectar algún movimiento, se atenúa la luminosidad emitida por la luminaria hasta un 50%.

Figura 15: Diagrama de flujo atenuación de iluminación

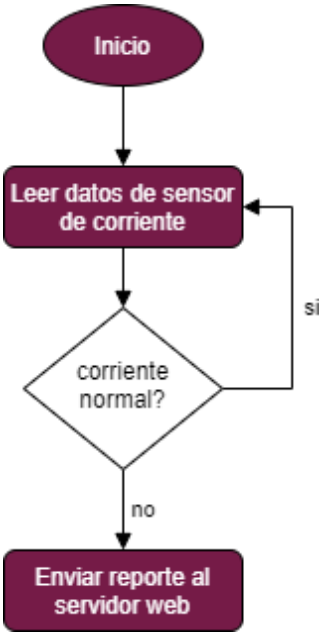



*Fuente: Elaboración propia*

### 5.3.5.3. Detección de fallas

La unidad en la lámpara lleva un monitoreo constante del funcionamiento, de forma que cuando se detecte que este no es el adecuado, se emite un mensaje de alerta.

Figura 16: Diagrama de flujo de detección de fallas

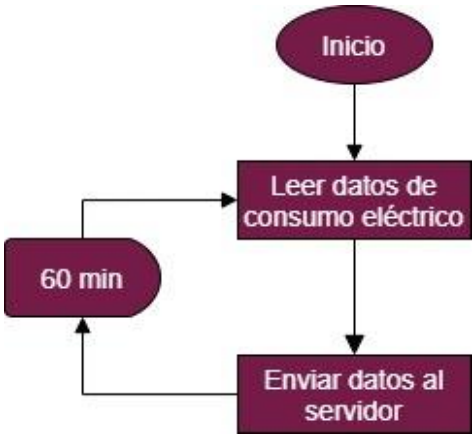



*Fuente: Elaboración propia*

#### 5.3.5.4. Mediciones de consumo eléctrico

Mediante un sensor de corriente se tomarán datos relativos al consumo eléctrico de las luminarias mientras estas se encuentren en funcionamiento.

Figura 17: Diagrama de flujo de la medición de consumo




*Fuente: Elaboración propia*

#### 5.3.5.5. Comunicación

Cada una de las luminarias debe tener la capacidad de conectarse con las luminarias vecinas, de forma que el funcionamiento del sistema completo sea sincronizado y seguro.

Figura 18: Diagrama de flujo del encendido autónomo

*Fuente: Elaboración propia*

#### 5.3.5.6. Transmisión y almacenamiento de datos

Cada una de las luminarias debe tener la capacidad de conectarse a un servidor web, con el fin de transmitir los datos que se obtengan en cuanto al consumo eléctrico y al estado de cada una de las lámparas, es decir, si se encuentra encendida, apagada, o presenta alguna falla técnica. La transmisión de datos se debe dar en períodos de tiempo preestablecidos.

Figura 19: Diagrama de flujo de transmisión de datos

*Fuente: Elaboración propia*

#### 5.3.5.7. Supervisión desde un centro de control

El sistema debe contar con un centro de control desde el cual se tenga acceso a los datos almacenados en el servidor web, de forma que el personal encargado de la administración del sistema de alumbrado público pueda monitorear en tiempo real el funcionamiento.

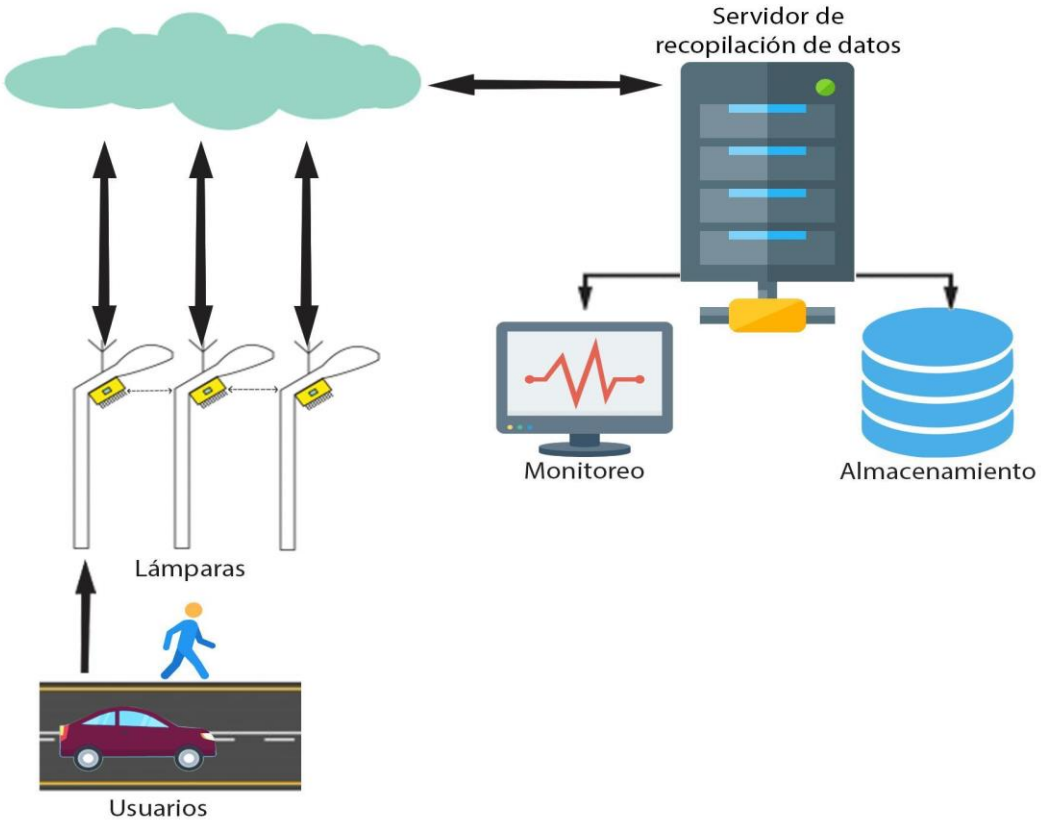
Figura 20: Diagrama de flujo de supervisión desde un centro de control

***Fuente**: Elaboración propia*

### 5.3.6. Diseño de la red de sensores

Cada nodo de la red estará instalado en una lámpara del sistema de alumbrado público, su función será tomar los datos relativos a la intensidad de iluminación, el movimiento de peatones o vehículos, el consumo eléctrico en la luminaria, así como alertar algún fallo presentado. Por otro lado, para asegurar un funcionamiento adecuado, cada nodo debe comunicarse con los nodos vecinos y además deben enviar los datos de consumo eléctrico y el estado de la luminaria a un servidor web.

Figura 21: Arquitectura general del sistema




*Fuente: Elaboración propia*

### 5.3.6.1. Tecnología de comunicación

En la siguiente tabla se presentan algunas de las tecnologías de comunicación consultadas.

