

UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
CARRERA DE ELECTRICIDAD



TEMA:

DESARROLLO DE UN PROTOTIPO DE UNA RED DE ALUMBRADO PÚBLICO CON
BASE A TECNOLOGÍA DE INTERNET DE LAS COSAS PARA EL SECTOR DE LA
VICTORIA DE LA CIUDAD DE IBARRA.

Trabajo de Grado previo a la obtención del título de Ingeniera Eléctrica

AUTOR (A):

Nadia Stefany Aguilar Torres

DIRECTOR (A):

Ing. Olger Gilberto Arellano Bastidas Msc.

Ibarra, 2026



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
 Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
CARRERA DE ELECTRICIDAD



AUTORIZACION DE USO Y PUBLICACIÓN A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

1. IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA

En cumplimiento del Art. 144 de la Ley de Educación Superior, hago la entrega del presente trabajo a la Universidad Técnica del Norte para que sea publicado en el Repositorio Digital Institucional, para lo cual pongo a disposición la siguiente información:

DATOS DE CONTACTO	
CÉDULA DE IDENTIDAD:	0750044877
APELLIDOS Y NOMBRES:	Nadia Stefany Aguilar Torres
DIRECCIÓN:	Imbabura – Ibarra – El Sagrario
EMAIL:	nsaguilart@utn.edu.ec
TELÉFONO FIJO:	TELÉFONO MÓVIL: 0967873984

DATOS DE LA OBRA	
TÍTULO:	Desarrollo de un prototipo de una red de alumbrado público con base a tecnología de Internet de las Cosas para el sector de La Victoria de la ciudad de Ibarra.
AUTOR (ES):	Nadia Stefany Aguilar Torres
FECHA: DD/MM/AAAA	13/02/2026
PROGRAMA:	<input checked="" type="checkbox"/> PREGRADO <input type="checkbox"/> POSGRADO
TITULO POR EL QUE OPTA:	Ingeniera Eléctrica
ASESOR /DIRECTOR:	Ing. Francisco Roberto Naranjo Cobo Msc. / Ing. Olger Gilberto Arellano Bastidas Msc.

2. CONSTANCIAS

El autor manifiesta que la obra objeto de la presente autorización es original y se la desarrolló, sin violar derechos de autor de terceros, por lo tanto, la obra es original y que es el titular de los derechos patrimoniales, por lo que asume la responsabilidad sobre el contenido de la misma y saldrá en defensa de la Universidad en caso de reclamación por parte de terceros.

Ibarra, a los 20 días del mes de febrero de 2026

EL AUTOR:

.....
 Nombre: Nadia Stefany Aguilar Torres



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
 Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
CARRERA DE ELECTRICIDAD



**CERTIFICADO DEL DIRECTOR DE TRABAJO DE INTEGRACIÓN
 CURRICULAR**

Yo, Ing. Olger Gilberto Arellano Bastidas Msc. en calidad de director de la señorita estudiante Nadia Stefany Aguilar Torres certifico que ha culminado con las normas establecidas en la elaboración del Trabajo de Integración Curricular con el tema: Desarrollo de un prototipo de una red de alumbrado público con base a tecnología de internet de las cosas para el sector de La Victoria de la ciudad de Ibarra.

Para la obtención del título de Ingeniera Eléctrica, aprobado la defensa, impresión y empastado.

.....
 Ing. Olger Gilberto Arellano Bastidas Msc.

DIRECTOR DE TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
CARRERA DE ELECTRICIDAD



DEDICATORIAS

Dedico el presente trabajo de titulación, en primer lugar, a Dios, por brindarme la fortaleza, la salud y la constancia necesarias para culminar esta etapa importante de mi formación académica.

A mi familia, quienes han sido mi principal apoyo y motivación a lo largo de todo este proceso, por su comprensión, paciencia y confianza depositada en mí, incluso en los momentos más difíciles. Su apoyo incondicional ha sido fundamental para alcanzar este logro.

A las integrantes más pequeñas a mis perritas, quienes fueron parte fundamental de mi familia y que hoy ya no se encuentran físicamente conmigo. Su compañía incondicional, lealtad y cariño marcaron profundamente mi vida y me brindaron fortaleza en momentos de dificultad a lo largo de este proceso académico.

Aunque ya no estén presentes, su recuerdo permanece vivo y su amor sigue siendo una fuente de motivación para seguir adelante y alcanzar mis metas. Este logro también les pertenece.

Finalmente, dedico este trabajo a todas las personas que, de una u otra manera, contribuyeron a mi crecimiento personal y profesional, motivándome a seguir adelante y a no rendirme ante los desafíos.



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
CARRERA DE ELECTRICIDAD



AGRADECIMIENTOS

Este trabajo de grado se lo agradezco a mis padres Rubén Aguilar Gonzales y Narciza Torres Pinzón, a mis hermanos que han estado presentes en todo el proceso, también se lo agradezco a los Ingenieros que nos han compartido el conocimiento que tengo hoy en día para salir como toda una profesional y a poner en práctica ese conocimiento.

Agradezco de manera especial a la Universidad Técnica del Norte, y a la carrera de Electricidad, por brindarme la formación académica y las herramientas necesarias para el desarrollo de este proyecto de titulación.

Mi sincero agradecimiento a mi director/a de tesis, MSc. Olger Arellano Bastidas, por su guía, apoyo y valiosas observaciones durante el desarrollo de este trabajo, las cuales fueron fundamentales para mejorar la calidad del mismo.

Agradezco también a los docentes que formaron parte de mi proceso académico, quienes compartieron sus conocimientos y experiencia, contribuyendo de manera significativa a mi formación profesional.

De manera especial, expreso mi gratitud al personal técnico de la Empresa Eléctrica Regional Norte (EMELNORTE), por el apoyo brindado durante la implementación del prototipo, así como por facilitar los recursos y el acompañamiento técnico necesario para la realización de las pruebas en campo.

Finalmente, agradezco a mis amigos, quienes, con su apoyo moral, palabras de aliento y comprensión hicieron posible la culminación de este proyecto.



INDICE DE CONTENIDOS

DEDICATORIAS	4
AGRADECIMIENTOS.....	5
INDICE DE FIGURAS	13
INDICE DE TABLAS	16
RESUMEN	17
ABSTRACT	18
CAPITULO I	19
INTRODUCCIÓN	19
1.1. Problema de investigación.	19
1.1.1 Problemática a investigar.	19
1.1.2 Formulación de la pregunta de investigación	20
1.2 Objetivos	20
1.2.1 Objetivo general:	20
1.2.2 Objetivos específicos	20
1.3 Alcance y delimitación.....	20
1.4 Justificación	22
CAPÍTULO II	23
MARCO TEÓRICO.....	23
2.1 Antecedentes	23
2.2 Bases teóricas.....	26
2.2.1 Introducción de la IoT en el Alumbrado Público	26
2.2.2 Descripción de las tecnologías de internet de las cosas.....	27



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
 Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
CARRERA DE ELECTRICIDAD



2.2.3	LoRa.....	27
2.2.4	WI-FI.....	28
2.2.5	Bluetooth.....	29
2.2.6	Zigbee.....	29
2.2.7	LPWAN.....	30
2.2.8	Sensores y Dispositivos utilizados en el Alumbrado Público.....	31
2.2.9	Comunicación entre nodos del sistema IoT.....	32
2.2.10	Sensor de Corriente - SCT013.....	33
2.2.11	Sensor de Voltaje AC ZMPT101B.....	34
2.2.12	Sensores de movimiento.....	35
2.2.13	Controladores inteligentes.....	36
2.2.14	Raspberry Pi 3.....	36
2.2.15	Arduino Nano.....	37
2.3	Selección y justificación de los componentes del sistema IoT de alumbrado público.....	38
2.3.1	Comparación de componentes seleccionados con otras alternativas.....	38
	CAPÍTULO III.....	40
	MATERIALES Y MÉTODOS.....	40
3.1	Introducción.....	40
3.2	Descripción del área de estudio.....	41
3.3	Tipos de investigación:.....	41
3.3.1	Investigación Exploratoria.....	42
3.3.2	Investigación documental y bibliográfica.....	42
3.3.3	Investigación de campo.....	42



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
 Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
CARRERA DE ELECTRICIDAD



3.3.4	Investigación Experimental.....	42
3.4	Métodos.....	42
3.4.1	Método cualitativo	43
3.4.2	Método cuantitativo.....	43
3.4.3	Métodos computacionales y simulaciones.....	43
3.5	Diseño de la investigación Materiales, equipos y software.....	43
3.6	Técnicas y herramientas de investigación	44
3.7	Flujograma	44
3.7.1	Parámetros del diseño	46
3.7.2	Cálculo	46
3.7.3	Simulación	46
3.7.4	Selección de materiales	46
3.7.5	Montar el sistema IoT en el prototipo del alumbrado público.	46
3.7.6	Pruebas de funcionamiento.....	47
3.8	Procedimiento.....	47
3.8.1	Parámetros Fotométricos	49
3.8.2	Luminancia promedio de la calzada (Lav)	49
3.8.3	Uniformidad general de luminancia de la calzada (U_o).....	49
3.8.4	Uniformidad longitudinal sobre la calzada (U_L).....	49
3.8.5	Incremento de umbral (TI).....	50
3.8.6	Cálculo de clases de alumbrado y parámetros fotométricos por vías.....	50
3.8.6.1	Vías para tráfico motorizado.....	50
3.8.6.2	Vías para tráfico peatonal.....	51



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
 Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
CARRERA DE ELECTRICIDAD



3.8.6.3	Vías en zonas de conflicto.....	53
3.8.6.4	Parámetros fotométricos definidos	55
3.9	Diseño del alumbrado público actual	55
3.10	Propuesta de diseño del alumbrado público del sector de La Victoria.	57
3.11	Diseño del IoT en las luminarias	62
3.11.1	Adquisición de datos.....	62
3.11.2	Comunicación LoRa.....	63
3.11.3	Módulo SX1278.....	63
3.11.4	Configuración en Arduino	63
3.11.5	Configuración en Raspberry pi.....	64
3.11.6	Procesamiento y almacenamiento de datos en Raspberry Pi	64
3.12	Diagrama	64
3.13	Estimación del consumo eléctrico de sensores, comunicación y control	66
3.13.1	Periodo de medición y estimación mensual del consumo del sistema IoT.	67
3.13.2	Criterios de comparación IoT vs sin IoT	68
3.13.2.1	Sistema sin IoT.....	68
3.13.2.2	Sistema con IoT.....	68
3.13.3	Incorporación del consumo adicional del IoT.	69
3.13.4	Cálculo del ahorro energético (IoT vs sin IoT)	69
3.13.5	Consideraciones del análisis energético	69
	CAPITULO IV	69
4.1	Diseño del prototipo	70
4.2	Análisis de ubicación y adecuación del sistema eléctrico	71



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
 Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
CARRERA DE ELECTRICIDAD



4.3	Componentes tecnológicos	72
4.3.1	Hardware	72
4.3.2	Software	75
4.4	Arquitectura y módulos del sistema.....	75
4.4.1	Módulo Gateway de comunicación	76
4.4.2	Módulo de control y de monitoreo del alumbrado público.....	76
4.5	Diseño electrónico del sistema.....	77
4.5.1	Conexión de los sensores y actuadores	78
4.5.1.1	Conexión del sensor de voltaje	78
4.5.1.2	Conexión del sensor de corriente	78
4.5.1.3	Conexión del sensor de PIR.....	79
4.5.1.4	Conexión del asm1117.....	79
4.5.1.5	Conexión del LoRa.	80
4.5.1.6	Conexión del Arduino Pro mini	80
4.5.1.7	Conexión del Dimmer.	81
4.5.1.8	Conexión del Arduino nano	81
4.5.1.9	Conexión de la fuente de 5V.....	82
4.5.2	Calibración y configuración de sensores.....	82
4.5.2.1	Calibración del sensor de Corriente (SCT-013-100)	82
4.5.2.2	Calibración del sensor de Voltaje (ZMPT101B)	83
4.5.2.3	Configuración del sensor de movimiento tipo PIR.....	84
4.6	Diseño y esquemático General de la PCB	85
4.7	Esquema de conexiones eléctricos del sistema de alumbrado público.	86



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
 Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
CARRERA DE ELECTRICIDAD



4.7.1	Dimensionamiento de gabinetes	87
4.7.2	Distribución interna de los componentes de control y monitoreo.	88
4.7.3	Montaje del sistema central de supervisión	88
4.8	Funcionamiento y validación del sistema	89
4.8.1	Plataforma Ubidots	89
4.8.2	Comunicación y envío de datos a la plataforma	91
4.8.3	Lógica de funcionamiento.....	91
4.8.4	Flujograma de programación.....	93
4.9	Implementación del prototipo	94
4.9.1	Apoyo del personal técnico de EMELNORTE.....	94
4.9.2	Desmontaje de luminarias existentes	94
4.9.3	Montaje de luminarias y caja de control.....	95
4.9.4	Verificación en la plataforma Ubidots	96
4.9.5	Inspección nocturna y validación de funcionamiento.....	96
4.10	Resultados.....	96
4.10.1	Comportamiento general del sistema por modo de operación.	97
4.10.2	Comparación entre luminarias	97
4.10.3	Comparación entre luminarias en modo diurno (06h00 hasta 17h59).	98
4.10.4	Comparación entre luminarias en modo nocturno base (18h00 hasta 23h59)..	99
4.10.5	Comparación entre luminarias en modo nocturno reducido (00h00 hasta 03h59).	99
4.10.6	Visualización y validación del sistema mediante Ubidots	101
4.10.7	Verificación del funcionamiento mediante eventos	102



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
 Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
CARRERA DE ELECTRICIDAD



4.10.8	Interpretación de resultados	103
4.11	Análisis energético y factibilidad del sistema IoT	103
4.11.1	Consumo energético del sistema IoT.	103
4.11.2	Consumo Total del sistema IoT con los componentes electrónicos	104
4.11.3	Consumo del sistema sin IoT	104
4.11.4	Eficiencia energética: Comparación con sistema sin IoT.....	104
4.11.5	Discusión de factibilidad del sistema IoT.	105
4.12	Conclusiones:	105
4.13	Recomendaciones:	106



INDICE DE FIGURAS

Fig 1. Delimitación del diseño piloto.	21
Fig 2. Funcionamiento de la tecnología LoRa [9].	27
Fig 3. Alumbrado público con Wi-Fi [10].....	28
Fig 4. Interconexión de nodos en el alumbrado público [12].	29
Fig 5. Conexión de la tecnología Zigbee [15].	30
Fig 6. Funcionamiento del LPWAN en el alumbrado público [16].	30
Fig 7. Sensor de corriente SCT013 [20].	34
Fig 8. Sensor de voltaje AC ZMPT101B. Fuente: Sitio web comercial (MercadoLibre).	35
Fig 9. Luminarias públicas con sensores de movimiento [23].	35
Fig 10. Raspberry Pi [28].	37
Fig 11. Arduino Nano con la identificación de pines [31].....	38
Fig 12. Av. Padre Aurelio Espinosa Polit.....	41
Fig 13. Flujograma para el diseño de la red de alumbrado público general con base a tecnología IoT.	45
Fig 14. Visita de campo en la Av. Padre Aurelio.....	47
Fig 15. Medición del radio del redondel de la Católica.	47
Fig 16. Medición de la distancia de los postes.....	48
Fig 17. Código de especificaciones de los postes.....	48
Fig 18. Ubicación de los postes en la Avenida Padre Aurelio Espinosa Polit, el programa de ArcGIS.	48
Fig 19. Diseño actual del alumbrado público en 2D.....	49
Fig 20. Medición de niveles de iluminancia utilizando el luxómetro TENMARS TM-204 en condiciones nocturnas: a) 26.7 lux y b) 16.0 lux.....	55
Fig 21. Estructura de la avenida en simulación del alumbrado público.	56
Fig 22. Parámetros que debe cumplir de la calzada 1 y 2 al igual que la acera peatonal y de la ciclovía.	56
Fig 23. Demostración de la simulación del diseño actual.....	57
Fig 24. Niveles bajos de iluminancia.	57
Fig 25. Introducción de la vía pública de acuerdo con las mediciones tomadas de la calzada, acera, mediana y de la ciclovía.	58



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
 Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
CARRERA DE ELECTRICIDAD



Fig 26. Representación en 3D de la vía pública.	58
Fig 27. Parámetros a cumplir de la calzada 1 y 2 de peatonal y	59
Fig 28. Parámetros a cumplir de la acera	59
Fig 29. Simulación en el software de Dialux con una luminaria de 150 W.	59
Fig 30. Modelado del redondel de la Católica.	61
Fig 31. Simulación de iluminación de la Avenida del sector de La Victoria.	61
Fig 32. Cálculo de la superficie de la carretera del redondel.	61
Fig 33. Simulación de la Avenida con falso color.	62
Fig 34. Módulo SX1278.	63
Fig 35. Conexión Arduino nano con modulo LoRa.	63
Fig 36. Diagrama del diseño del Iot para el alumbrado público.	65
Fig 37. Diagrama general del sistema en bloques.	71
Fig 38. Ubicación de las luminarias IoT en el sector La Victoria, representadas mediante cuadrados y del Gateway central indicado con un triángulo.	72
Fig 39. Raspberry pi 3.	73
Fig 40. Sensor de corriente SCT013 y sensor de Voltaje Zmpt101B (Mercado Libre).	73
Fig 41. Sensor de movimiento PIR [33].	74
Fig 42. Modulo LoRa, utilizado para la comunicación entre nodos.	74
Fig 43. Dimmer [35].	75
Fig 44. Diagrama del módulo Gateway de comunicación.	76
Fig 45. Esquemático de conexión del Gateway.	76
Fig 46. Diagrama del módulo de monitoreo y control de la luminaria.	77
Fig 47. Conexión del sensor de voltaje ZMPT101B.	78
Fig 48. Circuito de polarización para entrada analógica y pines de señal.	79
Fig 49. Esquemático de conexión del sensor PIR: alimentación y señal digital.	79
Fig 50. Regulador de voltaje TLV1117-33 para conversión a 3.3 V.	80
Fig 51. Conexión del LoRa.	80
Fig 52. Diagrama de pines del Arduino mini Pro.	81
Fig 53. Conexión del módulo dimmer para control de carga.	81



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
 Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
CARRERA DE ELECTRICIDAD



Fig 54. Conexión del Arduino nano.81

Fig 55. Conexión de la fuente.82

Fig 56. Medidor digital de energía modelo KWS-AC301.83

Fig 57. Vista 3D de la PCB en KiCad.85

Fig 58. Layout del nodo de control y monitoreo del sistema.85

Fig 59. Layot del módulo Gateway de comunicación.86

Fig 60. PCB con todos los elementos Integrados.86

Fig 61. Esquemático de conexiones eléctricas de alumbrado público.87

Fig 62. Gabinete metálico utilizado para el módulo de control y monitoreo.87

Fig 63. Gabinete plástico utilizado para el módulo de supervisión.88

Fig 64. Gabinete metálico AOSS line.88

Fig 65. Montaje del sistema central de supervisión.89

Fig 66. Interfaz del monitoreo remoto en Ubidots.90

Fig 67. Alertas de la plataforma Ubidots, para futuros mantenimientos.91

Fig 68. Diagrama de flujo del módulo de control.92

Fig 69. Flujograma de programación.93

Fig 70. Apoyo del personal técnico de EMELNORTE durante el montaje del sistema de iluminación.94