*Tabla 33: Comparativa de las tecnologías de comunicación*

| Tecnología | Estándar | Banda de frecuencia | Cobertura | Tasa de transmisión | Encriptación |
|---|---|---|---|---|---|
| **Wi-Fi** | 802.11 | 2.4GHz @11g<br>5GHz @11a | 30m @11a-5GHz<br>100m @11b-2.4GHz<br>100m @11g-2.4GHz | 1-2Mb/s @11-2.4GHz<br>54Mb/s @11a-5GHz<br>11Mb/s @11b-2.4GHz<br>54Mb/s @11g-2.4GHz | WPA, WEP |
| **ZigBee** | 802.15.4 | 868/915 MHz<br>2.4GHz | 10-100m | 250Kb/s @2.4GHz<br>40Kb/s @915MHz<br>20Kb/s @868MHz | AES |
| **WiMax** | 802.16 | 2.3GHz<br>3.5GHz | 8-31Km @2.3GHz - 3.5GHz<br>8-10 Km dispositivos móviles | 75Mb/s @2.3GHz - 3.5GHz<br>6Mb/s dispositivos móviles | x.509 con DES<br>en modo CBC |

| Tecnología | Estándar | Banda de frecuencia | Cobertura | Tasa de transmisión | Encriptación |
|---|---|---|---|---|---|
| **Red Móvil** | 4G | 1700MHz<br>1900MHz<br>2100MHz<br>2600MHz | 16Km | 20-100Mbps | 3GPP |
| **Red Móvil** | 5G | Inferior a 1GHz<br>Entre 3.3-3.8GHz (En estudio)<br>Entre 3.8-4.2GHz (En estudio)<br>Entre 4.8-4.99GHz(En estudio) | 300m | 10Gbps máximo | No disponible |

*Fuente: Elaboración propia*

Para la comunicación entre los nodos de la red se hará uso de la tecnología ZigBee, porque estos dispositivos están diseñados para implementarse en redes que requieren un bajo consumo eléctrico (Shahin Farahani, 2008). Además, pueden mantenerse en un modo de ahorro, aspecto que es esencial puesto que el sistema, en la mayoría de los casos, debería estar activo principalmente durante las horas de la noche.

En cuanto al alcance de la señal de transmisión, esta varía dependiendo del dispositivo específico que se use, sin embargo, los 100 metros de alcance máximo (Shahin Farahani, 2008), son suficientes para que cada lámpara pueda establecer una conexión con las luminarias más cercanas.

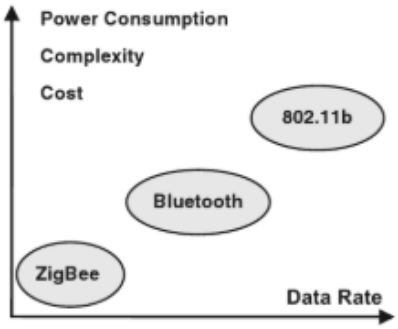
Otro aspecto esencial es que una red que implementa ZigBee puede tener, en teoría, hasta cerca de 65000 nodos (Javier Martín Moreno & Daniel Ruiz Fernández, 2007), cantidad que sería suficiente para cubrir completamente la red de alumbrado pública de la ciudad de Bucaramanga, que se compone de alrededor de 50000 luminarias.

Un punto para tener en cuenta es su velocidad de transferencia de datos, que oscila entre los 20kbps y 250kbps (Shahin Farahani, 2008). Sin embargo, esto no representa un obstáculo relevante puesto que la cantidad de datos a transmitir entre los nodos es baja.

Otras características importantes son:

- Es una tecnología de bajo costo de implementación
- Un nodo ZigBee requiere alrededor del 10% del hardware de un nodo WiFi
- El consumo energético es menor en comparación con otras tecnologías
- Es escalable
- Su implementación es simple
- Reduce tiempos de espera en el envío y recepción de paquetes

Figura 22: Comparativa de Zigbee con Bluetooth y IEEE 802.11.b




| | Data Rate | Typical Range | Application Examples |
|---|---|---|---|
| ZigBee | 20 to 250 Kbps | 10–100 m | Wireless Sensor Networks |
| Bluetooth | 1 to 3 Mbps | 2–10 m | Wireless Headset Wireless Mouse |
| IEEE 802.11b | 1 to 11 Mbps | 30–100 m | Wireless Internet Connection |

*Fuente: (Shahin Farahani, 2008)*

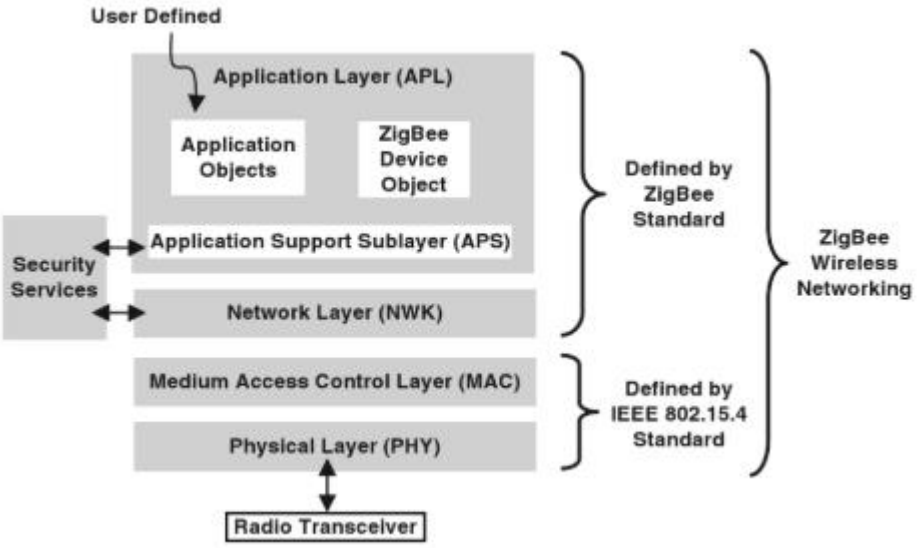
El anterior gráfico ilustra perfectamente la comparación de ZigBee con otras tecnologías. Sacrifica capacidad de transmisión, pero brinda bajo costo, baja complejidad y bajo consumo eléctrico.

#### 5.3.6.2. ZigBee

ZigBee es un estándar desarrollado por la ZigBee Alliance, que define una serie de protocolos de comunicación para redes de bajo costo y baja tasa de transmisión de datos, en las bandas de frecuencias de 868MHz para américa, 915MHz para Europa y 2.5GHz a nivel global (Shahin Farahani, 2008). Esta última banda suele ser la más utilizada.

ZigBee (Shahin Farahani, 2008) toma como referencia el modelo de capas definido en el protocolo IEEE 802.15.4, manteniendo las capas de nivel físico (PHY) y Control de Acceso al Medio (MAC). Se incorporan las Capas de Red (NWK) y Aplicación (APL).

Figura 23: Capas de ZigBee




*Fuente: (Shahin Farahani, 2008)*

- **Capa Física (PHY):** Es la responsable de la transmisión y recepción de datos haciendo uso de un cierto canal de radio y de acuerdo con una técnica de difusión y modulación específica. La capa física también permite una selección dinámica de canales, escanear canales y detectar energía del canal actual (Cunha, Koubaa, Severino, & Alves, Oct 2007).

- **Capa de Control de Acceso al Medio (MAC):** El propósito de la capa MAC es proveer una interfaz entre la Capa Física (PHY) y la Capa de Aplicación (APS) (Shahin Farahani, 2008).

- **Capa de Red (NWK):** La capa de red actúa como interfaz, permitiendo ofrecer los servicios necesarios a la capa inmediatamente superior en el modelo, la Capa de Aplicación (APS), para realizar operaciones sobre la Capa MAC. Además, es la responsable de gestionar la formación y el enrutamiento de la red (Shahin Farahani, 2008).

- **Capa de aplicación (APS):** Es la responsable de mantener el rol del nodo en la red, filtrar paquetes a nivel de aplicación, mantener la relación de grupos y dispositivos con los que la aplicación interactúa, así como simplificar el envío de datos a diferentes nodos de la red (Aline Hernández Alcántara, 2017).