Fig 71. Desmontaje de las luminarias para la colocación de las luminarias IoT.95

Fig 72. Montaje de luminarias LED y caja de control del sistema de monitoreo y control.95

Fig 73. Inspección nocturna y validación del funcionamiento del sistema de iluminación inteligente.96

Fig 74. Dashboard general del sistema en la plataforma Ubidots.101

Fig 75. Registro temporal de voltaje, corriente y potencia de la Luminaria 3 durante operación nocturna.101

Fig 76. Comportamiento eléctrico de la luminaria ante la activación del sensor PIR durante el modo nocturno reducido.102



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
 Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
CARRERA DE ELECTRICIDAD



INDICE DE TABLAS

TABLA I	38
TABLA II	43
TABLA III	48
TABLA IV	51
TABLA V	52
TABLA VI	53
TABLA VII	53
TABLA VIII	54
TABLA IX	60
TABLA X	97
TABLA XI	97
TABLA XII	98
TABLA XIII	99
TABLA XIV	100



RESUMEN

En esta investigación se abordó la falta de supervisión y la ineficiencia del alumbrado público del sector La Victoria, en la ciudad de Ibarra, mediante el desarrollo e implementación de un prototipo IoT para monitoreo y control de luminarias LED. Se levantaron dimensiones reales de la vía y se definieron las clases de alumbrado conforme a la Regulación ARCERNNR-007/23, estableciendo como parámetros de verificación los indicadores fotométricos para calzada tipo M4 y para aceras/ciclovía tipo P2, evaluados en DIALux. La simulación confirmó el cumplimiento para P2 con $E_m = 10,01 \text{ lx}$ ($E_{min} = 8,68 \text{ lx}$) y para ciclovía con $E_m = 14,90 \text{ lx}$ ($E_{min} = 9,35 \text{ lx}$); en calzada M4 se obtuvo $L_m = 0,83\text{--}0,85 \text{ cd/m}^2$, $U_o = 0,61\text{--}0,62$, $U_l = 0,75\text{--}0,85$ y $TI = 11\text{--}13\%$, dentro de los límites requeridos, lo que sustentó técnicamente el rediseño propuesto. Para el prototipo se integraron tres luminarias LED con sensor PIR y medición eléctrica de voltaje y corriente, microcontroladores Arduino, comunicación LoRa y una Raspberry Pi 3 como nodo central, con transmisión y visualización en Ubidots mediante MQTT, lo que permitió supervisión remota y registro histórico de datos. En modo nocturno base, las luminarias registraron potencias promedio cercanas a 135,030 W, mientras que en modo atenuado la potencia promedio se redujo a aproximadamente 91,33 W, equivalente a una disminución de $\approx 32,36\%$, manteniendo la capacidad de incrementar la iluminación ante detección de movimiento. Finalmente, al comparar el consumo mensual del escenario con IoT frente al escenario sin IoT, se obtuvo una eficiencia energética de 9,54%, evidenciando la viabilidad del sistema para regulación de potencia, monitoreo remoto y apoyo al mantenimiento del alumbrado público, con verificación fotométrica del diseño mediante simulación.

Palabras clave: Internet de las Cosas, alumbrado público, DIALux, LoRa, monitoreo remoto, Ubidots, eficiencia energética.



ABSTRACT

This research addressed the lack of supervision and energy inefficiency of public lighting in the La Victoria sector (Ibarra, Ecuador) through the development and implementation of an IoT prototype for monitoring and control of LED luminaires. Roadway dimensions were surveyed and lighting classes were defined according to ARCERNNR-007/23. Photometric performance was evaluated in DIALux using the required indicators for an M4 roadway and P2 sidewalks/bikeway. The simulation confirmed compliance for P2 with $E_m = 10.01$ lx ($E_{min} = 8.68$ lx) and for the bikeway with $E_m = 14.90$ lx ($E_{min} = 9.35$ lx). For the M4 roadway, the results were $L_m = 0.83$ – 0.85 cd/m², $U_o = 0.61$ – 0.62 , $U_l = 0.75$ – 0.85 and $TI = 11$ – 13% , within the required limits, supporting the proposed redesign. The prototype integrated three LED luminaires with PIR-based control and electrical measurements (voltage and current), Arduino microcontrollers, LoRa communication, and a Raspberry Pi 3 gateway, with data transmission via MQTT and visualization in Ubidots for real-time supervision and historical records. In night base mode, the luminaires presented an average power of 135.03 W, while in dimmed mode the average power decreased to 91.33 W ($\approx 32.36\%$ reduction), preserving temporary power increase when motion was detected. Finally, the monthly energy comparison between the IoT and non-IoT scenarios yielded a net energy saving of 9.54%, demonstrating the feasibility of the proposed system for power regulation, remote monitoring, and maintenance support in public lighting networks.

Keywords— Internet of Things, public lighting, DIALux, LoRa, remote monitoring, Ubidots, energy efficiency.



CAPITULO I

INTRODUCCIÓN

Tema: Desarrollo de un prototipo de una red de alumbrado público con base a tecnología de Internet de las Cosas para el sector de La Victoria de la ciudad de Ibarra.

1.1. Problema de investigación.

1.1.1 Problemática a investigar.

El alumbrado público es una infraestructura crítica en las ciudades modernas, impactando directamente en la seguridad, movilidad y calidad de vida de los ciudadanos. Sin embargo, en la actualidad, los sistemas de alumbrado público se encuentran en la mayoría de las calles de cualquier urbe, exceptuando las zonas rurales. La conformación de Alumbrado Público (AP) en su mayoría es por luminarias de vapor de sodio (luz amarilla), en la cual su luz tiene un bajo Índice de reproducción cromática (CRI de 20 a 30). En cambio, las luminarias leds tienen un alto CRI (65-95), lo que permite proyectar claramente los colores de los objetos.

La tecnología basada con internet de las cosas implementada en la red de AP representa una oportunidad para mejorar la eficiencia y calidad de la iluminación de las vías públicas que pueden ser de C0 a C5 obteniendo la cantidad de luxes que señala la cantidad de luz que incide sobre una superficie necesario en función de la regulación de alumbrado público para una luz más uniforme. De igual forma, permite un monitoreo constante y una respuesta rápida en el momento en que la luminaria este dañada, en la cual envía un comunicado o una alerta a la página informando que la luminaria se encuentra dañada. Además, puede predecir que la luminaria de un lugar exacto está llegando a sus horas de uso, facilitando el cambio respectivo de la luminaria y manteniendo el servicio de AP constante.

Actualmente, la Av. Padre Aurelio Espinosa Polit en el sector de La Victoria perteneciente a la Parroquia del Sagrario del Cantón Ibarra, cuenta con dos carriles de servicios y la iluminación existente no es suficiente para la afluencia de personas en las noches, ya que es un sector comercial, igualmente por la educación por la Pontificia Universidad Católica del Ecuador sede Ibarra y personas en general.



1.1.2 Formulación de la pregunta de investigación

¿Qué parámetros se deben tener en cuenta para el diseño de un prototipo de una red de alumbrado público implementando el internet de las cosas?

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general:

Desarrollar un prototipo de una red de alumbrado público para el control y supervisión mediante Internet de las cosas (IoT).

1.2.2 Objetivos específicos

- Describir las diferentes tecnologías IoT disponibles para aplicaciones de alumbrado público, considerando su capacidad de monitoreo y supervisión.
- Determinar los parámetros técnicos para el diseño del alumbrado público.
- Desarrollar un prototipo para el control de alumbrado público mediante IoT.

1.3 Alcance y delimitación

Se llevará a cabo una revisión bibliográfica sobre distintas tecnologías de Internet de las cosas aplicado en sistemas de alumbrado público. A demás se realizará un análisis de las falencias en el diseño de la Avenida Padre Aurelio Espinosa Polit, realizando una recopilación de datos como mediciones a través de un luxómetro, para evaluar la iluminación conforme a la Regulación Nro. ARCERNR-007/23, para poder determinar el diseño idóneo en función de las características civiles que conforman tanto la calzada, la distancia entre los postes, el tipo de luminaria y su potencia.

Se propone realizar el diseño con las siguientes tecnologías IoT: sensores PIR, LDR (Fotocelda), sensores de corriente y voltaje; se utilizará un microcontrolador Raspberry Pi 3 para la comunicación inalámbrica con protocolo de comunicación por Lora y protocolo MQTT (Message Queuing Telemetry Transport) sobre la IP. Este último permite la comunicación entre dispositivos de redes de Internet de las cosas. Además, se empleará un servicio de nube donde la información será almacenada en IoT core Ubidots.

Se usará tres luminarias leds, tres sensores LDR (Fotoceldas), tres sensores de corriente, tres sensores de voltaje, tres sensores PIR, 3 Arduino nano, 3 Arduino Pro Micro y 1 Raspberry



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
 Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
CARRERA DE ELECTRICIDAD



Pi 3 y 4 módulos sx1278 Lora con su respectiva antena. El control que se tendrá es que a partir de las 00:00, la luminaria baja su potencia de iluminación, con el sensor de movimiento permitirá a la luminaria volver a su potencia máxima para que los vehículos o peatones que estén pasando por la zona puedan ver de manera adecuada el lugar, además, emitirá una alerta en el servidor indicando si la luminaria tiene algún tipo de fallo o si ya ha cumplido con su vida útil, de igual manera se observarán las mediciones de voltaje, corriente de la luminaria y la potencia que consume.

Se realizará el diseño del circuito con los componentes mencionados y se procederá con el armado del prototipo pequeño, se llevará a cabo la programación los mismos, se realizarán las pruebas y ajustes necesarios que se deban realizar para observar su funcionamiento, también se realizarán simulaciones con Dialux para observar los parámetros fotométricos como: luminancia, relación de alrededores, deslumbramiento, entre otros, para observar la mejor opción de diseño que cumpla con los estándares técnicos solicitados en la regulación de AP antes de ser implementado en el sector de La Victoria (Fig 1), de la cual está comprendida solo la Av. Padre Aurelio Espinosa Polit abarcando así la avenida más concurrida por la Pontificia Universidad Católica del Ecuador sede Ibarra, sitios comerciales y residencias estudiantiles para tener un mejor control de la luminaria.

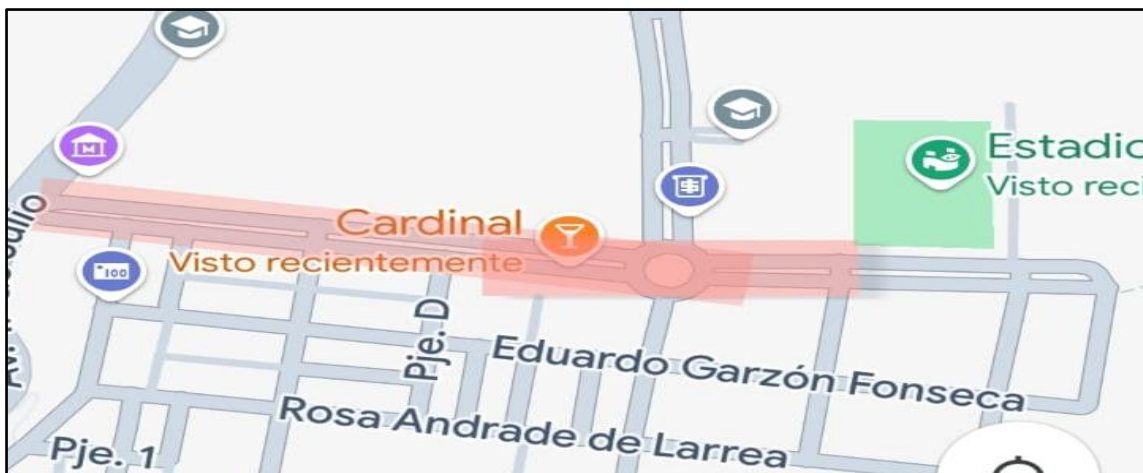


Fig 1. Delimitación del diseño piloto.



1.4 Justificación

La implementación de una red de alumbrado público inteligente constituye una alternativa tecnológica orientada al control y monitoreo eficiente del sistema de iluminación urbana, permitiendo además cumplir con los tiempos de respuesta establecidos por la entidad distribuidora para la reposición o mantenimiento de luminarias. Estas disposiciones se encuentran alineadas con lo estipulado por el Sistema de Alumbrado Público General (SAPG), el cual busca garantizar niveles adecuados de iluminación, continuidad del servicio y seguridad para los usuarios de la vía pública. En este contexto, la incorporación de tecnologías inteligentes en el sector de La Victoria representa una oportunidad para mejorar la gestión del alumbrado y optimizar los recursos disponibles.

Desde el punto de vista técnico y energético, el uso de tecnología actual basada en luminarias LED y sistemas de control inteligentes permite una reducción significativa del consumo eléctrico en comparación con sistemas tradicionales, como las lámparas de vapor de sodio. Las luminarias LED ofrecen un mayor rendimiento lumínico, proporcionando más lúmenes por unidad de potencia, lo que se traduce en una mejor calidad de iluminación con un menor gasto energético. Adicionalmente, la posibilidad de regular la potencia en función del horario y de la presencia de peatones o vehículos contribuye a un uso más racional de la energía eléctrica.

El impacto social del proyecto se refleja directamente en los habitantes del sector de La Victoria, ya que un sistema de alumbrado público inteligente mejora la visibilidad nocturna y fortalece la percepción de seguridad en espacios públicos. La adecuada iluminación de calles y zonas de tránsito favorece la movilidad peatonal y vehicular, además de generar un entorno urbano más confortable y visualmente agradable. Asimismo, la modernización del alumbrado público contribuye a mejorar la imagen del sector, promoviendo un desarrollo urbano más ordenado y acorde con las tendencias tecnológicas actuales.

En términos de viabilidad, el proyecto se plantea como un prototipo piloto, lo que permite evaluar su funcionamiento, desempeño y beneficios en un entorno real antes de considerar una implementación a mayor escala. Esta característica lo convierte en un punto de



partida para el desarrollo futuro de redes de alumbrado público basadas en tecnología IoT, las cuales, debido al avance constante de las tecnologías de comunicación y automatización, tienden a consolidarse como una solución estándar en la gestión de ciudades inteligentes. Por lo tanto, la ejecución de este proyecto no solo es técnicamente factible, sino que también se proyecta como una propuesta sostenible y adaptable a las necesidades futuras del sistema de alumbrado público.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes

El diseño del sistema de iluminación urbana inteligente comprende la creación de una fuente de luz artificial que despliega diversas funciones personalizables para optimizar el alumbrado público en una ciudad inteligente. Este sistema emplea tecnologías de IoT para mejorar la eficiencia energética, la calidad de la iluminación y proporcionar beneficios adicionales al usuario, como el control de la iluminación, la detección de contaminación atmosférica PM2.5.

El sistema propuesto de alumbrado público por Dr. Hamayun Kabir, Abdullah AI Noman, Abdullah AI Afiq, Reajul Hasan, Mohammad y Ahmad incorpora resistencias dependientes de la luz (LDR), sensores ultrasónicos y relojes en tiempo real (RTC) como elementos clave de entrada para asegurar un rendimiento óptimo. El LDR monitorea los cambios en la intensidad lumínica durante el día y las variaciones climáticas, representadas en unidades de voltaje, para ajustar la iluminación en consecuencia [1].

En este artículo, se describe y se detalla la elaboración de una plataforma experimental para el monitoreo de luminarias fotovoltaicas independientes, la cual consta de tres componentes principales: los nodos de comunicación, el administrador y el software de monitoreo. Demostramos que esta plataforma permite mejorar la eficiencia energética del sistema de alumbrado público, gestionar el alumbrado de manera remota y optimizar el mantenimiento del sistema, lo que conlleva a una reducción de los costos de mantenimiento. En este contexto, la



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
CARRERA DE ELECTRICIDAD



plataforma propuesta incluye una red de sensores, específicamente el modelo actual INA219 [2].

Los sistemas de iluminación inteligente han tenido relevancia debido a su capacidad de proporcionar control autónomo de la iluminación a través de sensores integrados, datos de usuarios, servicios en la nube y contribuciones directas de los usuarios. Entre los diversos beneficios que estos sistemas pueden ofrecer, el ahorro energético se destaca como uno de los más inmediatos [3].

El proceso de sincronización de LoRaCELL permitió a los dispositivos enviar mensajes con cierto nivel de seguridad, permitiendo la recepción de datos de todos los sensores dentro del mismo ancho de banda. Además, la conexión permite actualizaciones de firmware inalámbricas (OTA), ya que el dispositivo central puede enviar un mensaje a todos los dispositivos, evitando que envíen mensajes y solo los reciban, actualizando así el firmware sin necesidad de presencia de equipos. Esta funcionalidad es una de las propuestas de futuro para el avance de la investigación.

Otro criterio es que los sensores elegidos implementen con éxito las ideas previstas al inicio del proyecto, como la capacidad de detectar fallos en la lámpara y calcular el gasto medio del equipo. Se pretende optimizar esta versión de hardware para un sistema más compacto y confiable, que permita mayor seguridad, aislamiento de las condiciones ambientales y mayor eficiencia en aspectos energéticos y de datos [4].

Las tecnologías SCADA e IoT se utilizan para sistemas de seguimiento de procesos de trabajo y visores de datos que se realizan de forma continua y en tiempo real. El resultado es que el modo PLS inteligente es un 43% más eficiente que los modos PLS convencionales [5].

Los sistemas inteligentes basados en IoT están integrados para generar datos urbanos que faciliten la planificación de la próxima generación de SuperCity. A medida que las demandas y tendencias han evolucionado, también lo han hecho los conceptos de desarrollo urbano. Gracias a las continuas innovaciones de vanguardia, las ciudades inteligentes son ahora más avanzadas que en el pasado.



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
CARRERA DE ELECTRICIDAD



Las comunidades urbanas inteligentes están equipadas con diversos dispositivos electrónicos utilizados para fines específicos, como cámaras para el control y sensores para el transporte. Una ciudad inteligente es un entorno complejo caracterizado por el uso intensivo de tecnologías de la información y la comunicación (TIC), con el objetivo de hacer que las áreas urbanas sean más atractivas, funcionales y fascinantes para el desarrollo. En una ciudad inteligente, las innovaciones en datos y comunicaciones se utilizan para mejorar la productividad, informar al público y apoyar tanto a las organizaciones impulsadas por los ciudadanos como a los gobiernos locales. Los enfoques de los conceptos de ciudad inteligente incluyen la planificación maestra, edificios inteligentes, energía inteligente, gestión inteligente del agua y los residuos, movilidad y tránsito inteligentes, iluminación inteligente y ciberseguridad. [6]. Muchos de los proyectos actuales de ciudades inteligentes implican la implementación de servicios públicos nuevos o mejorados [1]. En la cual nos dice que muchos de los proyectos actuales de ciudades inteligentes están enfocados en la implementación de servicios públicos nuevos o mejorados, lo cual refleja un esfuerzo significativo hacia la modernización y la mejora de la calidad de vida urbana. Estas iniciativas no solo buscan optimizar la eficiencia de los servicios básicos como el transporte, la energía y la gestión de residuos, sino que también están orientadas a integrar tecnologías innovadoras para hacer las ciudades más sostenibles, seguras y habitables para sus residentes.

El impulso principal detrás del concepto de ciudad inteligente radica en mejorar la eficiencia de los servicios urbanos y promover un desarrollo más sostenible. Las tecnologías de la información y la comunicación (TIC) desempeñan un papel fundamental al permitir ciudades más inteligentes, accesibles y transparentes. En este artículo se introduce una nueva arquitectura que utiliza conceptos clave del Internet del Futuro (FI) para abordar los desafíos inherentes a la creación de estas ciudades avanzadas [7]. Este párrafo subraya cómo las ciudades inteligentes buscan integrar innovaciones tecnológicas para mejorar la calidad de vida urbana. Al enfocarse en la eficiencia y sostenibilidad, además de aprovechar las TIC, se busca transformar los servicios urbanos tradicionales en sistemas más eficientes, accesibles y centrados en las necesidades de los ciudadanos. La referencia al Internet del Futuro destaca la importancia de



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
CARRERA DE ELECTRICIDAD



adoptar enfoques avanzados y adaptativos para superar los desafíos que surgen en el camino hacia la creación de ciudades más inteligentes.

2.2 Bases teóricas

2.2.1 Introducción de la IoT en el Alumbrado Público

En la actualidad, el acelerado avance de las tecnologías ha permitido que el ser humano transforme su vida de manera significativa. Entre los campos más destacados de esta evolución se encuentra el ciberespacio, que ha hecho posible que el Internet de las Cosas (IoT) sea una realidad actual y no solo una visión del futuro. Esta tecnología se beneficia de diversas mejoras, como microprocesadores más avanzados, protocolos de comunicación eficientes, mayores anchos de banda en las redes, amplias capacidades de almacenamiento de datos, y tecnologías de sensores.

El IoT sobresale por sus múltiples aplicaciones, tales como la conexión de dispositivos cotidianos a la red, lo cual facilita una interacción y automatización sin precedentes. Un ejemplo notable de esta aplicación es el alumbrado público inteligente. Integrando sensores y sistemas de comunicación, el alumbrado público puede ser controlado de manera más eficiente, permitiendo el ahorro eléctrico y la reducción de costos de mantenimiento, en la cual no será necesario realizar inspecciones manuales innecesarias. Estos sistemas inteligentes pueden ajustar la intensidad de la luz en función de la presencia de peatones o vehículos, controla la iluminación para evitar el exceso de brillo, permitiendo una visualización óptima sin deslumbrar a las personas, detectar fallos en tiempo real y reportarlos automáticamente a través de la nube o por medio de algún programa, agilizando las reparaciones de las luminarias.

Además, la implementación del alumbrado público inteligente en diversas ciudades ha demostrado mejoras significativas que contribuyen al desarrollo de ciudades más sostenibles al disminuir el consumo eléctrico y las emisiones de CO₂, mejorando la calidad de vida y comodidad de los ciudadanos. A medida que sigan desarrollándose este tipo de tecnologías que integran el IoT, es probable que se vea una integración mayor del IoT en diversos aspectos de la vida, abriendo nuevas posibilidades para la innovación y el desarrollo tanto en entornos urbanos y rurales inteligente.



2.2.2 Descripción de las tecnologías de internet de las cosas.

Existen diversas tecnologías en base al internet de las cosas los cuales son: LoRa, WIFI, Bluetooth, Zigbee, LPWAN, entre otros los encargados de conectar a los distintos dispositivos y de recolectar datos para después ser enviados al usuario.

2.2.3 LoRa.

Para la instalación de LoRa en el AP se tiene el modelo que se observa en la Fig 2, se instala el hardware en la cual consiste en la instalación de los nodos en las luminarias para monitorear la lampara y colocar el gateways LoRa en un lugar estratégico para recibir y enviar los datos, implementación del software como es la base de datos el analizador y la visualización de los resultados que se están obteniendo de las luminarias.

Es una tecnología de modulación basada en espectro ensanchado, lo que le permite resistir el ruido, las señales de múltiples trayectos y el efecto Doppler, permite comunicar dispositivos hasta 30 kms en campo abierto [8], con un mínimo consumo de energía en los nodos remotos. Sin embargo, esta capacidad se logra a costa de tener un ancho de banda mucho menor en comparación con otras tecnologías inalámbricas.

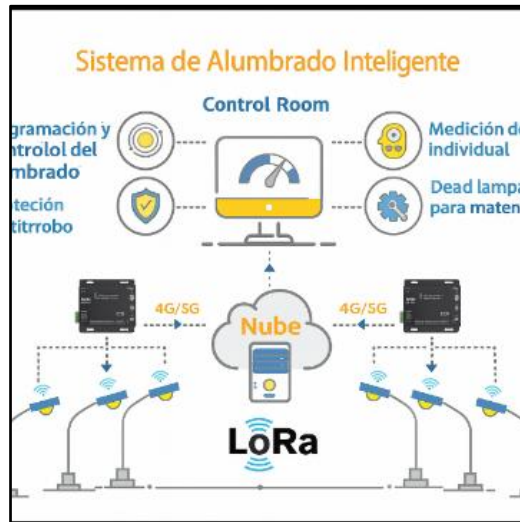


Fig 2. Funcionamiento de la tecnología LoRa [9].

Esta tecnología permite a los dispositivos enviar mensajes con un nivel intermedio de seguridad, permitiendo la recepción de datos de los sensores utilizados en el alumbrado público,



dentro de un mismo ancho de banda [4]. De igual forma el dispositivo central envía un mensaje a todos los dispositivos para que de esta manera pueda actualizar el firmware sin necesidad de que la mano del hombre intervenga.

2.2.4 *WI-FI.*

El WiFi es altamente beneficioso para el IoT debido a que se puede encontrar en distintos lugares del mundo y su uso generalizado en la provisión de acceso a Internet, convirtiéndolo en la elección preferida para conectar dispositivos de IoT en hogares y entornos industriales por igual [9], como en la Fig 3. En la mayoría de los entornos IoT, el WiFi desempeñará un papel crucial, ya sea de forma independiente o en combinación con otros protocolos y tecnologías especializadas.



Fig 3. Alumbrado público con Wi-Fi [10].

Para la implementación del WiFi en el alumbrado público, el procedimiento es el siguiente: primero, el sistema de AP se conectó a un controlador de la cual recibía información de cada luminaria, el cual está conectada en nodos, esa información recolectada se enviaba de manera inalámbrica por medio de la red de internet permitiendo así tener un control del sistema de alumbrado público de manera remota, de igual forma se recibía información sobre cualquier tipo de fallo en las luminarias [11].

Realizar esta implementación no solo facilita tener un dominio del alumbrado, sino que también se tiene una mejor respuesta ante los problemas técnicos que tenga la luminaria debido a que la información recolectada es en tiempo real.



2.2.5 Bluetooth

Para implementar este tipo de tecnología en las luminarias se utiliza protocolos inalámbricos Bluetooth, debido a su alcance limitado y se instalaron módulos Bluetooth, lo que permitió que las luminarias se interconecten y que los dispositivos BLE transmitieran datos entre sí para ampliar el alcance [11], de la cual cada nodo solo necesita enviar datos al siguiente nodo como tenemos en la siguiente Fig 4 como representación de una creación de redes autorreparables y minimiza el consumo de eléctrico.



Fig 4. Interconexión de nodos en el alumbrado público [12].

El control se realizó mediante dispositivos inteligentes (Tablets, computadoras, celulares), estos recibían la información de la luminaria por medio de microcontroladores o controladores la cual estarían conectados a los módulos Bluetooth y de la misma forma el dispositivo inteligente podía realizar maniobras de apagado o encendido a través de los módulos BLE, permitiendo un mejor control del AP, facilitando la implementación y el mantenimiento.

2.2.6 Zigbee

ZigBee ofrece flexibilidad y excelente compatibilidad tanto a desarrolladores de aplicaciones y hardware IoT como a usuarios finales. Este protocolo es valorado por su bajo costo, consumo energético eficiente y rápida conectividad inalámbrica, siendo especialmente destacado en aplicaciones como hogares inteligentes donde supera a otras tecnologías inalámbricas en múltiples aspectos [13, 14].



Los Zigbees son módulos que fueron equipados en las luminarias permitiendo la comunicación inalámbrica entre cada una de las lámparas, estableciendo una red de malla Zigbee, de la cual funciona de manera similar a la conexión bluetooth con la diferencia de que tiene un alcance de 200 m, en la Fig 5 se tiene una representación de su conexión, admite la topología de árboles, permitiéndole desplegarse a una mayor escala, con una velocidad de respuesta más rápida para el control de alumbrado público [13].

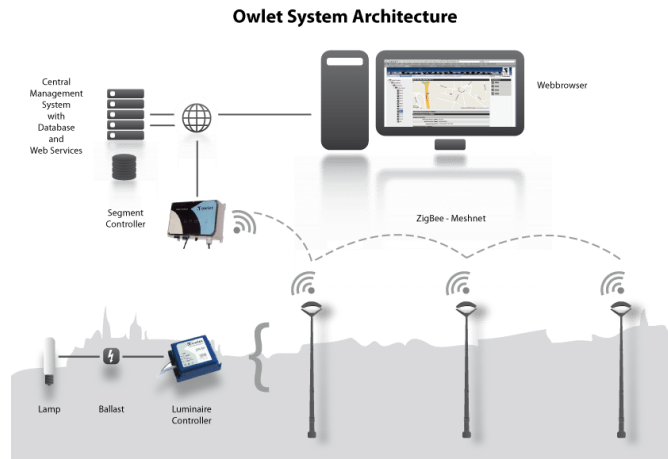


Fig 5. Conexión de la tecnología Zigbee [15].

2.2.7 LPWAN

Las redes LPWAN son tecnologías inalámbricas diseñadas para proporcionar conectividad IoT de bajo costo en áreas extensas, en la Fig 6 se puede observar cómo funciona este sistema. Estas redes son ideales para aplicaciones que requieren comunicación de datos de baja velocidad y tasa de transferencia [16].

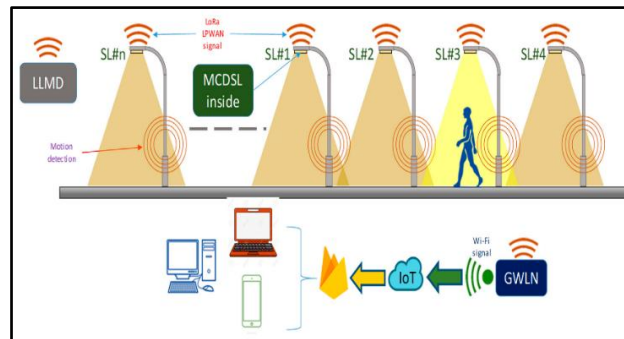


Fig 6. Funcionamiento del LPWAN en el alumbrado público [16].



En el contexto de él alumbrado público, LPWAN funcionan a través de un dispositivo de puerta enlace con un servidor de red, donde los dispositivos envían la información a la puerta de enlace por medio de un salto inalámbrico y estas puertas de enlace reenvían los mensajes hacia el servidor de red central y desde la red central también se podían enviar datos a los dispositivos de las lámparas, realizando esta comunicación por medio de la red LPWAN.

2.2.8 Sensores y Dispositivos utilizados en el Alumbrado Público

Para el funcionamiento del nodo IoT de alumbrado público, se consideró una estructura eléctrica que permitió alimentar de manera estable a los dispositivos de control, sensores y módulos de comunicación. El nodo fue alimentado mediante una fuente principal de 5 V DC, utilizada para el funcionamiento de los microcontroladores Raspberry Pi, el Arduino Nano y el Arduino Pro-Micro, además de los sensores de corriente, voltaje, movimiento y del dimmer implementados en el sistema. Dentro de la placa de circuito impreso se incorporó un regulador de voltaje tipo a sm1117, el cual permitió reducir el nivel de tensión de 5 V a 3,3 V DC, requerido para la correcta operación del módulo de comunicación LoRa.

La red eléctrica que alimenta la luminaria, con un nivel de tensión de 127 V AC nominal, ingresó inicialmente a través de un interruptor termomagnético de 5 A, el cual fue implementado como elemento de protección frente a sobrecorrientes, cortocircuitos o posibles fallas eléctricas, garantizando la seguridad tanto de la luminaria como de los dispositivos electrónicos del sistema de control y monitoreo.

La medición de la corriente se realizó mediante un sensor tipo pinza amperimétrica SCT-013, el cual fue colocado alrededor del conductor de fase que alimenta a la luminaria, lo que permitió obtener el valor de la corriente consumida, proporcionando aislamiento eléctrico, mayor seguridad durante la medición y reducción del riesgo para los dispositivos electrónicos.

Por otro lado, la medición de voltaje se efectuó mediante un sensor de voltaje en corriente alterna tipo ZMPT101B, el cual fue conectado en paralelo a la salida del dimmer. Esta configuración permitió registrar el voltaje aplicado directamente a la luminaria bajo diferentes condiciones de operación, tales como funcionamiento durante el horario nocturno inicial, comprendido entre las 18:00 y las 23:59 horas, la luminaria operó a potencia nominal,



garantizando un nivel adecuado de iluminación. A partir de las 00:00 horas y hasta las 03:59, el sistema redujo la potencia de la luminaria a un 60 %, como parte de la estrategia de control nocturno programada. En este intervalo, cuando el sensor de movimiento tipo PIR detectó la presencia de peatones o vehículos, la potencia de la luminaria se incrementó de manera temporal hasta su nivel nominal, retornando posteriormente al valor reducido una vez que no se detectó movimiento, entre las 04:00 y las 05:59 horas, la luminaria volvió a operar a potencia nominal, previo al inicio del periodo diurno. Finalmente, a partir de las 06:00 horas y hasta las 17:59, la luminaria permaneció apagada, condición que fue controlada mediante la fotocelda, la cual inhibió el encendido durante el día al detectar niveles suficientes de iluminación natural.

El dimmer fue el dispositivo encargado de regular la potencia suministrada a la luminaria. Su funcionamiento se basó en el control del ángulo de conducción de la señal de corriente alterna, modificando la porción de la onda de voltaje aplicada a la carga en cada semiciclo. Al retrasar el punto de activación de la señal, el dimmer redujo el valor eficaz del voltaje entregado a la luminaria, disminuyendo la potencia y el nivel de iluminación [17]. De manera inversa, al permitir una mayor conducción de la onda, el dimmer incrementó el voltaje eficaz aplicado, acercándolo al valor nominal de la red eléctrica de 127 V AC, elevando la potencia y la intensidad luminosa cuando el sistema lo requirió.

Todos los sensores, el dimmer y los microcontroladores, incluyendo el Arduino Nano y el Arduino Pro Micro, fueron alimentados desde la misma fuente de energía, con el fin de mantener una referencia común y asegurar un funcionamiento estable del sistema. Esta configuración permitió integrar el monitoreo eléctrico, el control de potencia y la transmisión de datos dentro de un sistema coordinado, protegido y orientado al funcionamiento eficiente del alumbrado público inteligente.

2.2.9 Comunicación entre nodos del sistema IoT

La comunicación del sistema se realizó mediante tecnología inalámbrica de largo alcance, la cual permitió la transmisión de datos desde cada luminaria hacia un nodo central de supervisión. En particular, se empleó tecnología LoRa, cuyo alcance teórico puede superar los 10 km en campo abierto y varios kilómetros en entornos urbanos, dependiendo de las



condiciones del entorno. Esta característica permitió cubrir adecuadamente el área de implementación del sistema.

Cada nodo de luminaria se encargó de recolectar la información proveniente de los sensores eléctricos y de estado, procesarla localmente y enviarla de forma periódica a través del módulo de comunicación inalámbrica.

El intercambio de información entre los nodos y el sistema central se efectuó utilizando módulos de comunicación LoRa, los cuales permitieron establecer enlaces de bajo consumo energético y largo alcance, adecuados para aplicaciones de alumbrado público esta tecnología facilitó la transmisión de datos correspondientes a variables como voltaje, corriente, potencia y estado operativo de la luminaria, sin necesidad de una red de comunicación cableada.

El nodo central, implementado sobre una plataforma de procesamiento, recibió los datos enviados por los nodos de monitoreo y actuó como gateway del sistema. En este contexto, el gateway es un dispositivo encargado de interconectar los nodos IoT con redes de mayor alcance, actuando como intermediario entre la red de sensores y la infraestructura de comunicación externa. En el sistema propuesto, el gateway recibe la información transmitida por los nodos mediante tecnología LoRa y la envía a la plataforma en la nube a través de una conexión a Internet, permitiendo el monitoreo y control del alumbrado público.

Esta arquitectura de comunicación permitió una supervisión remota y continua del sistema de alumbrado público, garantizando la integridad de la información transmitida y la correcta coordinación entre el módulo Gateway de comunicación, los nodos de monitoreo y control y la plataforma de visualización de Ubidots. De esta manera, el sistema integró el monitoreo eléctrico, el control de potencia y la comunicación inalámbrica en una solución IoT funcional.

2.2.10 Sensor de Corriente - SCT013.

Los sensores SCT-013 son dispositivos de medición de corriente que permitían monitorear la intensidad sin cortar el conductor. Funcionaban como transformadores de corriente, en la Fig 7 se tiene su diagrama de funcionamiento. Proporcionando mediciones mediante inducción electromagnética, tienen un núcleo ferromagnético dividido en dos que



permite su uso sin interrumpir el circuito [18]. Algunos modelos ofrecen salidas de intensidad o tensión, siendo la de tensión más sencilla de conectar. La precisión era del 1-2% si el núcleo se cerraba bien, evitando desviaciones de corriente y obteniendo valores algo más precisos [19].

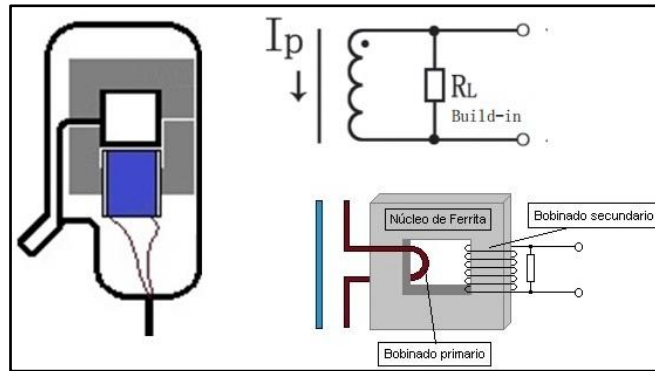


Fig 7. Sensor de corriente SCT013 [20].

La integración de sensores avanzados, como el sensor de corriente SCT013, se utilizaba para monitorear en tiempo real el consumo de energía eléctrica de cada luminaria. Su capacidad para medir la corriente sin necesidad de contacto directo con el conductor lo convirtió en una herramienta ideal para aplicaciones en entornos públicos.