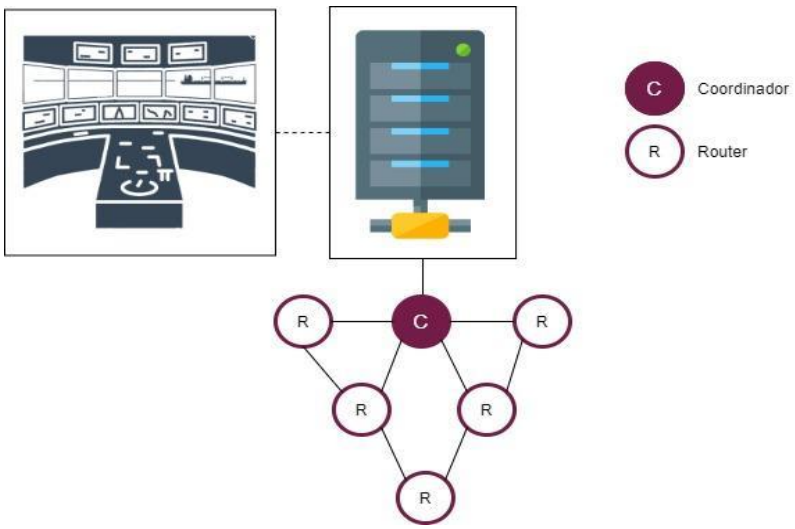
#### 5.3.6.3. Topologías de red

ZigBee, en su capa de red, soporta varias alternativas en cuanto a la configuración de la red de sensores. Para este caso se presentan las siguientes:

- Topología en malla

  Todos los nodos actúan como router, pudiendo establecer comunicación unos con otros y con el coordinador de la red, pero solo en caso de que los demás nodos se encuentren en el rango de alcance (Cunha, Koubaa, Severino, & Alves, Oct 2007).

Figura 24: Topología de malla

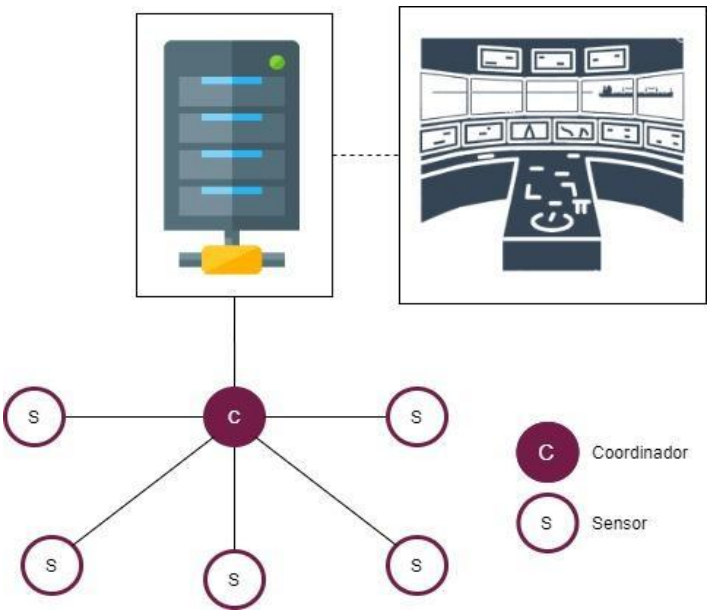



*Fuente: (Shahin Farahani, 2008).*

- Topología en estrella

Uno de los nodos actúa como nodo principal o Gateway. Este nodo principal recibe los datos de los demás nodos y es el que se encarga de establecer la comunicación con el servidor (Cunha, Koubaa, Severino, & Alves, Oct 2007).

Figura 25: Topología de estrella




*Fuente: (Shahin Farahani, 2008).*

La topología de red seleccionada es la de malla. De esta manera, será posible establecer la necesaria comunicación entre los nodos ubicados en las luminarias para el intercambio de datos. Son necesarios dos tipos de nodos:

- Nodo router: Recolecta los datos por medio de los sensores y puede comunicarse con los nodos ubicados en su rango de alcance.

- Nodo coordinador: Recolecta los datos de los nodos router y se conecta al servidor para transmitir la información adquirida.

Para la configuración de la red completa de toda la ciudad, se podría dividir el área de cobertura en subredes de malla.

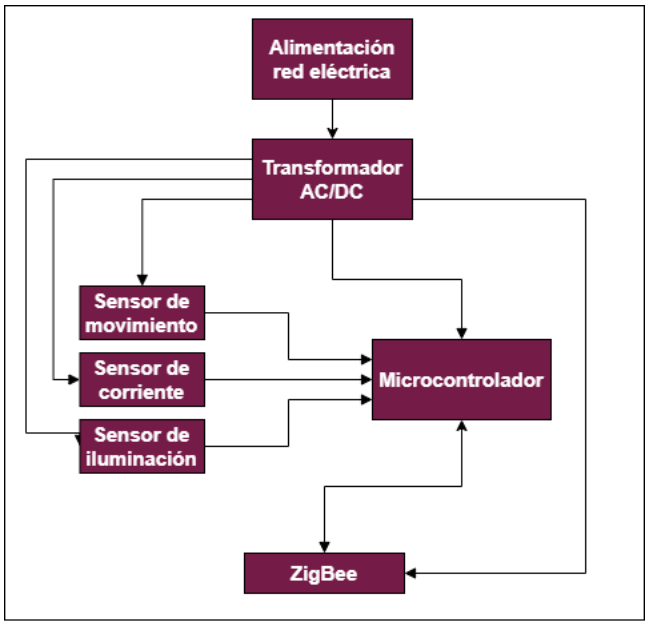
#### 5.3.6.4. Tecnología inalámbrica

Para establecer la conexión entre el nodo coordinador y el servidor, se ha optado por hacer uso de una red celular, en este caso 4G. Esta elección está fundamentada en la cobertura de la red 4G, que en Colombia alcanza el 99% del territorio nacional (Iván Hernández, 2020). Además, en operadores como Claro, la velocidad de descarga promedia los 14.1Mbps, y la velocidad de carga se oscila en los 6Mbps (Portafolio, 2020).

### 5.3.6.5. Arquitectura de nodos

- Nodo Router

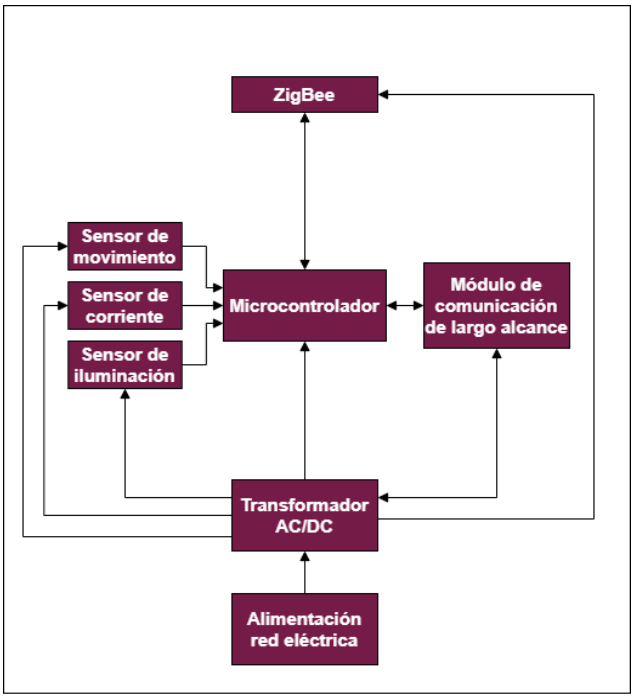
Figura 26: Arquitectura del nodo router




*Fuente: Elaboración propia*

- Nodo coordinador

Figura 27: Arquitectura del nodo coordinador




*Fuente: Elaboración propia*

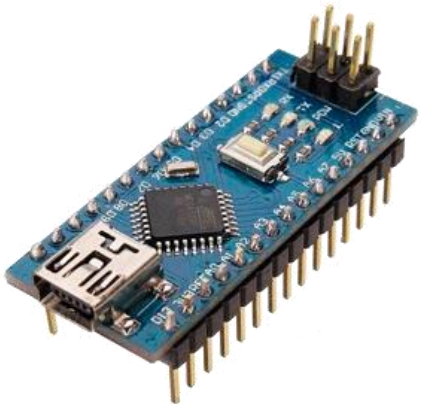
### 5.3.7. Selección de dispositivos

En esta sección se establecen todos los elementos que conformarán los tipos de nodo necesarios, coordinador y sensor.