Uno de los principales beneficios del sensor SCT013 Hall en el alumbrado público fue proporcionar datos precisos sobre el consumo de electricidad [15], el sensor permitía a los administradores del alumbrado identificar patrones de uso y detectar anomalías. Esto facilitaba ajustar la intensidad de las luces según las condiciones ambientales o reducir el consumo durante períodos de alta demanda, de igual forma la información proporcionada por el sensor se utilizaba para realizar un mantenimiento predictivo, permitiendo la detección temprana de fallos o necesidades de reemplazo, y evitando así costosos tiempos de inactividad de la luminaria.

2.2.11 Sensor de Voltaje AC ZMPT101B.

El ZMPT101B cuenta con un transformador de voltaje de alta precisión que permite la medición de voltajes alternos con una alta sensibilidad. Este transformador, junto con un circuito integrado de acondicionamiento de señal, proporciona una salida analógica proporcional al voltaje de entrada, lo que facilita su integración con microcontroladores y otros sistemas de procesamiento de señales, como Arduino, Raspberry Pi o entre otros [21]. El sensor se conecta



a la fuente de voltaje AC a través de sus terminales de entrada, mientras que la salida analógica se conecta a un microcontrolador o a un sistema de adquisición de datos. Es importante asegurarse de que el sensor esté correctamente calibrado para obtener mediciones precisas, lo cual puede hacerse mediante un potenciómetro ajustable incluido en el módulo, en la Fig 8 se puede observar a detalle.

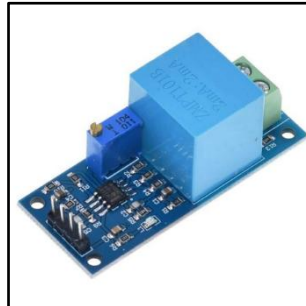


Fig 8. Sensor de voltaje AC ZMPT101B. Fuente: Sitio web comercial (MercadoLibre).

Una de las principales aplicaciones del ZMPT101B en el alumbrado público es la monitorización en tiempo real del voltaje suministrado a las luminarias, el sensor permitía a los administradores identificar problemas relacionados con fluctuaciones de energía que podrían afectar el funcionamiento de las luces, esto ayudaba a prevenir daños en las luminarias causados por sobrevoltajes o caídas de voltaje, contribuyendo a la prolongación de la vida útil de los equipos y reduciendo los costos de mantenimiento [22].

2.2.12 Sensores de movimiento

Un sensor de movimiento es un dispositivo electrónico diseñado para activar o desactivar un sistema cuando detecta movimiento en el área donde está instalado, como se observa en la Fig 9 la cual conforme se moviliza la persona se van encendiendo las luminarias.



Fig 9. Luminarias públicas con sensores de movimiento [23].



El funcionamiento de estos dispositivos variaba según su forma de trabajo, adaptándose a diferentes tecnologías y métodos de detección para cumplir con sus funciones específicas [24]. Por ejemplo, en el uso del sensor de movimiento en el alumbrado público permitió mantener las luminarias en una intensidad lumínica baja y en el momento en el que un peatón este caminando por la zona, la iluminación vaya aumentando de a poco para que no sea una molestia visual al momento de pasar por la acera.

2.2.13 Controladores inteligentes.

Los controladores inteligentes son dispositivos encargados de gestionar y automatizar sistemas mediante el uso de capacidades de procesamiento, comunicación y control en tiempo real [25]. Estos controladores integran componentes de hardware y software que permiten la adquisición de datos, el procesamiento de información y la ejecución de acciones de control sobre equipos eléctricos y electrónicos.

En sistemas de alumbrado público inteligente, los controladores permiten el monitoreo remoto de variables eléctricas, la regulación de la intensidad lumínica y la generación de alertas ante condiciones anómalas, contribuyendo a una operación más eficiente y flexible del sistema.

La implementación de controladores inteligentes suele realizarse mediante plataformas de cómputo y microcontroladores programables, las cuales actúan como unidades de control dentro del sistema [26]. Entre las plataformas comúnmente empleadas para este propósito se encuentran Arduino, Raspberry Pi y Orange Pi, las cuales, al integrarse con sensores, actuadores y módulos de comunicación, permiten desarrollar soluciones de control inteligente aplicadas al alumbrado público.

2.2.14 Raspberry Pi 3.

Fig 10 es el Raspberry Pi 3 de la cual es una serie de ordenadores de placa única, su principal objetivo fue promover la enseñanza de la informática básica en las escuelas y en los países en desarrollo. Lanzada por primera vez en 2012, Raspberry Pi se convirtió rápidamente en una herramienta popular entre los entusiastas de la tecnología, debido a su bajo costo, su tamaño compacto y su versatilidad [27].

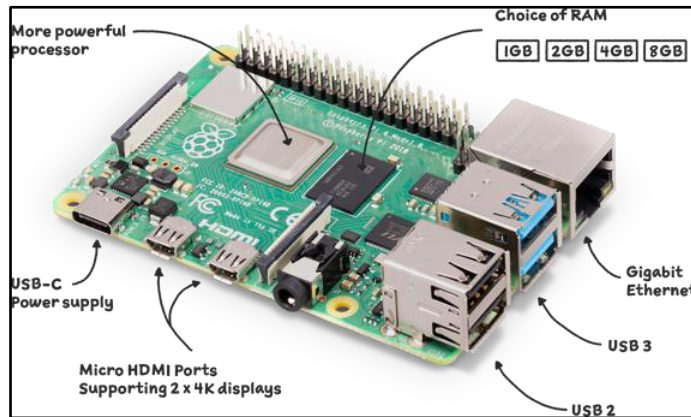


Fig 10. Raspberry Pi [28].

Una de las principales funciones de la Raspberry Pi en el alumbrado público fue actuar como un controlador central para los sistemas de iluminación, su capacidad de procesamiento, el Raspberry Pi podía controlar múltiples sensores y actuadores instalados en las luminarias [29], como sensores de corriente, movimiento y voltaje. Estos sensores recogían datos en tiempo real sobre las condiciones ambientales y operativas.

Su conectividad avanzada, incluyendo Wi-Fi y Ethernet, permitía que las luminarias se conectaran a una red centralizada. [9] Esto posibilitaba el monitoreo y el control remoto de las luces, permitiendo que el sistema tenga actualizaciones en tiempo real sobre el estado de las luminarias, programar horarios de encendido y apagado, y realizar ajustes según las necesidades operativas.

Además, el microcontrolador al recopilar y almacenar grandes volúmenes de datos sobre el rendimiento de las luminarias y las condiciones operativas, el Raspberry Pi ayuda a identificar patrones y posibles problemas antes de que se convirtieran en fallos críticos, en la facilitaba la planificación efectiva del mantenimiento y la reducción de tiempos de inactividad, mejorando el sistema operativo de la luminaria.

2.2.15 Arduino Nano

El uso de Arduino en sistemas de alumbrado público inteligente permite automatizar el encendido, control y detección de fallas en luminarias mediante sensores conectados a los pines de control como se muestra en la Fig 11. Diversos estudios demuestran que estos sistemas



reducen el consumo energético y optimizan el mantenimiento al permitir supervisión en tiempo real [30]. Desde el punto de vista técnico, Arduino resulta una plataforma adecuada por su bajo costo, facilidad de integración con sensores y flexibilidad para aplicaciones de control urbano.

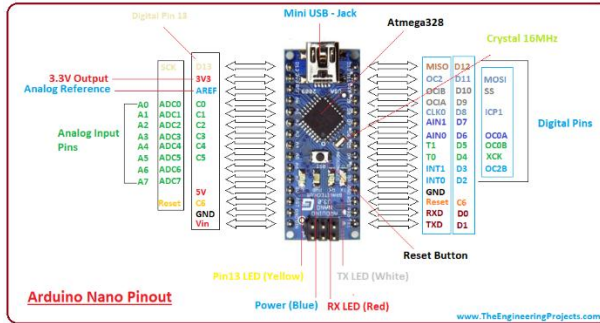


Fig 11. Arduino Nano con la identificación de pines [31]

2.3 Selección y justificación de los componentes del sistema IoT de alumbrado público

De acuerdo con los criterios establecidos en el capítulo 2, en esta sección se detallan los componentes seleccionados para el desarrollo del prototipo del sistema IoT de alumbrado público. La elección de cada elemento responde a aspectos como eficiencia energética, compatibilidad con otros módulos, facilidad de programación, disponibilidad local y coste. A continuación, se describen los materiales utilizados y la justificación técnica de su elección frente a otras alternativas disponibles en el mercado.

2.3.1 Comparación de componentes seleccionados con otras alternativas

A continuación, en la TABLA I se detallan las razones técnicas por las cuales se eligieron ciertos dispositivos y tecnologías frente a otras opciones evaluadas.

TABLA I
COMPARATIVA DE LOS ELEMENTOS SELECCIONADOS.

Componentes	Opción Seleccionada	Otras opciones evaluadas	Justificación
Microcontrolador	Arduino Nano / Pro mini	ESP8266, ESP32, Arduino UNO, Arduino Mega, Pro-Micro	Se seleccionaron Arduino Nano y Mini por su tamaño reducido, bajo consumo energético y facilidad de montaje en espacios limitados como luminarias. El Arduino Mega ofrece muchos pines y más memoria, pero su tamaño y consumo lo hacen poco práctico para este diseño compacto. El Pro-Micro



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
 Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
CARRERA DE ELECTRICIDAD



			también es pequeño, pero presenta menos pines disponibles, requiere conversión externa para carga y programación, y su compatibilidad con algunos módulos es limitada en comparación con Nano/Mini. El ESP32 y ESP8266 tienen conectividad Wi-Fi, pero consumen más energía. El uno fue descartado por su tamaño mayor.
Sensor de Voltaje	ZMPT101B	HLW8012, INA219	El ZMPT101B ofrece medición precisa de voltaje AC, buena sensibilidad y es fácil de calibrar. El HLW8012 requiere programación más compleja y es más propenso a ruido. El INA219 es adecuado solo para corriente continua.
Sensor de corriente	SCT-013	ACS712	El SCT-013 es ideal para corriente alterna, ofrece aislamiento galvánico y un mayor rango de corriente que el ACS712, que es más adecuado para corrientes más bajas y en DC.
Sensor de movimiento	HC-SR501	PIR AM312, sensor ultrasónico HC-SR04	El HC-SR501 tiene un buen alcance, es económico y confiable. El AM312 tiene menor rango, aunque menor consumo. El HC-SR04 no detecta movimiento térmico, por lo que no es adecuado para detectar personas.
Comunicación	LoRa(1278).	WiFi, Zigbee, Bluetooth.	LoRa fue elegida por su gran alcance y bajo consumo energético, ideal para zonas urbanas con separación entre luminarias. Wi-Fi y Zigbee tienen menor alcance y mayor consumo. Bluetooth fue descartado por su escaso alcance operativo.
Nodo central	Raspberry pi 3B+.	Pc industrial, ESP32 con Wifi, Orange pi	La Raspberry Pi permite procesamiento local, conectividad múltiple y uso de plataformas como Node-RED o MQTT. El PC industrial fue descartado por su alto costo y tamaño. El ESP32, aunque versátil, no tiene suficiente capacidad para monitoreo y procesamiento en tiempo real con múltiples nodos.



			El Orange Pi fue considerado, pero tiene menor soporte comunitario, problemas de compatibilidad en ciertos sistemas operativos, y menor estabilidad que la Raspberry Pi para este tipo de implementación.
Control de intensidad	Dimmer AC con control PWM.	Reveladores, módulos SSR.	Los dimmers permiten control gradual de la intensidad luminosa, lo que es clave para eficiencia energética y adaptación a condiciones del entorno. Los relevadores solo ofrecen encendido/apagado. Los SSR ofrecen durabilidad, pero los modelos básicos no permiten regulación continua de potencia.

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 *Introducción*

En este proyecto se llevó a cabo una revisión bibliográfica sobre distintas tecnologías de Internet de las Cosas (IoT) aplicadas en sistemas de alumbrado público. Además, se realizó el levantamiento de datos de la Avenida Padre Aurelio Espinosa Polít, ubicada en el cantón Ibarra en el sector de La Victoria, recopilando datos mediante mediciones con un luxómetro para evaluar la iluminación conforme a la Regulación Nro. ARCERNNR-007/23. Esto permitió determinar el diseño idóneo en función de las características civiles que conforman tanto la calzada, la distancia entre los postes, el tipo de luminaria y su potencia.

Para el diseño, se propusieron los siguientes materiales: sensores PIR, sensor de corriente y voltaje, utilizando un Raspberry pi 3 para la comunicación inalámbrica con protocolo de comunicación LoRa y protocolo MQTT (Message Queuing Telemetry Transport) sobre la IP. Este último permite la comunicación entre dispositivos de redes de IoT. Además, se empleó un servicio de nube donde la información fue almacenada en el Ubidots.

El sistema utilizó veintitres luminarias LED, veintitres sensores PIR; el control implementado permitía que a partir de las 00:00, la luminaria baja su potencia de iluminación, con el sensor de movimiento permitirá a la luminaria volver a su potencia máxima para que los



vehículos o peatones que estén pasando por la zona puedan ver de manera adecuada el lugar. Asimismo, se emitían alertas en el servidor indicando si las luminarias presentaban algún tipo de fallo o si ya habían cumplido con su vida útil. También se observaban las mediciones de voltaje, corriente y potencia de las luminarias.

Se realizaron simulaciones con Dialux para observar los parámetros fotométricos como luminancia, relación de alrededores, deslumbramiento, el efecto cebra, entre otros, con el fin de determinar la mejor opción de diseño que cumpliera con los estándares técnicos solicitados en la regulación. Se diseñó el circuito con los componentes mencionados, se realizó la programación de estos y se llevaron a cabo las pruebas y ajustes necesarios para observar su funcionamiento. Todo esto antes de ser implementado en el sector de La Victoria (Fig15), específicamente en la Avenida Padre Aurelio Espinosa Polit, una avenida concurrida por la Pontificia Universidad Católica del Ecuador sede Ibarra, sitios comerciales y residencias estudiantiles, para tener un mejor control de la iluminación.

3.2 Descripción del área de estudio

Se realizará el estudio en el sector de La Victoria, Ibarra, Fig12 referencia del sitio, de la cual está comprendida solo la Av. Padre Aurelio Espinosa Polit, esta avenida fue seleccionada por ser una avenida concurrida por la Pontificia Universidad Católica del Ecuador sede Ibarra, sitios comerciales y residencias estudiantiles.



Fig 12. Av. Padre Aurelio Espinosa Polit.

3.3 Tipos de investigación:

- Investigación Exploratoria.
- Investigación documental y bibliográfica.



- Investigación de campo.
- Investigación Experimental.

3.3.1 Investigación Exploratoria.

Este tipo de investigación fue de comprender las necesidades del sector de La Victoria con respecto al alumbrado público y observar fallas en las luminarias, una mejor visibilidad para las personas que suelen caminar por las calles del sector y explorar como el IoT puede dar soluciones efectivas ante las problemáticas mencionadas.

3.3.2 Investigación documental y bibliográfica.

En el presente proyecto se utilizó el método de investigación documental en la cual se revisó la REGULACIÓN NRO. ARCERNNR-007/23 y el Informe N°. INF-DRETSE-2023-042 en la cual se tiene información de los parámetros que debe cumplir un alumbrado público general.

La recopilación de información teórica y tecnológica a través de documentos y recursos en línea facilitó la construcción del marco teórico, antecedentes sobre los principales tipos de tecnologías usadas en un sistema de alumbrado público en base al internet de las cosas.

3.3.3 Investigación de campo

Se realizaron visitas al sector para contabilizar cuantas luminarias de vapor de sodio en encuentran en el lugar de limitación y cuantas estaban fallando en ese momento para así identificar las necesidades específicas y poder solucionar las problemáticas que tenía el sector.

3.3.4 Investigación Experimental

El método experimental es la implementar un prototipo para medir las variables del consumo energético con la potencia más alta y la más baja y la eficiencia ante la detección de una falla en la luminaria.

3.4 Métodos

Los métodos aplicados en la investigación son: el método cualitativo, método cuantitativo y métodos computacionales y simulaciones.



3.4.1 Método cualitativo

El método cualitativo se aplicó observando los aspectos claves como es el estado de la luminaria, que tan bien se iluminan ciertos lugares. Luego se analizan para identificar las necesidades y estos resultados permiten fundamentar propuestas de mejora como es el diseño de un alumbrado público en base a IoT.

3.4.2 Método cuantitativo

La presente investigación tiene un enfoque cuantitativo, ya que se basa en la recopilación, análisis e interpretación de datos numéricos obtenidos del funcionamiento del prototipo de red de alumbrado público inteligente. Este método permite una evaluación objetiva del comportamiento del sistema mediante la medición de variables como voltaje, corriente, potencia consumida, intensidad lumínica y respuesta a la detección de movimiento.

3.4.3 Métodos computacionales y simulaciones

Los métodos computacionales y simulaciones permiten modelar y predecir el comportamiento del sistema mediante herramientas digitales como es el software de DiaLux. En el diseño del alumbrado público se emplea la simulación de los parámetros que deben tener las luminarias para optimizar diseños antes de la implementación física y reducción de costo. Este enfoque asegura un sistema funcional, adaptado al entorno y alineado a los objetivos del proyecto.

3.5 Diseño de la investigación Materiales, equipos y software

Los materiales de campo, equipos y software que se emplearán en el desarrollo de la investigación están descritos en la TABLA II.

TABLA II
MATERIALES, EQUIPOS Y SOFTWARE A EMPLEAR EN LA INVESTIGACIÓN.

Materiales de campo	Equipos	Software
Luxómetro	1 Rasberry pi 3	Dialux Evo
Flexómetro	23 sensores de Corriente - SCT013.	KiCad
Multímetro	23 sensores de Voltaje AC ZMPT101B.	Rasberry pi OS



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
 Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
CARRERA DE ELECTRICIDAD



	46 sensores PIR	Arduino IDE
	46 luminarias de 150 W	Ubidots
	23 Arduino Nano	ArGIS
	23 Arduino Pro Micro	
	24 módulos SX1278	
	24 antenas Lora de 915 MHz	
	23 Dimmer	
	24 Fuentes de 5 VDC y 3 A.	
	23 postes de Hormigón armado Circular de 12m carga de rotura 500kg	
	24 cajas metálicas	

3.6 Técnicas y herramientas de investigación

Las técnicas de investigación permiten obtener y analizar información importante para la investigación entre las principales esta la observación directa en la cual teniendo en cuenta la delimitación y alcance de la presente propuesta, fue necesario realizar una visita de campo a la zona con un luxómetro para facilitar la obtención de datos como la cobertura lumínica respecto a los lúmenes que se tienen en la zona y estado de las luminarias de vapor de sodio; también la recolección de las regulación que debe tener un AP, investigaciones previas y tecnologías aplicables, de igual forma es muy importante realizar pruebas piloto para validar el diseño en condiciones reales.

Las herramientas de investigación van de la mano con las técnicas de investigación para poder obtener buenos resultados de la investigación, por este motivo el uso de software especializados como programas de simulación, facilita el modelado del sistema de iluminación, plataformas en donde se obtendrán los datos permiten al usuario observar si el sistema de AP se encuentra en buenas condiciones y que se pueda observar cuanto está consumiendo en el día.

3.7 Flujograma

El flujograma presentado en la Fig 13 describió el proceso seguido para el diseño de la red de alumbrado público basada en tecnología IoT, organizando de manera secuencial cada



etapa del proyecto. Inicialmente se definieron los parámetros del diseño, considerando condiciones del sector, niveles de iluminación requeridos, características eléctricas de la red y criterios normativos. Posteriormente se realizaron los cálculos fotométricos necesarios para determinar la cantidad de luminarias, su potencia y su distribución en la vía. Con base en estos resultados, se llevó a cabo la simulación del sistema mediante herramientas especializadas, lo que permitió verificar la uniformidad y el desempeño lumínico antes de su implementación física.

Una vez validada la simulación, se procedió a la selección de materiales, incluyendo luminarias LED, dispositivos de protección, sensores y módulos de comunicación. Después se realizó el montaje del sistema IoT en el prototipo, integrando los microcontroladores, sensores eléctricos y el sistema de regulación de potencia. Finalmente, se efectuaron pruebas de funcionamiento para comprobar el control de intensidad, la detección de movimiento y la transmisión de datos hacia la plataforma de monitoreo. Este proceso estructurado permitió garantizar un diseño eficiente, seguro y funcional del sistema de alumbrado público inteligente.



Fig 13. Flujograma para el diseño de la red de alumbrado público general con base a tecnología IoT.



3.7.1 Parámetros del diseño

El diseño de alumbrado público en base a tecnología IoT implicó varios parámetros fotométricos como luminancia, relación de alrededores, deslumbramiento y uniformidad de la iluminación, estos parámetros fueron importantes para lograr una iluminación adecuada, mejorando así la visibilidad del área.

3.7.2 Cálculo

Se utilizó softwares especializados para calcular los niveles de luminancia de acuerdo con la Regulación Nro. ARCERNNR-007/23, que se basa en los niveles de luminancia, candelas y que de ahí se escoge la luminaria a utilizar en el diseño de alumbrado público para el sector de La victoria.

3.7.3 Simulación

Se seleccionó un software especializado en simulación de iluminación como DIALux, que permitió modelar y evaluar la distribución de luz, la intensidad luminosa, la uniformidad y el deslumbramiento, se ajustó los parámetros de las luminarias y sus ubicaciones para cumplir con la regulación del SAPG.

3.7.4 Selección de materiales

Se seleccionó el microcontrolador Raspberry pi 3, para que los datos recolectados del sistema de alumbrado público se pudieran almacenar y de la misma forma los sensores de voltaje y corriente se escogieron para medir en C, los demás sensores como de movimiento y LDR pueden conectarse en el microcontrolador de manera segura debido a que son dispositivos de CD. Las luminarias leds se escogieron de acuerdo con los parámetros de las simulaciones y de los cálculos.

3.7.5 Montar el sistema IoT en el prototipo del alumbrado público.

Este proceso implicó la integración de todos los componentes electrónicos y sensores en el prototipo para asegurar su correcto funcionamiento y conectividad. Se configuraron los dispositivos IoT para comunicarse entre sí y con el servidor central, permitiendo el control remoto y el monitoreo en tiempo real del sistema de alumbrado.



3.7.6 Pruebas de funcionamiento

Se realizaron pruebas de funcionamiento del prototipo de AP de la cual se le verificó la conexión de los dispositivos y la luminaria, verificando los datos recolectados por los sensores de voltaje y corriente que fueron transmitidos al servidor principal en donde se observó en tiempo real los datos recolectados y a su vez se verificó con un multímetro estos valores.

3.8 Procedimiento

Se realizó la visita de campo como se puede observar en la Fig 14 y Fig 15, para tomar mediciones del sitio delimitado en la cual el ancho de las vías de doble carril es de 7 metros cada una, el ancho de las dos aceras es de 4 metros, el ancho de la ciclovía es de 2 metros cada una, el ancho de la mediada es de 6 metros de ancho en donde se ubican arboles grandes y de igual forma se midió el radio del redondel de la Católica de la cual se obtuvo un resultado de 17 m, esta información nos sirvió para realizar el diseño y poder simular la iluminación en DiaLux.



Fig 14. Visita de campo en la Av. Padre Aurelio Espinosa Polit.



Fig 15. Medición del radio del redondel de la Católica.

También se realizó un conteo de las luminarias que se encontraban en la zona delimitada y estas fueron un total de 34 luminarias de 220 W, cada poste está espaciado con medidas que van en un intervalo de 25 metros a 46 metros de distancia cada uno, como se evidencia en la Fig 16 y los postes tienen una altura variada de 9, 11 y 12 metros de acuerdo con las especificaciones



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
 Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
CARRERA DE ELECTRICIDAD



que tenían marcado los postes, en Fig 17 se tiene la “Homologación de las unidades de propiedad (UP)” del poste, de igual forma se visualizó por el programa de ArcGIS las especificaciones de los postes con relación a la altura.



Fig 16. Medición de la distancia de los postes.

Fig 17. Código de especificaciones de los postes.

En la Tabla III se tiene las especificaciones de los postes ubicados en el sitio de la presente investigación.

TABLA III
ESPECIFICACIONES DE LOS POSTES UBICADOS EN LA ZONA

Postes		
ID.UP-UCa	Especificaciones	Cantidad
PHC9_350	Poste Hormigón armado Circular de 9m carga de rotura 350kg	9
PHC11_350	Poste Hormigón armado Circular de 11m carga de rotura 350kg	24
PHC12_500	Poste Hormigón armado Circular de 12m carga de rotura 500kg	1
Total de postes		34

A continuación, en la Fig 18 se tiene la ubicación de los postes con sus luminarias y con la ID.UP-UCa de la cual es la especificación del poste.

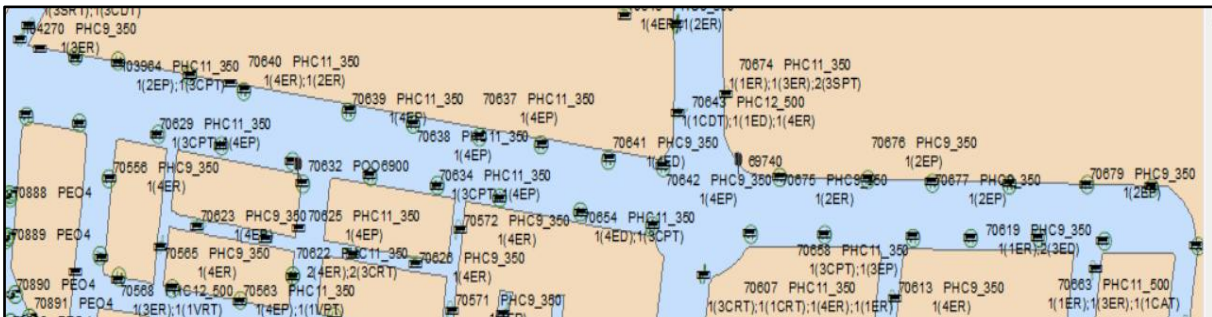


Fig 18. Ubicación de los postes en la Avenida Padre Aurelio Espinosa Polit, el programa de ArcGIS



Luego de haber obtenido esta información se procedió a modelar la avenida en Dialux para visualizar si está cumpliendo con los parámetros de la Regulación Nro. ARCERNNR-007/23, a continuación, la Fig 19 se observa el diseño actual.

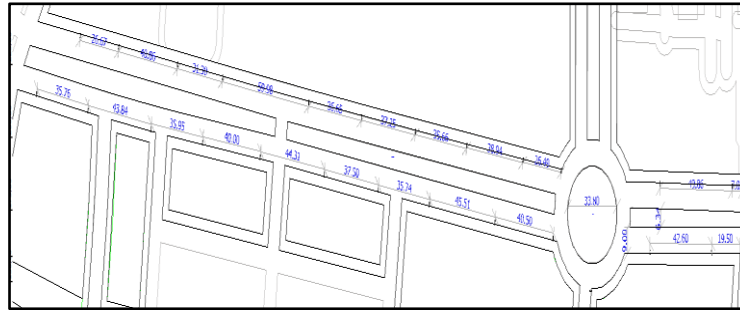


Fig 19. Diseño actual del alumbrado público en 2D.

De acuerdo con la Regulación Nro. ARCERNNR 007/23, emitida por la Agencia de Regulación y Control de Energía y Recursos Naturales No Renovables (ARCERNNR), se determinarán los parámetros fotométricos para la Av. Padre Aurelio Espinosa Polit abarcando así la avenida más concurrida por la Pontificia Universidad Católica del Ecuador sede Ibarra

3.8.1 Parámetros Fotométricos

Los parámetros fotométricos son los que se tomaron en cuenta para poder realizar la simulación en el Software de Dialux, de la cual es un programa que permitió simular los parámetros que son necesarios con forme a las regulaciones del Ecuador.

3.8.2 Luminancia promedio de la calzada (L_{av})

Es el valor mínimo que debe ser mantenido a lo largo de la vida de la instalación, esto depende de la distribución de la luminaria, del flujo luminoso, entre otros.

3.8.3 Uniformidad general de luminancia de la calzada (U_o)

Es la relación entre la luminancia mínima y la luminancia promedio de la vía. Su valor depende de los factores que inciden en la luminancia promedio.

3.8.4 Uniformidad longitudinal sobre la calzada (U_L)

Es la relación entre la luminancia mínima y la luminancia máxima, medidas o calculadas en dirección longitudinal a lo largo del eje central de cada carril. Las distancias y número de



puntos deberán ser iguales a los utilizados para el cálculo de la luminancia promedio de la calzada.

3.8.5 Incremento de umbral (TI)

El incremento de umbral (TI) fue considerado como un parámetro normativo relevante para el diseño del sistema de alumbrado público, conforme a las clases de iluminación establecidas para zonas de conflicto.

En la presente investigación, el valor de TL no fue medido experimentalmente; sin embargo, su cumplimiento fue verificado mediante simulación fotométrica en el software DIALux, el cual evalúa automáticamente el deslumbramiento producido por las luminarias en función de la distribución luminosa, geometría de la vía y condiciones de observación.

3.8.6 Cálculo de clases de alumbrado y parámetros fotométricos por vías

El cálculo de clases de alumbrado por vías define el nivel de iluminación requerido según el tipo de vía, la velocidad, el tráfico y la presencia de peatones, con esa clasificación se establecen los parámetros fotométricos de diseño (iluminancia o luminancia, uniformidad, y control del deslumbramiento), que sirven para seleccionar la luminaria y la potencia, además de determinar altura de montaje y separación, verificando finalmente mediante cálculos que cada tramo cumpla con la regulación.

3.8.6.1 Vías para tráfico motorizado.

Para obtener los parámetros fotométricos primero se determinó la clase de alumbrado para vías de tráfico motorizado de la cual se caracterizan de M1 a M6, de acuerdo con las especificaciones. Esta clasificación se determina conforme a la ecuación 1:

$$M = \left(6 - \sum V_{pM} \right) \tag{1}$$

Donde:

M Clase de iluminación, va de M1 a M6.

$\sum V_{pM}$ Sumatoria de los valores de ponderación (V_{pM}) seleccionados como se indica en la TABLA A.I.

La sumatoria de la TABLA A.I que se encuentra en los Anexo A se tiene la sumatoria



de las ponderaciones de la cual dio un valor de 2.5 pero en la regulación de ARCERNNR 007/23 está escrito que debe ser un valor entre 1 y 6. En caso de que la sumatoria no sea un valor entero se debe aproximar al número menor de la sumatoria por este motivo $\sum V_{pM}=2$.

$$M = (6 - 2) = 4$$

Este procedimiento asegura que los niveles de la iluminación cumplan con la regulación ARCERNNR 007/23. Se llenó la tabla correspondiente para obtener la sumatoria de los valores de ponderación, de la cual se determinó la clase de iluminación de tipo M4. Los parámetros fotométricos para vías con tráfico motorizado M1 a M6, se encuentran en la siguiente TABLA IV:

TABLA IV
PARAMETROS FOTOMÉTRICOS PARA VÍAS CON TRAFICO MOTORIZADO

Campo de aplicación						
Clase de iluminación	Todas las vías			<i>TI</i> % máxima inicial	Vía sin o con pocas intersecciones	vías con aceras muy iluminadas para clases P1 a P4
	Luminancia promedio [<i>cd/m²</i>] mantenido		Factor de uniformidad <i>U_o</i> mínimo		Factor de uniformidad longitudinal de luminancia <i>U_L</i> mínima	Relación de alrededores (SR) mínima ²
	Máxima	Mínima				
M1	2.4	2.0	0.40	10	0.70	0.5
M2	1.8	1.5	0.40	10	0.70	0.5
M3	1.2	1.0	0.40	15	0.60	0.5
M4	1.0	0.75	0.40	15	0.60	0.5
M5	0.75	0.5	0.35	15	0.40	0.5
M6	0.5	0.30	0.35	20	0.40	0.5

3.8.6.2 Vías para tráfico peatonal

Las clases de alumbrado para vías de tráfico peatonal son para garantizar una adecuada visibilidad para los peatones en aceras u otras áreas, así como ciclistas, carriles de estacionamiento y otras zonas de una vía, por este motivo es importante obtener la clase de



alumbrado para vías de tráfico peatonal para cumplir de manera adecuada con la norma establecida. Las vías para tráfico peatonal se clasifican de P1 a P6 en función de sus especificaciones. La clase de iluminación se define en la ecuación 2:

$$P = \left(6 - \sum V_{pP} \right) \tag{2}$$

Donde:

P Clase de iluminación, va de P1 a P2.

$\sum V_{pP}$ Sumatoria de los valores de ponderación (V_{pP}) Seleccionados como se indica en la TABLA A.II.

De acuerdo con la TABLA A.II que se encuentra en el Anexo A la sumatoria de los valores ponderados es de 4.5 pero al no ser un valor entero este se aproximara al menor valor que es 4 para realizar la ecuación y tener el tipo de clase de alumbrado para vías de tráfico peatonal.

$$P = (6 - 4) = 2$$

Después de obtener el valor de las ponderaciones, reemplazamos en la ecuación y se determinó que la clase de alumbrado para vías con tráfico peatonal es tipo P2, en la TABLA V siguiente se puede observar los parámetros fotométricos necesarios:

TABLA V

PARAMETROS FOTOMÉTRICOS PARA VÍAS CON TRAFICO PEATONAL

Clase de iluminación	Iluminación(lx)			Requisitos adicionales	
	Valor promedio horizontal máximo (*)	Valor promedio horizontal mínimo (*)	Valor horizontal mínimo (*)	Valor vertical	Valor semicilíndrico
P1	18	15	3	5.0	3.0
P2	12	10	2	3.0	2.0
P3	0.9	7.5	1.5	2.5	1.5
P4	7.5	0.5	1.0	1.5	1.0
P5	5.0	3.0	0.6	1.0	0.6



P6	3.0	2.0	0.4	0.6	0.4
----	-----	-----	-----	-----	-----

Nota: (*) Medidas a nivel del suelo.

3.8.6.3 Vías en zonas de conflicto

Son zonas en la cual existe un mayor potencial de colisión entre vehículos, y/o entre peatones, ciclistas u otros que transitan por la zona, esto se produce porque el flujo vehicular se enlaza con lugares frecuentados por los peatones, ciclistas u otros usuarios de esa área; rotondas; así como la reducción del número de carriles o el ancho.

El alumbrado tipo C tiene seis categorías las cuales son C0 a C5, este se puede determinar con la clase de alumbrado tipo M con la Tabla IV y en función con el coeficiente de luminancia medio de la superficie del área de conflicto según la TABLA VII.

TABLA VI

VALORES DEL COEFICIENTE DE LUMINANCIA MEDIA DE LA SUPERFICIE DE ACUERDO CON LAS CLASES DE ALUMBRADO TIPO M Y TIPO C.

Coeficiente de luminancia medio (Q_0)	M1	M2	M3	M4	M5	M6
Clase de alumbrado C si $Q_0 \leq 0.05$	C0	C1	C2	C3	C4	C5
clase de alumbrado C si $0.05 < Q_0 \leq 0.08$	C0	C1	C2	C3	C4	C5
Clase de alumbrado C si $Q_0 > 0.08$	C0	C1	C2	C3	C4	C5

En la TABLA VII se visualizó las características de la superficie de la calle que de acuerdo a esto se obtuvo el coeficiente de luminancia medio.

TABLA VII

CARACTERÍSTICAS DE LAS SUPERFICIE Y COEFICIENTES DE LUMINANCIA MEDIO

Clase	Q_0	características de la superficie	Tipo
R1	0.10	-Superficies de asfalto con un mínimo del 15 % de materiales reflectivos o materiales artificiales claros o al menos un 30 % de anortositas3 muy brillantes; -Superficies que contienen gravas que cubren más del 80% de la superficie de la calzada, y las gravas constan de gran cantidad de material claro, o reflectivos o están compuestas al 100% de anortositas muy brillantes; -Superficies de calzada de hormigón de concreto.	Difusa o casi difusa
R2	0.07	-Superficies con textura rugosa que contienen agregados normales;	Difusa especular o ligeramente difusa (mixta)



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
 Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
CARRERA DE ELECTRICIDAD



		-Superficies asfálticas (pavimentos bituminosos que contienen el 10% al 15% de abrilladores artificiales); -Hormigón bituminoso grueso y rugoso, rico en gravas (más del 60%) de tamaños mayores a 10 mm; -Asfalto mástico después de ser tratado. Se conoce también como asfalto mástico ⁴ en estado nuevo.	
R3	0.07	-Revestimiento en Hormigón (asfalto frío, asfalto cemento) con tamaño de grava superior a 10 mm, con textura rugosa; -Superficies tratadas con textura rugosa pero pulimentada	Ligeramente especular o brillante
R4	0.08	-Asfalto mástico después de varios meses de uso; - Superficies con textura bastante suave o pulimentada.	Brillante muy especular

También se puede obtener de manera manual con las ponderaciones, en función de las especificaciones y se determina con la ecuación 3 que está a continuación:

$$C = \left(6 - \sum V_{pc} \right) \tag{3}$$

Donde:

C Clase de iluminación, va de C0 a C5

$\sum V_{pc}$ Sumatoria de los valores de ponderación (V_{pc}) seleccionados como se indica en la TABLA A.III.

En el llenado de esta tabla se obtuvo la clase del alumbrado tipo C4, obteniendo los parámetros necesarios, de la cual se encuentran en la TABLA VIII:

TABLA VIII
PARAMETROS FOTOMETRICOS PARA ZONAS DE CONFLICTO

Clases de iluminación	Iluminación horizontal promedio $E(lx)^5$		Uniformidad global de iluminancia mínima U_o	Incremento de umbral($\%$) ⁶	
	Máxima	Mínima		Moderada y alta velocidad	Baja y muy baja velocidad
C0	60	50	0.40	10	15
C1	36	30		10	15
C2	24	20		10	15
C3	20	15		15	20
C4	15	10		15	20
C5	10	7.5		15	25



3.8.6.4 Parámetros fotométricos definidos

Con base en la Regulación ARCERNNR-007/23 y la caracterización del tramo de estudio, se definieron los parámetros técnicos de diseño y verificación del alumbrado. En el componente fotométrico se establecieron las clases M4 (calzada), P2 (aceras/ciclovía) y C4 (zona de conflicto), verificando mediante DIALux los indicadores de luminancia/iluminancia, uniformidades y control del deslumbramiento (TI/Tl), así como la relación de alrededores, según corresponda.