#### 5.3.7.1. Arduino nano

Es una pequeña placa basada en el microcontrolador ATmega328. Tiene una memoria flash de 31KB, 14 pines digitales y 8 analógicos. La función de los pines debe ser configurada como entrada o salida. Su fuente de alimentación debe ser de 5V (Arduino nano, qué es, pinout y características, 2018). Este dispositivo será el encargado de procesar los datos en el nodo router.

Figura 28: Arduino nano

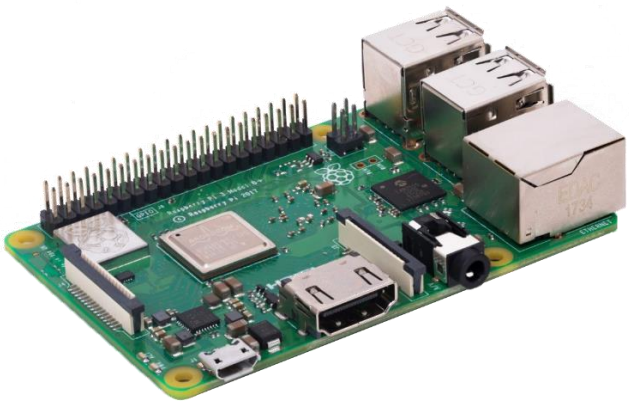


*Fuente: (Arduino nano, 2020)*

#### 5.3.7.2. Raspberry Pi 3 B+

La placa Raspberry es un ordenador de bajo costo y tamaño reducido (Eva Rodríguez, 2018). Está compuesta por un Sistema de Chip (SoC), CPU, memoria RAM, puertos de entrada y salida de audio y video, ranura SD para almacenamiento, reloj, toma para la alimentación, conexiones para periféricos de bajo nivel, etc (Raspberry pi 3 modelo B+, 2018). Su fuente de alimentación es de 5.1V.

Figura 29: Raspberry PI 3 B+

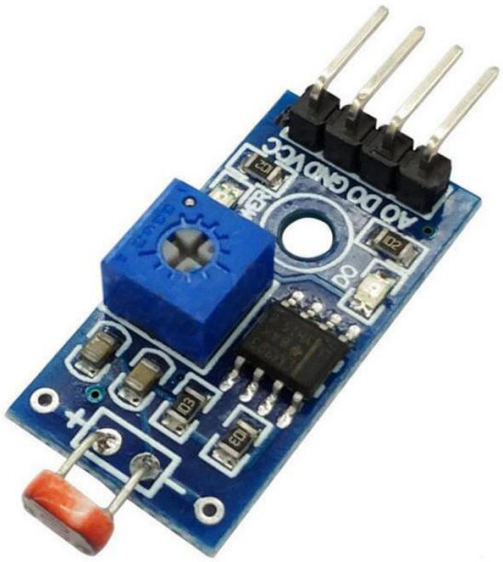


*Fuente: (Raspberry pi 3 modelo B+, 2018)*

#### 5.3.7.3. Módulo fotosensible LM393

Este dispositivo permite la detección de cambios sensibles en la luz ambiente. Generalmente su uso se da con el objetivo de producir cambios en módulos microcontroladores o de relés. Su funcionamiento se basa en una fotorresistencia, la cual permite obtener datos relativos a la intensidad de luz. El módulo está basado en el circuito integrado LM393 y su voltaje de funcionamiento oscila entre los 3,3V a 5V (Módulo ldr fotoresistencia sensor luz lm393, 2020).

Figura 30:Módulo fotosensible LM393




*Fuente: (Módulo ldr fotoresistencia sensor luz lm393, 2020)*

#### 5.3.7.4. Módulo PIR HC-SR501

El módulo HC-SR501 es un dispositivo sensor pasivo de bajo costo. Tiene la capacidad de distinguir entre el movimiento de objetos y movimiento humano con un rango de hasta 7 metros mediante un sensor piroeléctrico. Tiene dos modos de funcionamiento: el primero envía una señal de salida alta al hacer una detección y una señal baja después de un tiempo determinado. El segundo mantiene la señal alta mientras sea esté detectando algo, solo cambia cuando el objeto sale del su rango. Su alimentación eléctrica es de 5V (Vicente García, 2017).

Figura 31: Módulo PIR HC-SR501

*Fuente: (todomicro.com.ar, sf)*

#### 5.3.7.5. Sensor de corriente ACS712

El módulo ACS712 consta de una pista de conducción de cobre que permite que la corriente fluya a través de ella, generando un campo magnético que es detectado por un circuito integrado Hall, que se encarga de convertirla en una tensión proporcional. Acepta una entrada de corriente de hasta 30A. Es alimentado desde 4,5V a 5,5V (Hall-effect based, fully integrated current sensors, 2003).

Figura 32: Módulo ACS712

*Fuente: (Ferretrónica, 2020)*

#### 5.3.7.6. Módulo Digi Xbee Pro 900HP

El módulo Xbee Pro, fabricado por Digi, posee un protocolo de red llamado 'DigiMesh' que le permite trabajar en una red densa. Puede ser configurado para una red en malla o punto a multipunto. Este dispositivo no requiere programación, y su configuración se hace por medio del software XCTU, el cual provee el fabricante. Su velocidad de transmisión oscila entre los 10Kbps y los 200Kbps y el alcance teórico en un entorno urbano es de hasta 305 metros. Su fuente de alimentación es de 2.1 a 3.6V (Digi, 2020).

Figura 33: Módulo Digi Xbee Pro 900HP

*Fuente: (Digi, 2020)*

Para establecer la conexión entre el módulo Xbee y el arduino nano, se hace uso de un adaptador de Xbee para arduino nano.

Figura 34: Adaptador Xbee para arduino nano

*Fuente: (Gravitech, 2020)*

#### 5.3.7.7. HAT 4G para Raspberry PI

Es un módulo que le permite a la placa Raspberry PI habilitar funciones como la conexión 4G. Admite acceso telefónico, llamadas telefónicas, SMS, MMS, correo, TCP, UDP, DTMF, HTTP, FTP, etc. Su fuente de alimentación es de 5V (Waveshare.HAT 4G/3G/2G/GSM/GPRS/GNSS para raspberry pi, 2019).

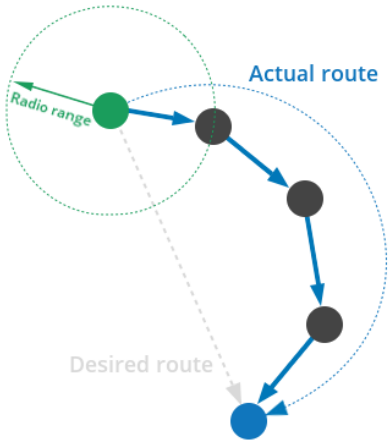
Figura 35: HAT 4G para Raspberry PI

*Fuente: (Waveshare.HAT 4G/3G/2G/GSM/GPRS/GNSS para raspberry pi, 2019)*

### 5.3.8. Enrutamiento de datos

La función de una red es transmitir datos de un nodo a otro. En la comunicación de datos más elemental, se transmite un dato del nodo origen al nodo destino, sin embargo, esto deja de ser posible en un escenario en el que los nodos están muy separados. En este caso, los datos deben viajar de un nodo a otro, que se encuentre en el rango de alcance, hasta llegar al nodo deseado (Digi, 2018).