3.9 Diseño del alumbrado público actual

Una vez que se obtuvieron los parámetros necesarios según la regulación, se procedió a realizar la simulación sobre el sistema de alumbrado que se encuentra actualmente, este proceso permitió observar varias deficiencias al ser evaluado bajo la regulación técnica vigente.

En la Fig 20, a) la medición se realizó en la zona ubicada detrás del poste, donde normalmente se presenta menor iluminación. Por otro lado, en la b) la medición se efectuó al final del área iluminada por la luminaria, donde se espera una mayor cobertura lumínica. Además, los valores de iluminancia medidos en campo no cumplieron con los niveles mínimos exigidos por la regulación en los puntos evaluados, lo que confirma la inadecuada distribución lumínica del sistema actual y la necesidad de una intervención técnica para mejorar su desempeño.

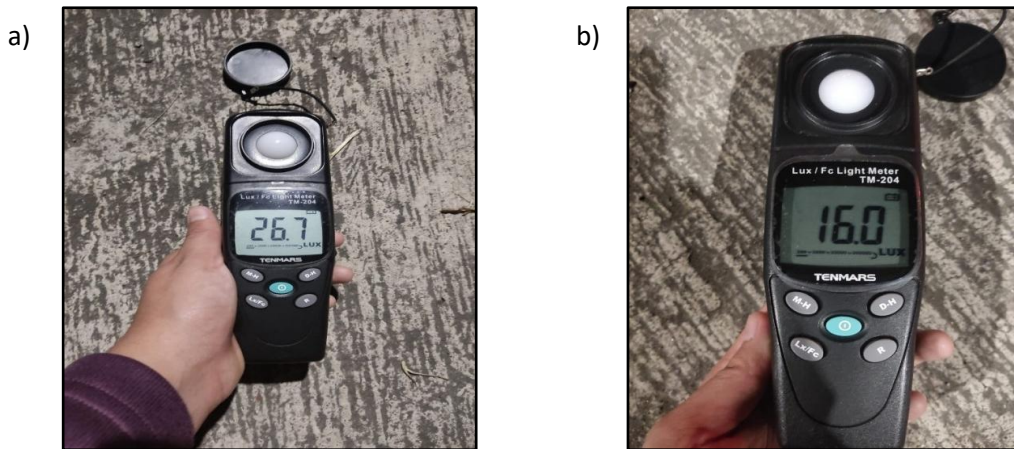


Fig 20. Medición de niveles de iluminancia utilizando el luxómetro TENMARS TM-204 en condiciones nocturnas: a) 26.7 lux y b) 16.0 lux



De acuerdo al levantamiento de dimensiones de la vía se realizó la simulación en Dialux colocando una distancia promedio de 34 metros debido a que la posición de los postes no tiene una única medida y de acuerdo a esta representación que se encuentra en la Fig 21 se hizo la evaluación de sus parámetros.

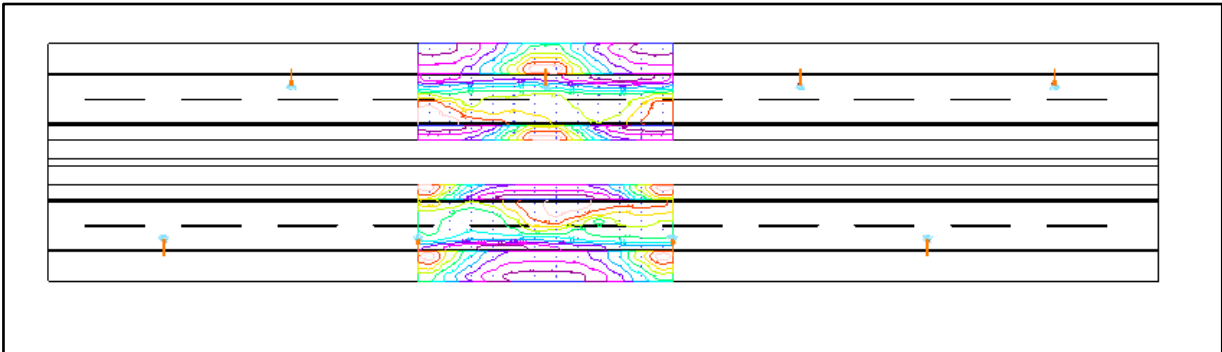


Fig 21. Estructura de la avenida en simulación del alumbrado público.

En la Fig 22 se tiene la evaluación de los parámetros de las calzadas, vías peatonales y ciclovia en donde se observa que no se está cumpliendo con los parámetros establecidos en el criterio de la ciclovia su iluminancia es de 28,74 y su máximo es de 15 lx.

Recuadro de evaluación (M4) ▾ Calzada 1 (M4)		Recuadro de evaluación (P2) ▾ Camino peatonal 1 (P2)	
L_m	[cd/m ²] ✓ ≥ 0.75 1.15 ✓	E_m	[lx] ✓ ≥ 10.00 ≤ 15.00 12.07 ✓
U_0	✓ ≥ 0.40 0.63 ✓	E_{min}	[lx] ✓ ≥ 2.00 7.66 ✓
U_1	✓ ≥ 0.60 0.80 ✓	Recuadro de evaluación (P2) ▾ Camino para bicicletas 1 (P2)	
TI	[%] ✓ ≤ 15 8 ✓	E_m	[lx] ✓ ≥ 10.00 ≤ 15.00 28.74 ✗
R_{et}	≥ 0.30 0.74	E_{min}	[lx] ✓ ≥ 2.00 24.92 ✓
Recuadro de evaluación (M4) ▾ Calzada 2 (M4)		Recuadro de evaluación (P2) ▾ Camino para bicicletas 2 (P2)	
L_m	[cd/m ²] ✓ ≥ 0.75 1.15 ✓	E_m	[lx] ✓ ≥ 10.00 ≤ 15.00 28.74 ✗
U_0	✓ ≥ 0.40 0.65 ✓	E_{min}	[lx] ✓ ≥ 2.00 24.92 ✓
U_1	✓ ≥ 0.60 0.80 ✓	Recuadro de evaluación (P2) ▾ Camino peatonal 2 (P2)	
TI	[%] ✓ ≤ 15 8 ✓	E_m	[lx] ✓ ≥ 10.00 ≤ 15.00 12.07 ✓
R_{et}	≥ 0.30 0.74	E_{min}	[lx] ✓ ≥ 2.00 7.66 ✓

Fig 22. Parámetros que debe cumplir de la calzada 1 y 2 al igual que la acera peatonal y de la ciclovia.

De igual forma se simuló en planificación de exterior por el redondel y se observó que en la parte de la ciclovia que es de tipo P2, se debe tener entre 10 y 12 de iluminancia, en la Fig 23, en la parte inferior derecha se puede observar que sobrepasa el valor máximo de iluminancia con un valor de 15lx, así que como se comprobó en la simulación de alumbrado público estaría incumpliendo con la regulación del alumbrado público.

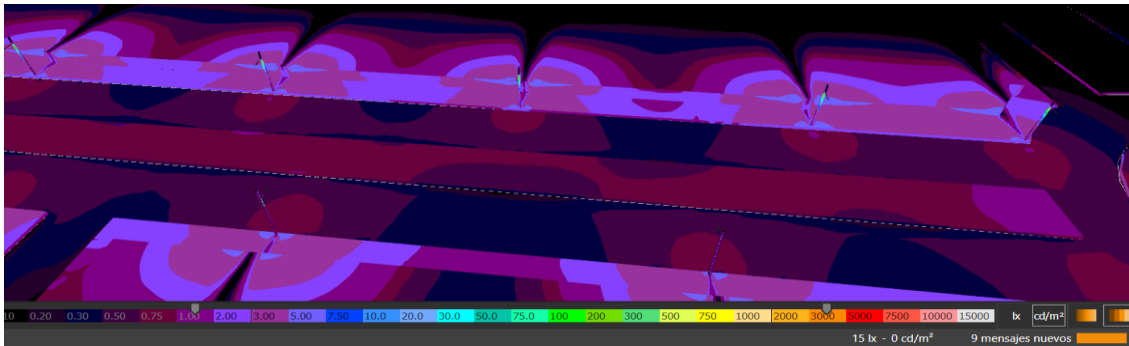


Fig 23. Demostración de la simulación del diseño actual.

En la Fig 24 en la simulación también se dieron a notar partes sin una buena iluminación, determinando que de la forma en que están situadas las luminarias no garantiza una iluminación uniforme, obteniendo así sectores con niveles inferiores de iluminación con respecto a los niveles mínimos establecidos en la regulación. Esto afecta la visibilidad de los peatones y de los conductores, en este caso de igual forma el redondel no cumple con los parámetros establecidos para la regulación española en donde debe tener una iluminancia de 30 lx.

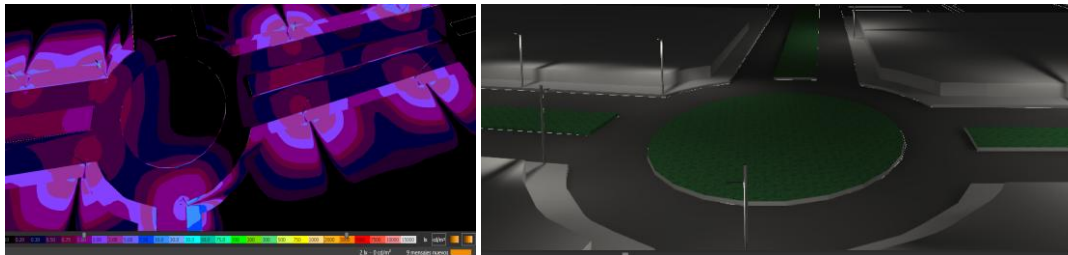


Fig 24. Niveles bajos de iluminancia.

3.10 Propuesta de diseño del alumbrado público del sector de La Victoria.

En cuanto a la delimitación del sector de La Victoria, se elaboró un nuevo diseño incorporando las medidas reales de la calzada, aceras, ciclovía y demás elementos característicos del entorno urbano. Para ello, se realizó el levantamiento de dimensiones y se definieron los anchos de cada franja vial, así como la ubicación de bordillos, parterres y zonas de circulación peatonal. Estos datos fueron ingresados en el software DIALux, con el fin de aproximar el comportamiento real de la luz en el sitio. Una vez añadidos todos los componentes de la avenida, el programa genera una vista previa en 2D que representa un tramo de calle con una longitud máxima de 30 metros. En la Fig. 25 se presenta una visualización detallada del



diseño generado. Finalmente, este modelo sirve como base para el cálculo fotométrico y la evaluación de niveles de iluminancia/uniformidad conforme a los criterios de la vía.

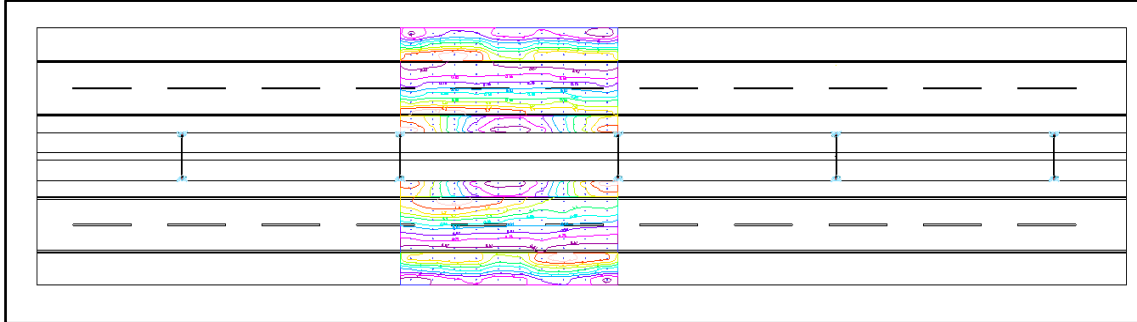


Fig 25. Introducción de la vía pública de acuerdo con las mediciones tomadas de la calzada, acera, mediana y de la ciclo vía.

A continuación, se representa en la Fig 26 la representación en 3D de la vía pública con la selección de luminaria de 150 W, con un flujo luminoso de 18000 lm de acuerdo con el Anexo O, a una distancia de 32 metros ya que así cumple con la regulación vigente.

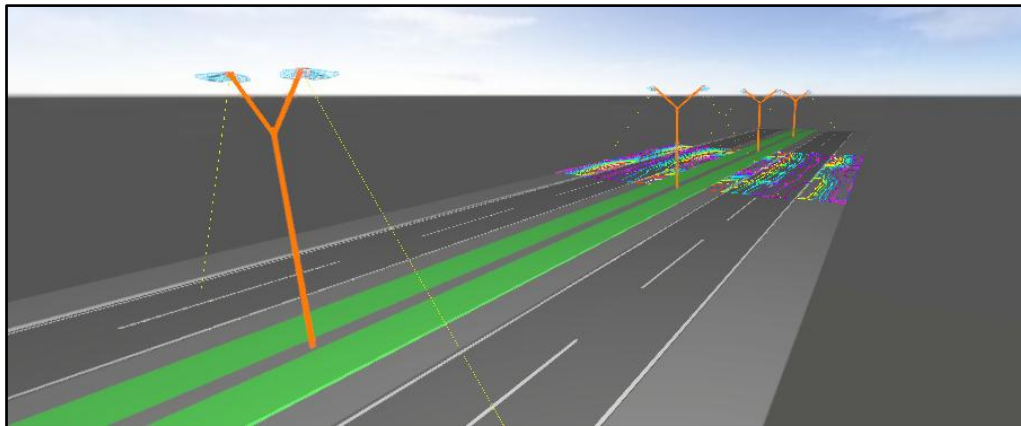


Fig 26. Representación en 3D de la vía pública.

Este proceso permitió observar el comportamiento del sistema bajo las condiciones previamente establecidas, validando así el diseño propuesto y realizando ajustes si fueran necesarios para optimizar el rendimiento del alumbrado público. En la Fig 27 y 28 se presentan los parámetros delimitados por el propio software, el cual se encarga de evaluar los parámetros de calzada, acera y ciclo vía. Estos resultados son comparados con la regulación vigente del



Ecuador, lo que permite determinar si el diseño cumple con los parámetros establecidos y que se lo pueda llevar a su implementación.

Recuadro de evaluación (M4)		Calzada 1 (M4)	
L_m	[cd/m ²]	✓ ≥ 0.75	0.83 ✓
U_o		✓ ≥ 0.40	0.62 ✓
U_l		✓ ≥ 0.60	0.75 ✓
TI	[%]	✓ ≤ 15	11 ✓
R_{Et}		≥ 0.30	0.81
Recuadro de evaluación (M4)		Calzada 2 (M4)	
L_m	[cd/m ²]	✓ ≥ 0.75	0.85 ✓
U_o		✓ ≥ 0.40	0.61 ✓
U_l		✓ ≥ 0.60	0.85 ✓
TI	[%]	✓ ≤ 15	13 ✓
R_{Et}		≥ 0.30	0.81

Fig 27. Parámetros a cumplir de la calzada 1 y 2 de tipo M4.

Recuadro de evaluación (P2)		Camino peatonal 1 (P2)		
E_m	[lx]	✓ ≥ 10.00	≤ 15.00	10.01 ✓
E_{min}	[lx]	✓ ≥ 2.00		8.68 ✓
Recuadro de evaluación (P2)		Camino para bicicletas 1 (P2)		
E_m	[lx]	✓ ≥ 10.00	≤ 15.00	14.90 ✓
E_{min}	[lx]	✓ ≥ 2.00		9.35 ✓
Recuadro de evaluación (P2)		Camino para bicicletas 2 (P2)		
E_m	[lx]	✓ ≥ 10.00	≤ 15.00	14.90 ✓
E_{min}	[lx]	✓ ≥ 2.00		9.35 ✓
Recuadro de evaluación (P2)		Camino peatonal 2 (P2)		
E_m	[lx]	✓ ≥ 10.00	≤ 15.00	10.01 ✓
E_{min}	[lx]	✓ ≥ 2.00		8.68 ✓

Fig 28. Parámetros a cumplir de la acera peatonal y de la ciclovia.

En la Fig 29 se puede visualizar la interfaz del software DIALux, de la cual este permite la planificación y simulación del rendimiento del sistema de iluminación de manera detallada y ajustada a la regulación, se puede ver la representación tridimensional de la avenida, se estableció la disposición central para reducir el número de postes en la cual con el nuevo diseño se tiene un total de 23 postes.

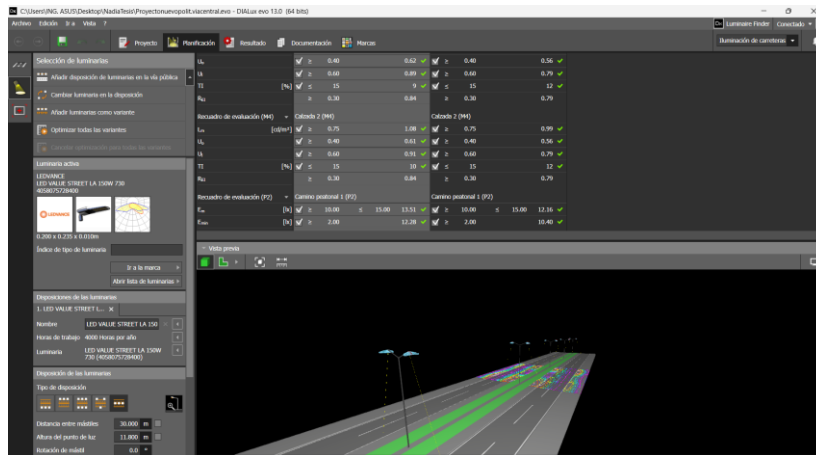


Fig 29. Simulación en el software de Dialux con una luminaria de 150 W.

En la Tabla IX se presentan los resultados de la simulación luminotécnica obtenidos en DIALux para los campos de evaluación definidos (calzada, caminos peatonales y ciclovías). Los



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
 Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
CARRERA DE ELECTRICIDAD



valores calculados (E_m , E_{min} , L_m , U_o , U_l y TI) se compararon con los criterios nominales establecidos para las clases P2 y M4, con el fin de verificar el cumplimiento del diseño propuesto.