Figura 36: Enrutamiento en una red




*Fuente: (Digi, 2018)*

El módulo Digi Xbee Pro 900HP hace uso de DigiMesh, un protocolo basado en ZigBee, desarrollado por la compañía de tecnología Digi International. Una de sus principales características es que “las rutas se descubren y crean solo cuando es necesario, lo que elimina la necesidad de mantener un mapa de la red” (Digi, 2018).

En condiciones normales, los datos se envían sobre una ruta ya descubierta, sin embargo, si dicha ruta no existe los nodos inician el proceso para detectar una nueva ruta. El proceso de detección de rutas está basado en el protocolo de enrutamiento Ad-hoc On Demand Distance Vector (AODV). Para desarrollar su función, el algoritmo utiliza tablas de enrutamiento en cada nodo para almacenar el salto siguiente a un nodo de destino (Digi, 2018).

Los pasos para la detección de una ruta desde un nodo de origen A, hasta un nodo destino B, son los siguientes:

1. A envía una difusión de solicitud de ruta. Los nodos que reciban el broadcast y no sean B, serán nodos intermedios.
2. Los nodos intermedios actualizan y difunden la solicitud si tiene una mejor calidad de ruta al nodo A.
3. Cuando B recibe la solicitud de ruta, envía una repuesta de ruta de unidifusión hasta A, a lo largo de la ruta específicada.
4. Esto se hace para cada solicitud recibida, independientemente de la calidad de la ruta.
5. El nodo A puede recibir varias respuestas de ruta. Para enviar el dato selecciona la ruta con mejor calidad, y la usará siempre que deba enviar un mensaje a B.

(Digi, 2018).

#### 5.3.8.1. Seguridad y cifrado

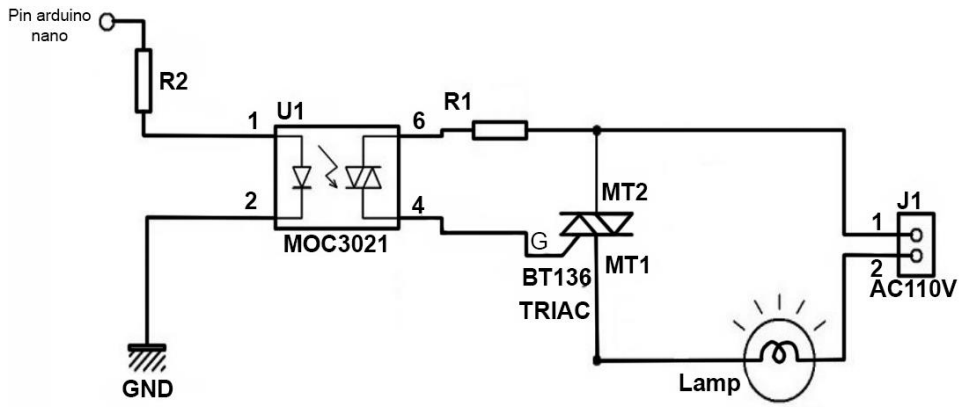
Los datos transmitidos deben estar protegidos, puesto que el acceso a ellos por parte de personal no deseado podría crear problemas en el funcionamiento del sistema. Por esta razón, los módulos XBee pueden ser configurados para una comunicación segura, a través de claves de cifrado. Los datos se cifran antes de sen enviados y deben descifrarse antes de ser leídos. Es necesario tomar en cuenta que el habilitar la seguridad en los dispositivos puede crear un ligero aumento en la latencia y en el tamaño de los paquetes de datos (Digi, 2018).

### 5.3.9. Circuito controlador de intensidad de iluminación

El control de la intensidad de iluminación de las luminarias estará a cargo de un circuito de potencia y un circuito detector de cruce por cero.

### 5.3.9.1. Circuito de controlador de iluminación

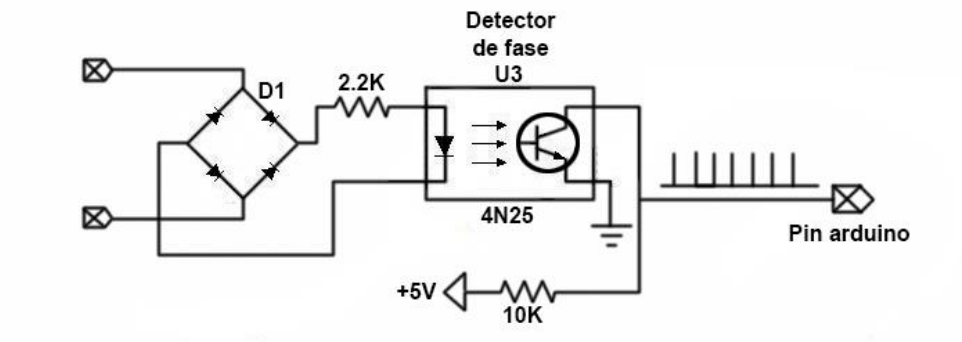
Figura 37: Circuito controlador de intensidad de iluminación




*Fuente: (O. Rudrawar, S. Daga, J. R. Chadha, & P. S. Kulkami, 2018)*

El control de intensidad de iluminación se lleva a cabo mediante un TRIAC. Este dispositivo se activa cuando, desde el Arduino nano, se genera un pulso dirigido hacia la compuerta. Se cuenta con un optoacoplador, el MOC3021, que permite aislar el circuito de control del circuito de potencia. Para establecer en que instante se produce el pulso a la compuerta del TRIAC se hace uso de un circuito detector de cruce por cero. Los pulsos de compuerta se producen con un intervalo de 10 ms según la técnica de cruce cero, es decir, el instante en el que se toma la tensión cruza cero y después del retardo deseado desde el punto de cruce cero, se activa la puerta. La siguiente instancia de activación será el siguiente cruce cero más el retardo (O. Rudrawar, S. Daga, J. R. Chadha, & P. S. Kulkami, 2018).

Figura 38: Circuito detector de cruce por cero




*Fuente: (O. Rudrawar, S. Daga, J. R. Chadha, & P. S. Kulkami, 2018)*

La intensidad de las luces varía en función del voltaje aplicado. El TRIAC puede permanecer en modo de conducción, activado mediante un pulso en la compuerta, y puede cambiar su modo de operación con otro pulso.

# 6. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

El internet de las cosas es un paradigma destinado a hacer parte de nuestras vidas, de hecho, ya lo es en varios aspectos. Es por este motivo que es necesario empezar a analizar la forma en la que se irá integrando esta tecnología en los distintos planos de la sociedad. En este caso, el sistema de alumbrado público inteligente, resulta ser una opción muy potente de su aplicación, puesto que el aprovechamiento de una infraestructura tan robusta como la del alumbrado público permite generar varios aportes significativos.

El sistema de alumbrado público en Colombia, como en muchos países, ha mantenido una forma de funcionamiento que no está en línea con los objetivos mundiales de disminución de consumo eléctrico, tal como se presentó en el planteamiento del problema. Mediante el diseño del prototipo funcional de alumbrado público inteligente, se planteó un sistema con la capacidad de dar el dinamismo necesario a las luminarias, de manera que se reduzca el consumo eléctrico y se provea de un buen servicio a la ciudadanía, asegurándose que las luminarias reciban el mantenimiento oportuno.

De esta manera, se podría encaminar a la ciudad de Bucaramanga a convertirse en una ciudad inteligente, puesto que brinda la posibilidad de interconectar otro tipo de servicios a la red, de forma que se mejore la calidad de vida de los habitantes.
La solución presentada, se alinea con los objetivos próximos de la Oficina de Alumbrado Público de Bucaramanga, buscando brindar esta un aporte significativo en pro de la implementación de la tecnología en la ciudad.