TABLA IX
INDICADORES FOTOMÉTRICOS DEL DISEÑO PROPUESTO OBTENIDOS EN DIALUX
(CALZADA, ACERA Y CICLOVÍA)

Área evaluada	Clase	Indicador	Calculado	Criterio	Cumple
Camino peatonal	P2	E_m (lx)	10,01	10,00–15,00	✓
Camino peatonal	P2	E_{min} (lx)	8,68	$\geq 2,00$	✓
Ciclovía	P2	E_m (lx)	14,90	10,00–15,00	✓
Ciclovía	P2	E_{min} (lx)	9,35	$\geq 2,00$	✓
Calzada	M4	L_m (cd/m^2)	0,83-0,85	$\geq 0,75$	✓
Calzada	M4	U_o	0,61-0,62	$\geq 0,40$	✓
Calzada	M4	U_l	0,75-0,85	$\geq 0,60$	✓
Calzada	M4	TI (%)	11-13	≤ 15	✓

De acuerdo con los resultados obtenidos en DIALux, el diseño propuesto cumplió los criterios fotométricos establecidos para las áreas evaluadas. En los campos P2 (camino peatonal y ciclovía) se alcanzaron valores de $E_m = 10,01-14,90$ lx y $E_{min} = 8,68-9,35$ lx, dentro de los rangos nominales y con mínimos superiores al requisito. Para la calzada M4, los indicadores $L_m = 0,83-0,85$ cd/m^2 , $U_o = 0,61-0,62$, $U_l = 0,75-0,85$ y $TI = 11-13\%$ se mantuvieron dentro de los límites exigidos. En consecuencia, la simulación validó el cumplimiento del diseño antes de su implementación, permitiendo sustentar técnicamente la propuesta de alumbrado para el tramo analizado.

En la Fig 30 se tiene el modelo diseñado del redondel con una regulación española en la cual tiene parámetros a cumplir para un redondel de la cual pertenece a la clase CE 1 su luminancia mínima es de 30 Lx.

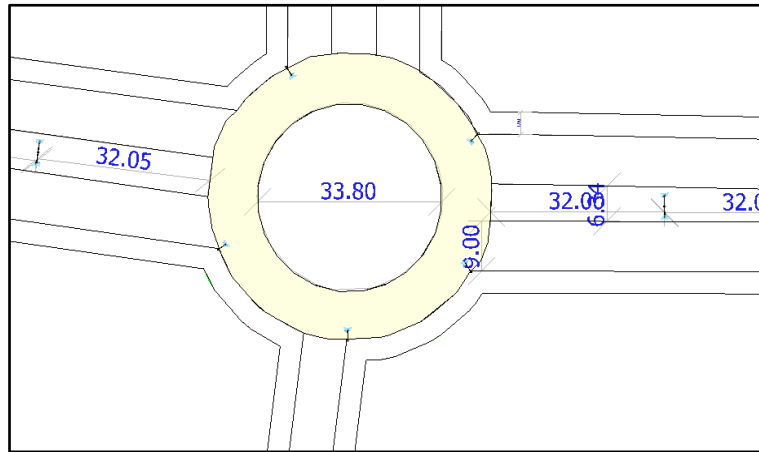


Fig 30. Modelado del redondel de la Católica.

Se ubicaron las luminarias en la periferia del redondel, Fig 31, para así tener un confort visual del redondel de la cual si las luminarias estuvieran situadas en el centro podría producirse deslumbramiento para los conductores y ciclistas.

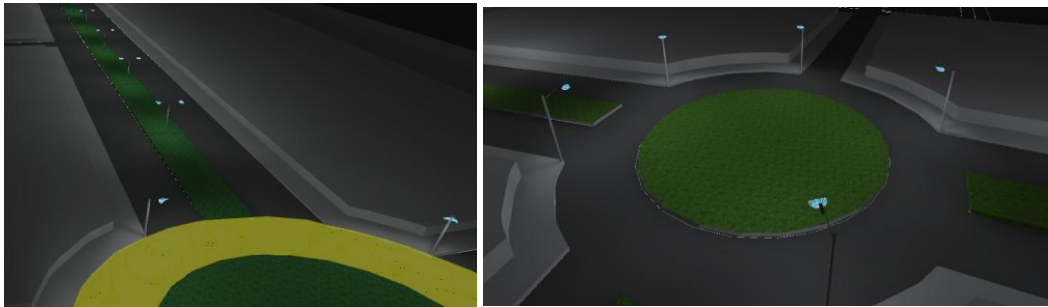


Fig 31. Simulación de iluminación de la Avenida del sector de La Victoria.

Debido a que un redondel no se puede simular junto con la sección de alumbrado público se simuló en la sección de espacios exteriores con las luminarias ubicadas en la periferia y calculando la superficie de la carretera por medio del programa como se observa en Fig 32, para que cumpliera con la regulación.

Cálculo de iluminación			
Terreno			
Superficie de cálculo 1			
		30.0 lx	0.25
		30.0 lx	0.25

Fig 32. Cálculo de la superficie de la carretera del redondel.



En la Fig 33 se representa los niveles de iluminancia para observar la distribución y uniformidad de la iluminación respecto al diseño del AP. En este mapa generado por el software, los colores representan distintos tipos de iluminancia en la zona, este mapa es importante para verificar si el diseño está cumpliendo con los estándares de uniformidad y niveles mínimos requeridos para que la luminaria sea adecuada a la regulación.

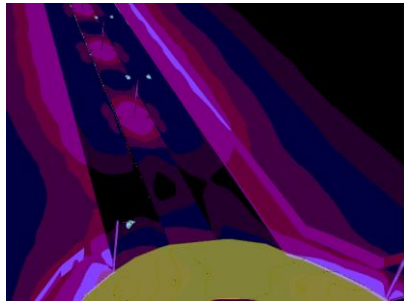


Fig 33. Simulación de la Avenida con falso color.

La simulación luminotécnica de la avenida se desarrolló mediante la opción “Iluminación de carreteras”, cuyo informe se presenta en el Anexo B. Adicionalmente, se realizó una simulación específica de la vía empleando la opción “Planificación de exteriores y edificio”, cuyo informe completo se presenta en el Anexo C.

3.11 Diseño del IoT en las luminarias

El diseño propuesto para el sistema de IoT del AP, combina la adquisición de datos, la comunicación inalámbrica de largo alcance y el procesamiento en la nube para monitorear eficientemente la luminaria. Este sistema consta de los siguientes elementos claves: Adquisición de datos, comunicación Lora, procesamiento y almacenamiento de datos en Raspberry Pi.

3.11.1 Adquisición de datos

La adquisición de datos es el proceso mediante el cual se capturan y registran parámetros físicos provenientes del sensor de corriente, de voltaje y dispositivos, con el objetivo de monitorear, analizar y controlar el sistema en tiempo real.

En cada luminaria se realizó el monitoreo de variables eléctricas mediante un sensor de corriente SCT013 y un sensor de voltaje AC ZMPT101B, con el objetivo de registrar el comportamiento de operación del sistema. A partir de estas mediciones se obtuvieron los valores



de voltaje y corriente, y se determinó la potencial eléctrica consumida, información que posteriormente fue transmitida para su visualización en la plataforma Ubidots.

3.11.2 Comunicación LoRa

Es una comunicación inalámbrica diseñada para transmitir datos a largas distancias con bajo consumo energético de la cual lo hace ideal para emplearlo en el sistema de alumbrado público.

3.11.3 Módulo SX1278

El SX1278 es un transceptor LoRa (Long Range), utilizado para enviar y recibir datos a largas distancias con baja potencia. LoRa utiliza una modulación espectral expansiva que le permite tener un alcance de hasta varios kilómetros. En la Fig 34 se observa el módulo.

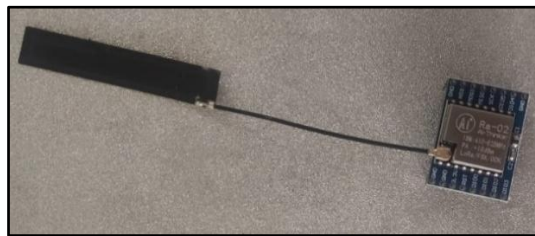


Fig 34. Módulo SX1278

3.11.4 Configuración en Arduino

El Arduino Nano se programa para enviar los datos de la corriente medida a través del módulo SX1278 utilizando la librería LoRa la cual sirve para enviar los datos a un receptor (Raspberry Pi). En la Fig 35 se tiene la conexión del Arduino nano y el LoRa.

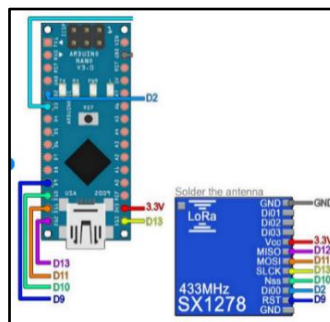


Fig 35. Conexión Arduino nano con modulo LoRa.



3.11.5 Configuración en Raspberry pi

El Raspberry Pi tiene otro módulo SX1278 para recibir los datos del Arduino. El Raspberry Pi puede usar Python para recibir los datos y almacenarlos en una base de datos (como InfluxDB) para su posterior visualización.

3.11.6 Procesamiento y almacenamiento de datos en Raspberry Pi

La Raspberry Pi cumple un rol fundamental como nodo central en el prototipo de alumbrado público inteligente. Su función principal es recibir, procesar y almacenar los datos enviados desde los nodos periféricos, los cuales están compuestos por microcontroladores: Arduino Nano o Pro-Mini, utilizando otro modulo SX1278, encargados de recolectar información como corriente, voltaje, potencia y detección de movimiento y los procesa con Python.

Una vez recibidos los datos a través del sistema LORA, el Raspberry Pi ejecuta rutinas de procesamiento que permiten filtrar, organizar y estructurar la información para su posterior análisis. Este procesamiento puede incluir validaciones, detección de anomalías o tendencias de consumo energético, entre otros.

Los datos procesados son almacenados localmente en la memoria de la Raspberry Pi, generalmente en una base de datos ligera. Este almacenamiento local permite realizar consultas históricas, generar reportes y visualizar el comportamiento del sistema en tiempo real a través de una interfaz gráfica online por medio de ubidots o un panel de monitoreo.

3.12 Diagrama

A continuación, Fig 36, el diagrama del sistema ilustra como se conectan los diferentes componentes del diseño IoT para el alumbrado público: Este diagrama muestra cómo cada parte del sistema trabaja de manera coordinada para controlar y supervisar el alumbrado público. Los sensores instalados en cada luminaria detectan el estado eléctrico y la presencia de personas o vehículos. Toda esta información es procesada por el microcontrolador Arduino Nano y enviada a través de LoRa hacia una Raspberry Pi, que actúa como centro de recepción. Desde allí, los datos se transmiten a la nube mediante el protocolo MQTT, permitiendo su almacenamiento en una base de datos y su visualización en tiempo real mediante plataformas como Ubidots.

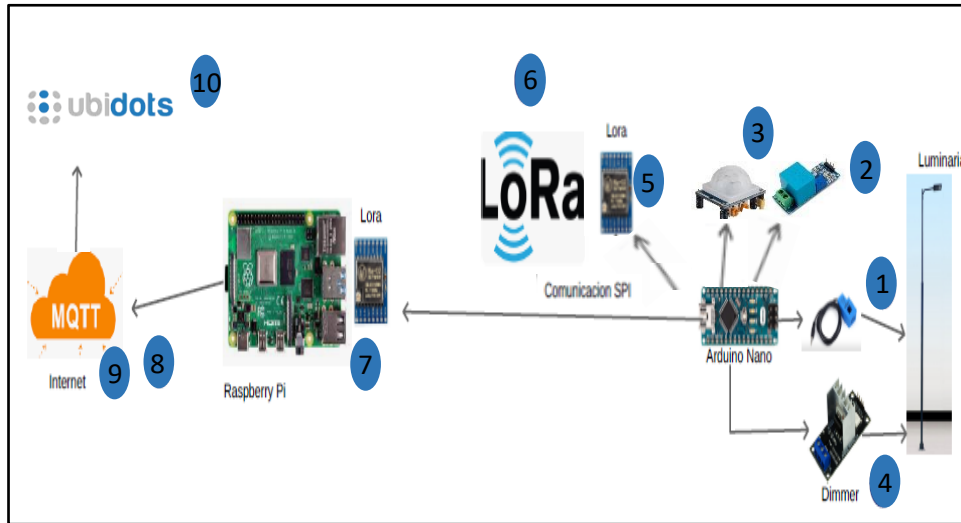


Fig 36. Diagrama del diseño del Iot para el alumbrado público.

A continuación, se detalla cada uno de los puntos del esquema:

1. El sensor de corriente SCT013 toma las medidas de consumo para verificar que la luminaria esta encendida.
2. El sensor de voltaje obtiene el voltaje de la luminaria para después obtener la potencia consumida.
3. El sensor PIR detecta el movimiento de las personas o vehículos a partir de las 00:00.
4. El dimmer se encarga de controlar la potencia lumínica de la luminaria.
5. El Arduino nano recibe los datos de los sensores y las acopla para él envío por medio del módulo LoRa.
6. La comunicación LoRa se establece con el receptor
7. El receptor lora conectado al Raspberry pi se encarga de entregar los datos al Raspberry.
8. El Raspberry tiene integrado una base de datos donde almacenara temporalmente los datos los cuales serán enviados a la nube.



9. El Raspberry se encarga de enviar utilizando el protocolo MQTT al Cloud que se encuentra en internet, para poder acceder de forma remota desde cualquier dispositivo con acceso a internet.
10. Visualización de los datos en Ubidots.

3.13 Estimación del consumo eléctrico de sensores, comunicación y control

Se estimó el consumo mensual de la electrónica del sistema IoT (microcontrolador, LoRa y sensores) para conocer el consumo adicional del prototipo y usarlo luego en la comparación energética. Para convertir la potencia de cada componente en energía mensual, se utilizó la Ecuación 4, donde:

P: es la potencia en watts

t: el tiempo de funcionamiento diario en horas.

$$E_{mes} = \frac{P(W) \times t(h/día) \times 30}{1000} \tag{4}$$

En este trabajo se consideró que la electrónica permaneció encendida 24 horas al día para asegurar monitoreo y comunicación. Los valores estimados se presentan en la Tabla X.

TABLA X - Consumo eléctrico de los componentes del sistema IoT

En el apartado A) Nodo IoT en luminaria, se resume el consumo de los componentes instalados en el poste (microcontrolador, LoRa, sensores y dimmer). En el apartado B) Gateway se detalla el consumo de la Raspberry Pi y del receptor LoRa, y en C) Total del sistema IoT se muestra el consumo adicional total

A) Nodo IoT en luminaria.

Componente	Voltaje (V)	Corriente típica (mA)	Potencia (W)	Horas/día	Energía (kWh/mes)
Arduino Nano (controlador)	5	30	0.150	24	0.1080
LoRa SX1278 (promedio)	3.3	20	0.066	24	0.0475
Sensor PIR	5	0.2	0.001	24	0.0007



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
 Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
CARRERA DE ELECTRICIDAD



Sensor de voltaje ZMPT101B (módulo)	5	5	0.025	24	0.0180
SCT-013 (sensor de corriente, pasivo)	—	—	~0	24	~0
Regulador AMS1117-3.3 (pérdidas aprox.)	—	—	0.020	24	0.0144
Arduino Pro-Micro (controlador)	5	25	0.125	24	0.0900
Dimmer AC (circuito de control)	5	10	0.050	24	0.0360
TOTAL, nodo IoT			0.437		0.3146

B) Gateway

Componente	Voltaje (V)	Corriente típica (mA)	Potencia (W)	Horas/día	Energía (kWh/mes)
Raspberry Pi 3B (promedio)	5.0	—	3.000	24	2.1600
LoRa, receptor (SX1278, promedio)	3.3	20.0	0.066	24	0.0475
TOTAL, gateway			3.066		2.2075

C) Total, del sistema IoT

Concepto	Potencia total (W)	Energía total (kWh/mes)
Nodo + Gateway	3.503	2.522

Con base en la TABLA X, se obtuvo el consumo adicional del sistema IoT, el cual se incorporó posteriormente al balance energético para comparar el escenario con IoT frente al escenario sin IoT.

3.13.1 Periodo de medición y estimación mensual del consumo del sistema IoT.

Para estimar el consumo energético de la luminaria con el sistema IoT, se utilizaron los datos registrados por el prototipo con un intervalo de muestreo de 5 minutos. En primer lugar,



la potencia instantánea P_i medida en watts se convirtió a energía por intervalo en kilowatt-hora mediante la ecuación 5:

$$E_i(kWh) = \frac{P_i(W)}{1000} \times \frac{5}{60} \quad (5)$$

El consumo total del periodo evaluado de 8 noches se calculó como la suma de la energía de todos los registros, según la ecuación 6.

$$E_{8\text{ noches}} = \sum_{i=1}^n E_i \quad (6)$$

Finalmente, debido a que la medición se realizó durante 8 noches, el consumo mensual correspondiente a agosto se estimó por extrapolación mediante la ecuación 7:

$$E_{agosto} = E_{8\text{ noches}} \times \frac{31}{8} \quad (7)$$

Este procedimiento permitió obtener el consumo energético del sistema IoT en el periodo medido y su estimación mensual, manteniendo el mismo patrón de operación registrado durante la campaña de medición.

3.13.2 Criterios de comparación IoT vs sin IoT

Para evaluar el impacto del sistema IoT, se compararon dos escenarios bajo condiciones equivalentes de operación:

3.13.2.1 Sistema sin IoT.

Se consideró una luminaria operando a potencia fija durante el periodo nocturno, sin atenuación ni activación por presencia. El consumo de energía se calculó de acuerdo con la ecuación 8, a partir de la potencia nominal y el tiempo total de funcionamiento:

$$E_{sinIoT} = P_{nom}(kW) \times t(h) \quad (8)$$

3.13.2.2 Sistema con IoT.

Se consideró la luminaria operando con control inteligente mediante dimmer y activación por sensor PIR. El consumo mensual del sistema con IoT se representó mediante E_{agosto} , obtenido en la sección de estimación de consumo a partir de registros cada 5 minutos.



3.13.3 Incorporación del consumo adicional del IoT.

El consumo propio de la electrónica del sistema IoT estimado en la TABLA X, se incorporó al balance energético del escenario con IoT para obtener el consumo total del sistema. De esta forma, el consumo mensual total con IoT se calculó mediante la ecuación 9:

Donde:

E_{agosto} : Corresponde al consumo mensual de la luminaria con control IoT.

E_{IoT_comp} : Es el consumo adicional del sistema IoT obtenido en la TABLA X.

$$E_{Total_IoT} = E_{agosto} + E_{IoT_comp} \quad (9)$$

3.13.4 Cálculo del ahorro energético (IoT vs sin IoT)

El ahorro energético del sistema se calculó por medio de la ecuación 10, comparando el consumo mensual del escenario sin IoT con el consumo total del escenario con IoT:

$$Ahorro\% = \frac{E_{sinIoT} - E_{Total_IoT}}{E_{sinIoT}} \quad (10)$$

La ecuación 10 definió el ahorro que se tiene con el sistema IoT; los valores numéricos de E_{sinIoT} y E_{total_IoT} se determinaron y presentaron en el Capítulo 4 a partir de los datos registrados.

3.13.5 Consideraciones del análisis energético

Para el análisis energético se consideró que la electrónica del sistema IoT permaneció encendida 24 h/día para asegurar monitoreo y comunicación. El consumo de la luminaria con IoT se obtuvo a partir de registros de potencia cada 5 minutos, convirtiendo cada muestra a energía y sumando los intervalos. Como la medición se realizó durante 8 noches, el consumo mensual se estimó por extrapolación a 31 noches. El consumo propio de los componentes del IoT TABLA X se incorporó al balance como consumo adicional para calcular el consumo total con IoT. Finalmente, el ahorro porcentual se definió comparando el consumo sin IoT con el consumo total con IoT. Los resultados numéricos se presentaron en el Capítulo 4.