## 6.1. Trabajos futuros

Como ya se mencionó anteriormente, el sistema de alumbrado público brinda múltiples posibilidades; es por ello, que se presentan algunas mejoras las cuales se podrían implementar en el diseño, un ejemplo de esto:

- Inclusión de sensores para el estudio de variables ambientales

La implementación de una red de sensores para el control del alumbrado público permitiría la inclusión de otro tipo de sensores que permitan tomar datos relativos al ambiente. Es decir, se podrían instalar sensores para medir factores como:

calidad de aire, densidad de polvo, humedad, nivel de ruido, nivel de rayos UV etc.

Haciendo uso de estos datos se podrían generar mapas de contaminación en la ciudad, de forma que se puedan establecer los lugares cuya afectación ambiental sea mayor, logrando que las políticas en pro de la preservación ambiental sean aplicadas en los sitios que más lo necesitan.

- Mejoramiento de la seguridad vial

De la misma manera, se podrían incluir sistemas de vigilancia a algunos nodos de la red, por medio de los cuales se podría ejercer una vigilancia continua de los sucesos presentados en las calles de la ciudad, tales como accidentes o hurtos. Para ello se podrían instalar sistemas de vigilancia basados en cámaras, por medio de las cuales se podría tomar la información necesaria cuando se presente algún acontecimiento en las zonas de control del sistema. De esta manera, se mejoraría considerablemente la sensación de seguridad de los habitantes de la ciudad, puesto que este podría implementarse principalmente en puntos que las autoridades consideren de alto riesgo.

- Integración de módulos analíticos

La integración del análisis de datos significaría una mejora superlativa en el sistema. De esta manera se podría hacer uso de los diversos datos que se podrían generar en la red de sensores para generar previsiones a corto o largo plazo, relacionadas con el consumo eléctrico en las luminarias o desgaste de componentes que provoquen fallas. Por otro lado, en caso de incluir sensores relacionados con el tema ambiental, se podrían hacer proyecciones en este campo, mejorando la capacidad de gestión gubernamental en temas de contaminación. Además, se podría mejorar el funcionamiento del sistema general extrapolando datos, de forma que cuando por algún motivo se pierda información, el sistema pueda igualmente realizar aproximaciones realistas.

- Tecnología 5G

La llegada de la tecnología 5G resulta un hecho muy positivo en pro del desarrollo de aplicaciones IoT. La notable mejora en la velocidad de transferencia de datos, mayor capacidad de dispositivos conectados y baja latencia, permitirán que estás aplicaciones, cuyo volumen de datos puede ser muy grande, respondan a requerimientos de ejecución en tiempo real. De esta manera, se podría ampliar el espectro de variables a medir en las redes de

sensores, puesto que el volumen de datos circulando en la red no sería un factor limitante.

- Integración de paneles solares y baterías

El sistema propuesto se alimenta de la misma red eléctrica de las luminarias. Un paso importante sería la integración de paneles solares que provean de autonomía al circuito embebido. La autonomía se vería mejorada con la inclusión de baterías que le permitan al sistema tener una fuente de almacenamiento y alimentación de energía independiente.

# 7. REFERENCIAS


ALCALDIA DE BUCARAMANGA. (2019a). Alcaldía adjudicó por $6.209 millones el proceso para el suministro de luminarias led que impactarán en seis comunas de bucaramanga. Retrieved from https://www.bucaramanga.gov.co/noticias/alcaldia-adjudico-por-6-209-millones-el-proceso-para-el-suministro-de-luminarias-led-que-impactaran-en-seis-comunas-de-bucaramanga/

ALCALDIA DE BUCARAMANGA. (2019b). Alcaldía de bucaramanga cumplió con la instalación de 22 mil luminarias con tecnología LED. Retrieved from https://www.bucaramanga.gov.co/noticias/51394-2/

ALCALDIA DE BUCARAMANGA. (2019c). Alcaldía de bucaramanga recibió seis propuestas en proceso licitatorio para la instalación de 8.148 luminarias led. Retrieved from https://www.bucaramanga.gov.co/noticias/alcaldia-de-bucaramanga-recibio-seis-propuestas-en-proceso-licitatorio-para-la-instalacion-de-8-148-luminarias-led/

ALCALDIA DE BUCARAMANGA. (2019d). Informe especial: Bucaramanga tendrá el 100% de su alumbrado público con tecnología LED. Retrieved from https://www.bucaramanga.gov.co/noticias/informe-especial-bucaramanga-tendra-el-100-de-su-alumbrado-publico-con-tecnologia-led-2/

ALCALDIA DE BUCARAMANGA. (2020). Alcaldía de bucaramanga reactivará obras de modernización de alumbrado público. Retrieved from https://www.bucaramanga.gov.co/noticias/alcaldia-de-bucaramanga-reactivara-obras-de-modernizacion-de-alumbrado-publico/

Alcaldía de Bucaramanga. (2018). División político urbana y rural . Retrieved from https://www.bucaramanga.gov.co/el-mapa/division-politico-urbana/#:~:text=El%20suelo%20urbano%20se%20divide,(sectores%20con%20poblaci%C3%B3n%20flotante).

Aline Hernández Alcántara. (2017). Implementación de un sistema para el monitoreo remoto de señales electrocardiográficas vía servicio general de paquetes por radio y zigbee

Alumbrado Público de Bucaramanga. (2014). Galería de fotografías . Retrieved from http://alumbrado.bucaramanga.gov.co/galerias

A. Shaikh, M. Thapar, D. Koli, & H. Rambade. (2018). IOT based smart electric pole. Paper presented at the 2018 Second International Conference on Electronics, Communication and Aerospace Technology (ICECA), 594-597. doi:10.1109/ICECA.2018.8474773

Arduino nano. (2020). Retrieved from https://store.arduino.cc/usa/arduino-nano

Arduino nano, qué es, pinout y características. (2018). Retrieved from https://descubrearduino.com/arduino-nano-pinout/

A. Zanella, N. Bui, A. Castellani, L. Vangelista, & M. Zorzi. (2014). Internet of things for smart cities doi:10.1109/JIOT.2014.2306328

Atzori, L., Iera, A., & Morabito, G. (2010). The internet of things: A survey. Computer Networks, 54(15), 2787-2805. doi:10.1016/j.comnet.2010.05.010

B. Abinaya, S. Gurupriya, & M. Pooja. (2017). Iot based smart and adaptive lighting in street lights. Paper presented at the 2017 2nd International Conference on Computing and Communications Technologies (ICCCT), 195-198. doi:10.1109/ICCCT2.2017.7972267

Banco Interamericano de Desarrollo. (2016). La ruta hacia las smart cities: Migrando de una gestión tradicional a la ciudad inteligente

B. C. Csáji, Z. Kemény, G. Pedone, A. Kuti, & J. Váncza. (2017). Wireless multi-sensor networks for smart cities: A prototype system with statistical data analysis doi:10.1109/JSEN.2017.2736785

B. Siregar, A. B. Azmi Nasution, & F. Fahmi. (2016). Integrated pollution monitoring system for smart city. Paper presented at the 2016 International Conference on ICT for Smart Society (ICISS), 49-52. doi:10.1109/ICTSS.2016.7792847

Cauligi Raghavendra, Krishna Sivalingam, & Taieb Znati. (2006). Wireless sensor networks Springer.

Carlos Lino Ramírez. (2012). Diseño de una arquitectura para redes de sensores con soporte para aplicaciones de detección de eventos

C. B. Soh*, J. J. Tan, K. J. Tseng, W. L. Woo, & J. W. R. Teo. (2018). Intelligent street lighting for smart cities doi:10.1109/ISGT-Asia.2018.8467767

Cesar Augusto Gonzalez Quiroga. (2020). A oscuras se encuentra el paseo del comercio. Caracol Radio, Retrieved from https://caracol.com.co/emisora/2020/09/10/bucaramanga/1599755397_462684.html

Chen, S., Xiong, G., Xu, J., Han, S., Wang, F., & Wang, K. (Nov 2018). The smart street lighting system based on NB-IoT. Paper presented at the 1196-1200. doi:10.1109/CAC.2018.8623281 Retrieved from https://ieeexplore.ieee.org/document/8623281

Chew, I., Karunatilaka, D., Tan, C. P., & Kalavally, V. (2017). Smart lighting: The way forward? reviewing the past to shape the future doi://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.04.083

Cook, B. (2000). New developments and future trends in high-efficiency lighting. Engineering Science and Education Journal, 9(5), 207-217.

Cugurullo, F. (2018). The origin of the smart city imaginary: From the dawn of modernity to the eclipse of reason.

Cunha, A., Koubaa, A., Severino, R., & Alves, M. (Oct 2007). Open-ZB: An open-source implementation of the IEEE 802.15.4/ZigBee protocol stack on TinyOS. Paper presented at the 1-12. doi:10.1109/MOBHOC.2007.4428602 Retrieved from https://ieeexplore.ieee.org/document/4428602

David Perez. (2009). Sistemas embebidos y sistemas operativos embebidos., 4. Retrieved from https://www.academia.edu/16523506/Info_Sistemas_Embebidos?auto=download

Decreto No° 2424. Ministerio de Minas y Energía, 18 de julio de 2006.

Digi. (2020). Módulo digi XBee-PRO 900HP RF. Retrieved from https://www.digi.com/products/embedded-systems/digi-xbee/rf-modules/sub-1-ghz-rf-modules/xbee-pro-900hp#resources

Digi. (2018). XBee-PRO 900HP DigiMesh kit user guide. Retrieved from https://www.digi.com/resources/documentation/Digidocs/90001496/Default.htm

Electronics Notes.IEEE 802.15.4 standard: A tutorial. Retrieved from https://www.electronics-notes.com/articles/connectivity/ieee-802-15-4-wireless/basics-tutorial-

primer.php#:~:text=The%20purpose%20of%20the%20IEEE,%2C%20RF4CE%2C%20MiWi%2C%20etc.

E. R. Sanseverino, G. Scaccianoce, V. Vaccaro, G. Zizzo, & S. Pennisi. (2015). Smart city and public lighting. Paper presented at the 2015 IEEE 15th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC), 665-670. doi:10.1109/EEEIC.2015.7165244

Eva Rodríguez. (2018). De cero a maker: Todo lo necesario para empezar con raspberry pi. Retrieved from https://www.xataka.com/makers/cero-maker-todo-necesario-para-empezar-raspberry-pi#:~:text=La%20Raspberry%20Pi%20es%20un,igual%20que%20cualquier%20otra%20computadora.

ELKO EP. (Enero de 2019). Smart Street Lighting: Economical and effective outdoor lighting solutions.

ESSA. (2019). Alumbrado público. Retrieved from https://www.essa.com.co/site/clientes/estado/alumbrado-publico

Esteban Borges. (2018). Tipos de servidores web . Retrieved from https://blog.infranetworking.com/tipos-de-servidores-web/

Fahmi Knoegell. (2016). History of embedded system. Retrieved from https://www.academia.edu/8286031/history_of_embedded_system

Félix Cristancho. (2020). Confianza en lo público: 27 proponentes se presentaron en el proceso de poda de árboles y despeje de luminarias. Retrieved from https://www.bucaramanga.gov.co/noticias/confianza-en-lo-publico-27-proponentes-se-presentaron-en-el-proceso-de-poda-de-arboles-y-despeje-de-luminarias/

Ferretrónica. (2020). ACS712 sensor de corriente directa y alterna 30A. Retrieved from https://ferretronica.com/products/acs712-sensor-de-corriente-directa-y-alterna-30a?variant=19615964168285&currency=COP&utm_medium=product_sync&utm_source=google&utm_content=sag_organic&utm_campaign=sag_organic&utm_campaign=gs-2020-01-11&utm_source=google&utm_medium=smart_campaign&gclid=EAIaIQobChMI1r6orc7v6wIVx8DACh3eSA-bEAQYASABEgJgdPD_BwE

Gravitech. (2020). Módulo XBee para arduino nano. Retrieved from https://www.robotshop.com/es/es/modulo-xbee-para-arduino-nano.html

Hall-effect based, fully integrated current sensors. (2003). Appliance Manufacturer, 51(10), 48.

HC-SR501 PIR sensor. (2017). Retrieved from https://components101.com/hc-sr501-pir-sensor

IBM.Network protocol. (2014). Retrieved from https://www.ibm.com/support/knowledgecenter/en/SSGU8G_14.1.0/com.ibm.admin.doc/ids_admin_0126.htm

Ionos. (2020). TCP/IP: El protocolo que hace posible internet
. Retrieved from https://www.ionos.es/digitalguide/servidores/know-how/tcpip/

Iván Hernández. (2020). Cobertura 4G en colombia superó los mil municipios en el país. Retrieved from https://www.rcnradio.com/colombia/cobertura-4g-en-colombia-supero-los-mil-municipios-en-el-pais

Jabeen, Q., Khan, F., Hayat, M., Khan, H., Jan, S., & Ullah, F. (2016). A survey: Embedded systems supporting by different operating systems.

Javier Martín Moreno, & Daniel Ruiz Fernández. (2007). Informe técnico: Protocolo ZigBee (IEEE 802.15.4)

José Luis Camargo. (2009). Capítulo 1: Introducción a las redes inalámbricas

José Luis Pineda. (2020a, Sep 01,). 75% de bucaramanga ya brilla con luz led . Retrieved from https://www.vanguardia.com/area-metropolitana/bucaramanga/75-de-bucaramanga-ya-brilla-con-luz-led-EM2824655

José Luis Pineda. (2020b). Así es el proyecto de alumbrado inteligente para bucaramanga . Vanguardia, Retrieved from https://www.vanguardia.com/area-metropolitana/bucaramanga/asi-es-el-proyecto-de-alumbrado-inteligente-para-bucaramanga-HA2561191

Joshua Muscatello, & Joshua Martin. (2005). Wireless networks security., 5. Retrieved from https://www.iup.edu/WorkArea/DownloadAsset.aspx?id=61283

Jordi Salazar. (2017). Wireless networks (1st ed.) Czech Technical University of Prague.

J. Perko, D. Topić, & D. Šljivac. (2016). Exploitation of public lighting infrastructural possibilities. Paper presented at the 2016 International Conference on Smart Systems and Technologies (SST), 55-59. doi:10.1109/SST.2016.7765632

Ian F. Akyildiz, & Mehmet Can Vuran. (2010). Wireless sensor networks

InteliLIGHT. (2018). From city roads to highways, inteliLIGHT® LoRaWAN compatible controllers continue to light up greece. Retrieved from https://intelilight.eu/from-city-roads-to-highways-intelilight-lorawan-compatible-controllers-manages-modernized-segments-of-a1-motorway-in-greece-case-study/

InteliLIGHT. (2019). LoRaWAN™ compatible streetlight control project, implemented by ENGIE and inteliLIGHT® in bougival, 15km from paris, france. Retrieved from https://intelilight.eu/lorawan-compatible-streetlight-control-project-implemented-by-engie-and-intelilight-in-bougival-15km-from-paris-france/

Kevin Ashton. (2009). That 'internet of things' thing. Contemporary Authors,

K. S. Murthy, P. Herur, B. R. Adithya, & H. Lokesh. (2018). IoT-based light intensity controller doi:10.1109/ICIRCA.2018.8597416

K. Tseng, & C. Hsieh. (2016). A solution for intelligent street lamp monitoring and energy management doi:10.1109/ICIEA.2016.7603698

Kyle Sandburg. (2018). Smart lighting & wireless future. Retrieved from https://medium.com/strategy-dynamics/smart-lighting-wireless-future-9b67eca73984

Lambert, T. (2017). Introduction to microcontrollers and embedded systems

Ley No° 143. Secretaría del Senado, 12 de julio de 1994.

Luminarias de la ciudad. (2014). Retrieved from http://alumbrado.bucaramanga.gov.co/atencion-al-ciudadano/mapa-luminico

Madakam, S., Ramaswamy, R., & Tripathi, S. (2015). Internet of things (IoT): A literature review. Journal of Computer and Communications, 3(5), 164-173. doi:10.4236/jcc.2015.35021

Marilyn Wolf. (2012). Computers as components: Principles or embedded computing SystemDesign (3rd ed.) Elsevier Science Ltd.

Marshall Brain. (2019). How microcontrollers work. Retrieved from https://electronics.howstuffworks.com/microcontroller1.htm

M. Babiuch, P. Foltýnek, & P. Smutný. (2019). Using the ESP32 microcontroller for data processing. Paper presented at the 2019 20th International Carpathian Control Conference (ICCC), 1-6. doi:10.1109/CarpathianCC.2019.8765944

M. C. V. S. Mary, G. P. Devaraj, T. A. Theepak, D. J. Pushparaj, & J. M. Esther. (2018). Intelligent energy efficient street light controlling system based on IoT for smart city doi:10.1109/ICSSIT.2018.8748324

Módulo ldr fotoresistencia sensor luz lm393. (2020). Retrieved from https://leantec.es/tienda/modulo-ldr-fotoresistencia-sensor-luz-lm393/

M. Saifuzzaman, N. N. Moon, & F. N. Nur. (2017). IoT based street lighting and traffic management system doi:10.1109/R10-HTC.2017.8288921

N. Ouerhani, N. Pazos, M. Aeberli, & M. Muller. (2016). IoT-based dynamic street light control for smart cities use cases doi:10.1109/ISNCC.2016.7746112

Norma CIE 115. Comisión Internacional de Iluminación, 2000

O. Rudrawar, S. Daga, J. R. Chadha, & P. S. Kulkami. (2018). Smart street lighting system with light intensity control using power electronics doi:10.1109/ICSESP.2018.8376692

Pallas-Areny, R., & Webster, J. G. (2012). Sensors and signal conditioning John Wiley & Sons.

Portafolio. (2020). Los operadores con mejor velocidad y cobertura . Retrieved from https://www.portafolio.co/tendencias/los-operadores-con-mejor-velocidad-y-cobertura-537179

P. P. F. Dheena, G. S. Raj, G. Dutt, & S. V. Jinny. (2017). IOT based smart street light management system doi:10.1109/ICCS1.2017.8326023

Prensa Alcaldía de Bucaramanga. (2020). Alcaldía de bucaramanga cerró proceso de licitación para el mantenimiento de alumbrado público con 39 proponentes. Retrieved from https://www.bucaramanga.gov.co/noticias/alcaldia-de-bucaramanga-cerro-proceso-de-licitacion-para-mantenimiento-de-alumbrado-publico-con-39-proponentes/

raspberrypi.org. (2018). Raspberry pi 3 modelo B+. Retrieved from https://www.raspberrypi.org/products/raspberry-pi-3-model-b-plus/

Registro y consulta de PQR's de alumbrado público bucaramanga. Retrieved from http://alumbrado.bucaramanga.gov.co/atencion-al-ciudadano/pqr

Reglamento técnico de iluminación y alumbrado público, ResoluciónU.S.C. (2015).

Resolución No° 123. Ministerio de Minas Y y Energía, 08 de septiembre de 2011.

Roberts, L., & Wessler, B. (May 5, 1970). Computer network development to achieve resource sharing. Paper presented at the 543-549. doi:10.1145/1476936.1477020 Retrieved from http://dl.acm.org/citation.cfm?id=1477020

Salman, N., Rasool, I., & Kemp, A. (2010). Overview of the IEEE 802.15.4 standards family for low rate wireless personal area networks., 701-705. doi:10.1109/ISWCS.2010.5624516

Schaffers, H., Komninos, N., Pallot, M., Trousse, B., Nilsson, M., & Oliveira, A. (2011). Smart cities and the future internet: Towards cooperation frameworks for open innovation. Paper presented at the The Future Internet, 431-446.

S. Chen, G. Xiong, J. Xu, S. Han, F. Wang, & K. Wang. (2018). The smart street lighting system based on NB-IoT. Paper presented at the 2018 Chinese Automation Congress (CAC), 1196-1200. doi:10.1109/CAC.2018.8623281

S. C. Suseendran, K. B. Nanda, J. Andrew, & M. S. Bennet Praba. (2018). Smart street lighting system doi:10.1109/CESYS.2018.8723949

Shahin Farahani. (2008). ZigBee wireless networks and transceivers

Shahin Farahani. (2011). ZigBee wireless networks and transceivers Newnes.

smartenlight.(2017).Introduction to smart lighting:A very brief history of light; Retrieved from https://www.smartenlight.com/introduction-to-smart-lighting-a-very-brief-history-of-light/

S. S. Badgelwar, & H. M. Pande. (2017). Survey on energy efficient smart street light system doi:10.1109/I-SMAC.2017.8058303

Sushruta Mishra, & Hiren Thakkar. (2012). Features of WSN and data aggregation
techniques in WSN: A survey., 264-273. Retrieved from https://www.researchgate.net/profile/Sushruta_Mishra/publication/288629679_Features_of_WSN_and_Data_Aggregation_techniques_in_WSN_A_Survey/links/5708bec708aea66081357e77.pdf

Tal Eran. (2015). Measurement in science. Retrieved from https://plato.stanford.edu/archives/fall2017/entries/measurement-science/

TVILIGHT. (2019). Smart street lighting for smart(er) cities. (). Retrieved from https://www.tvilight.com/wp-content/uploads/2019/03/Brochure-Intelligent-Smart-City-Lighting-Control-Sensor-CMS-Light-Management-EN.pdf

Tvlight. (2016). County kerry safe streets with intelligent lighting  Retrieved from https://www.tvilight.com/2016/10/26/residential-areas/

Tvlight. (2019). Largest sensor-based smart lighting project in india. Retrieved from https://www.tvilight.com/2019/06/19/largest-sensor-based-smart-lighting-project-in-india/

U. Bhagat, N. Gujar, & S. Patel. (2018). Implementation of IOT in development of intelligent campus lighting system using mesh network. Paper presented at the 2018 International Conference on Smart Systems and Inventive Technology (ICSSIT), 251-256. doi:10.1109/ICSSIT.2018.8748314

United Nations. (2015). About the sustainable development goals. Retrieved from https://www.un.org/sustainabledevelopment/sustainable-development-goals/

V. A. Niţă, M. L. Noguero, R. Slinksc, C. Bruschi, R. Gundacker, M. A. M. Martinz, . . . T. Felberbauer. (2018). Smart sensor box for alivemaps based on NB-IOT. Paper presented at the 2018 IEEE 4th International Symposium on Wireless Systems within the International Conferences on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems (IDAACS-SWS), 6-9. doi:10.1109/IDAACS-SWS.2018.8525564

Vicente García. (2017). Sensor HC-SR501 con arduino. Retrieved from https://www.diarioelectronicohoy.com/blog/sensor-hc-sr501-con-arduino

Waltenegus Dargie, & Christian Poellabauer. (2010). Fundamentals of wireless sensor networks: Theory and practice Wiley.

Waveshare.HAT 4G/3G/2G/GSM/GPRS/GNSS para raspberry pi. (2019). Retrieved from https://www.robotshop.com/es/es/hat-4g-3g-2g-gsm-gprs-gnss-para-raspberry-pi.html