CAPITULO IV

El objetivo principal de este capítulo es el desarrollo del prototipo para ser implantado en el sector de La Victoria, en la ciudad de Ibarra, haciendo uso de las tecnologías de internet de las cosas. Este prototipo busca tener un mejor control sobre las luminarias.



4.1 *Diseño del prototipo*

El sistema que se observa en Fig 37 consta de un conjunto de sensores que están encargados de medir el voltaje y la corriente de la luminaria, a partir, de estas mediciones la potencia eléctrica es obtenida mediante un proceso de cálculo interno, sin realizar medición directa de dicha variable para así enviar esta información al controlador central, el cual se encarga de procesar los datos y transmitirlos a la plataforma de Ubidots para su visualización.

En la plataforma de Ubidots, los valores medidos se representan mediante gráficas en tiempo real y se almacenan en una base de datos, permitiendo la generación de un historial de funcionamiento de cada luminaria. Adicionalmente, el sistema cuenta con un módulo de alertas que permite notificar posibles fallas o condiciones anómalas en la operación del sistema.

Como parte del diseño general del prototipo, se incluye un sensor de movimiento tipo PIR y un dimmer los cuales forma parte del sistema de control de iluminación en esta sección se presenta únicamente su integración a nivel de sistema, mientras que la lógica de operación asociada a este sensor se detalla en secciones posteriores.

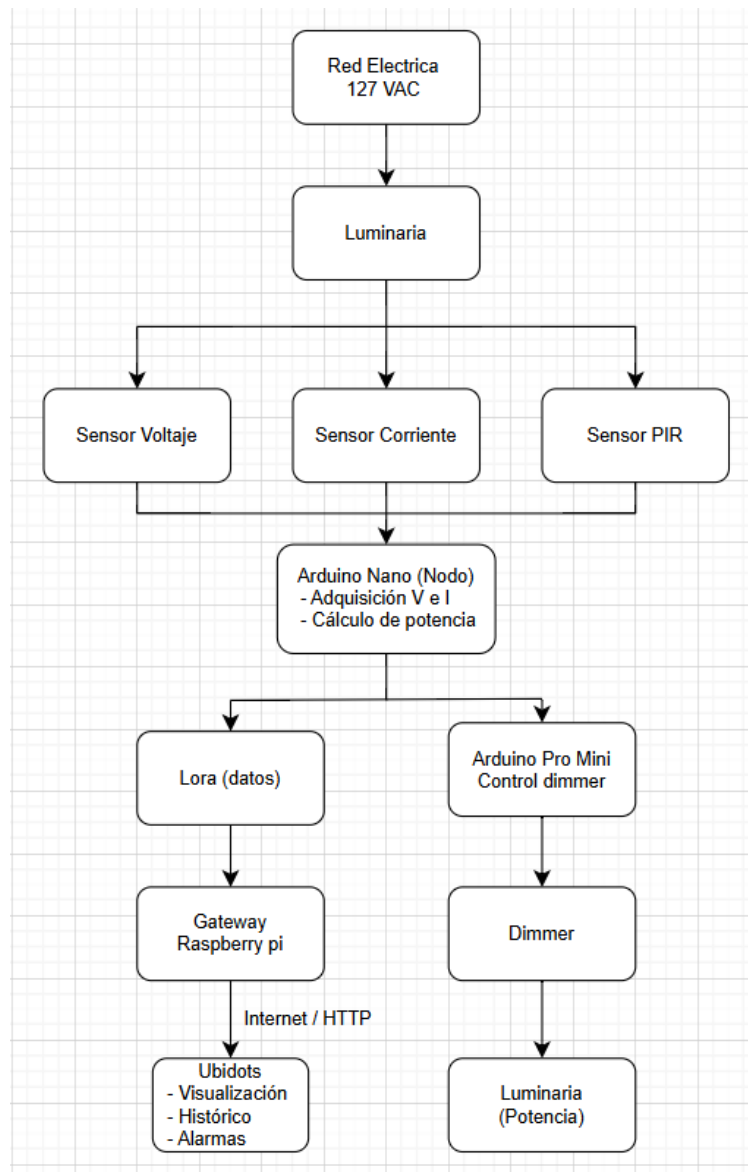


Fig 37. Diagrama general del sistema en bloques.

4.2 Análisis de ubicación y adecuación del sistema eléctrico

Durante el proceso de evaluación del diseño actual, se efectuó una inspección técnica en el sector la victoria para la implementación del prototipo. A partir del diagnóstico de las condiciones existentes, se identificó que una de las tres luminarias debía instalarse en un poste sin lámparas, garantizando así su independencia operativa. Las otras dos luminarias fueron destinadas a reemplazar las existentes. Adicionalmente, se consideró que los postes



seleccionados cuenten con una línea monofásica, dado que las líneas bifásicas presentes en otros tramos no poseen del conductor neutro, el mismo que es indispensable para el correcto funcionamiento de las luminarias diseñadas en este proyecto de titulación. Esta adecuación fue clave para asegurar la estabilidad eléctrica y la operatividad del sistema propuesto. La Fig 38 muestra la localización real de las luminarias instaladas en el tramo.

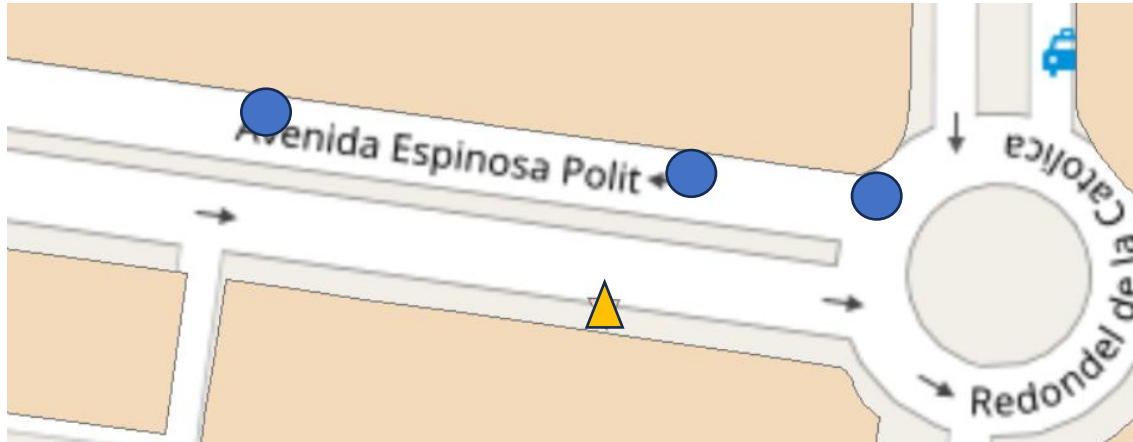


Fig 38. Ubicación de las luminarias IoT en el sector La Victoria, representadas mediante cuadrados y del Gateway central indicado con un triángulo.

4.3 Componentes tecnológicos

El prototipo consta de varios componentes que trabajan en conjunto para lograr el control inteligente del alumbrado público:

4.3.1 Hardware

El hardware son los componentes físicos que se utilizaron para realizar el diseño de las luminarias públicas en base a la tecnología IoT [36].

- **Raspberry Pi 3:** Fue utilizada como el dispositivo central del sistema de monitoreo, actuando como gateway de comunicación. Su función principal es recibir los datos enviados por los nodos de las luminarias a través de tecnología LoRa y transmitir esta información a la plataforma IoT Ubidots para su visualización, almacenamiento y gestión de alertas. En la Fig. 39 se muestra la Raspberry Pi 3 utilizada como nodo central del sistema, la cual permite la integración entre los dispositivos de campo y la plataforma en la nube.



Fig 39. Raspberry pi 3.

- Sensor de corriente y voltaje:** Los sensores de corriente y voltaje se emplearon para monitorear el estado eléctrico de cada luminaria. Estos sensores permiten obtener las mediciones necesarias para evaluar el comportamiento del sistema durante su operación. La información capturada es procesada por el microcontrolador del nodo y posteriormente enviada hacia el gateway para su análisis y visualización en la plataforma IoT. En la Fig. 40 se muestran los sensores SCT013 y ZMPT101B utilizados en el prototipo.

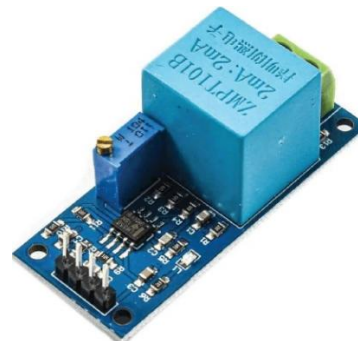


Fig 40. Sensor de corriente SCT013 y sensor de Voltaje Zmpt101B (Mercado Libre).

- Sensor PIR:** El sensor de movimiento tipo PIR fue incorporado al sistema con el fin de detectar la presencia de personas o vehículos en el área de influencia de la luminaria. Esta información es utilizada por el sistema de control para ajustar el nivel de iluminación de acuerdo con la detección de movimiento. La Fig. 41 presenta el sensor PIR empleado en el sistema.



Fig 41. Sensor de movimiento PIR [33].

- Módulos de comunicación:** El LoRa SX1278 se utilizaron para permitir la transmisión de datos entre los nodos de las luminarias y el gateway central. Esta tecnología facilita la comunicación inalámbrica a largas distancias con bajo consumo energético, lo que resulta adecuada para aplicaciones de alumbrado público distribuido. En la Fig. 42 se muestra el módulo LoRa utilizado para la comunicación entre nodos.

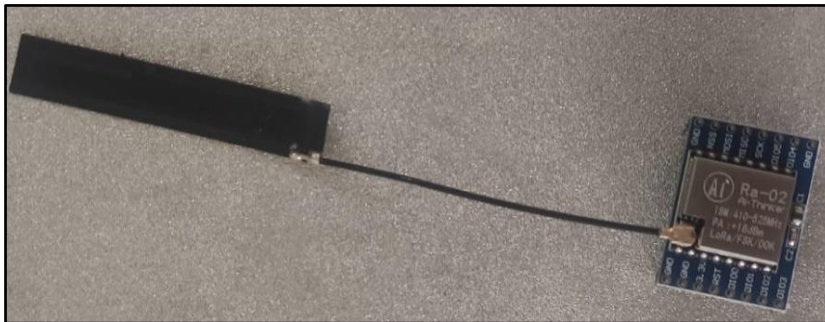


Fig 42. Modulo LoRa, utilizado para la comunicación entre nodos.

- Dimmer:** Es el dispositivo encargado de regular la potencia suministrada a la luminaria. Su operación se basa en las señales de control enviadas por el microcontrolador, permitiendo aumentar o reducir el nivel de iluminación según las condiciones definidas por el sistema. De esta manera, el dimmer contribuye al control eficiente del consumo energético del alumbrado público. La Fig. 43 muestra el módulo dimmer utilizado en el prototipo.



Fig 43. Dimmer [35].

4.3.2 Software

El software del sistema está conformado por los programas y plataformas que permiten la configuración, programación y supervisión de los dispositivos que integran el prototipo de alumbrado público. Estos elementos de software facilitan la comunicación entre el hardware de campo y la plataforma de monitoreo en la nube [37].

- **Raspberry Pi OS:** Es el sistema operativo instalado en la Raspberry Pi que permite ejecutar los servicios necesarios para la recepción de datos provenientes de los nodos de las luminarias. Además, posibilita el envío de esta información hacia la plataforma en la nube y la supervisión remota del funcionamiento general del sistema.
- **Ubidots:** Es la plataforma IoT utilizada para la visualización de las variables eléctricas de cada luminaria. Permite mostrar los datos en tiempo real, almacenar el historial de funcionamiento y generar alertas ante condiciones anómalas durante la operación del sistema.
- **Arduino IDE:** Es el entorno de desarrollo empleado para la programación de los microcontroladores utilizados en el prototipo. A través de esta herramienta se desarrolló el código encargado de la adquisición de datos de los sensores, la comunicación con otros dispositivos y el control básico del sistema.

4.4 Arquitectura y módulos del sistema

Se organizó de forma modular con el fin de separar las funciones de control, monitoreo y comunicación. Esta estructura permite que los distintos dispositivos del prototipo trabajen de manera conjunta y facilita la comprensión del funcionamiento general del sistema.



El sistema se divide en diferentes módulos que se encargan de la adquisición de datos, el control del alumbrado y la visualización de la información, los cuales se comunican entre sí para el correcto funcionamiento del prototipo.

4.4.1 Módulo Gateway de comunicación

El Módulo Gateway de comunicación es el encargado de recibir los datos enviados por los nodos de las luminarias y enviar hacia la página de Ubidots para su almacenamiento y visualización, como se observa en la Fig 44.

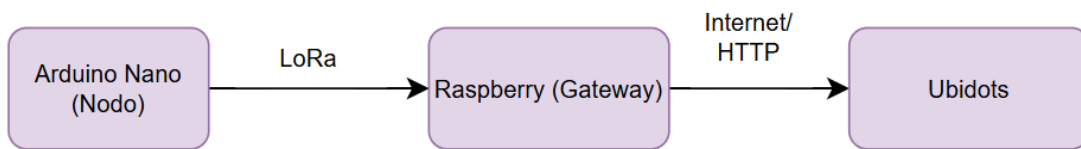


Fig 44. Diagrama del módulo Gateway de comunicación.

Para el módulo fue necesario utilizar una Raspberry Pi 3 junto con un módulo LoRa, el cual permite la transmisión de datos a larga distancia con bajo consumo de energía.

En la Fig 45 se presenta el esquemático de conexión utilizado para establecer la comunicación entre el módulo LoRa y la Raspberry Pi, la cual actúa como gateway del sistema IoT.

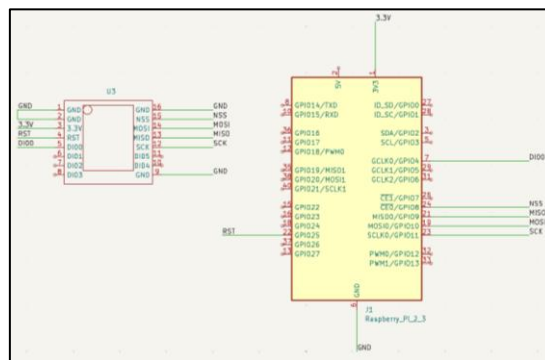


Fig 45. Esquemático de conexión del Gateway.

4.4.2 Módulo de control y de monitoreo del alumbrado público.

El módulo de control y de monitoreo está equipado con sensores de corriente, voltaje, sensor de movimiento tipo PIR y el dimmer que permiten supervisar el estado de funcionamiento de cada luminaria y realizar ajustes en su nivel de iluminación.



Las variables eléctricas son captadas por los sensores de corriente y voltaje, la información obtenida por el microcontrolador del nodo es empaquetada y enviada de forma inalámbrica hacia el Raspberry pi 3 mediante la tecnología LoRa.

El dimmer forma parte del sistema de control local del alumbrado y permite regular la potencia suministrada a la luminaria en función de las señales generadas por el sensor PIR que detecta el movimiento en la zona de la luminaria, de esta manera el módulo integra las funciones de monitoreo y control necesarias para el funcionamiento del sistema de alumbrado público.

En la Fig 46 se presenta el diagrama del módulo de monitoreo y control de la luminaria, en el cual se muestra de manera general la interacción entre los sensores, el microcontrolador, el sistema de control de potencia y el envío de información hacia el módulo Gateway de comunicación.

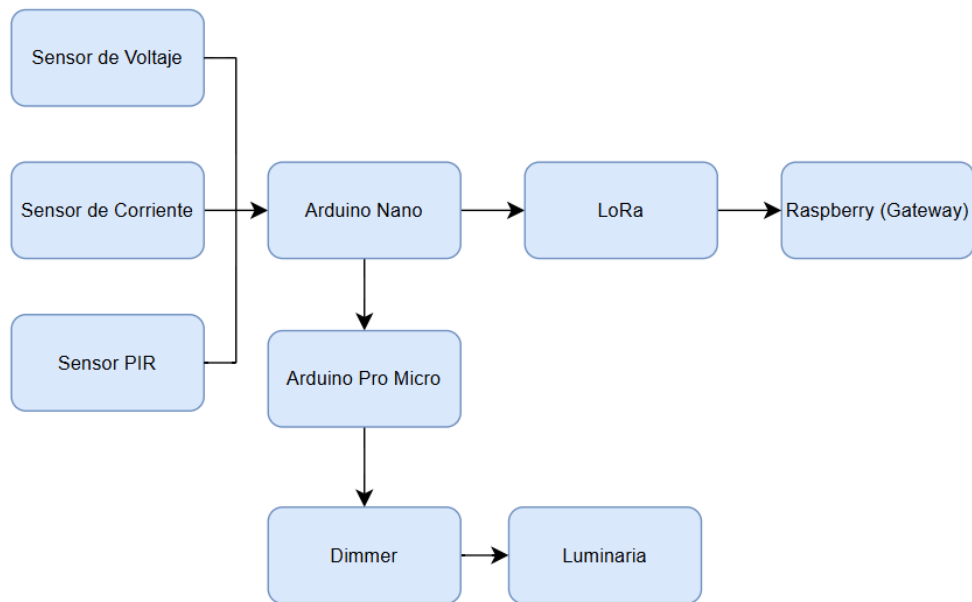


Fig 46. Diagrama del módulo de monitoreo y control de la luminaria.

4.5 *Diseño electrónico del sistema*

El diseño electrónico del sistema corresponde a la etapa en la que se definen e implementan las conexiones físicas entre los distintos componentes que conforman el prototipo de alumbrado público inteligente. En esta sección se describen los esquemas y configuraciones



eléctricas necesarias para la correcta adquisición de las variables eléctricas, el control de la luminaria y la comunicación entre los módulos del sistema. El objetivo principal es garantizar un funcionamiento estable y seguro del hardware implementado.

4.5.1 Conexión de los sensores y actuadores

Se presentan las conexiones realizadas entre los sensores, actuadores y módulos electrónicos que integran el sistema de monitoreo y control del alumbrado público. Estas conexiones permiten la adquisición de señales de voltaje, corriente y detección de movimiento, así como la regulación de la potencia suministrada a la luminaria. La correcta interconexión de estos elementos resulta fundamental para asegurar la operación adecuada del sistema antes de proceder con la calibración de los sensores y el análisis de los datos obtenidos.

El esquemático electrónico completo del sistema de control y monitoreo de la luminaria se presenta en el Anexo D.

4.5.1.1 Conexión del sensor de voltaje

En esta Fig 47 se muestra la conexión del sensor ZMPT101B, utilizado para la medición de voltaje en corriente alterna. Se conectó los pines VCC y GND para la alimentación del módulo, mientras que los terminales A1 y A2 fueron utilizados para la salida de señal analógica, asegurando su correcta integración con el sistema de adquisición de datos.

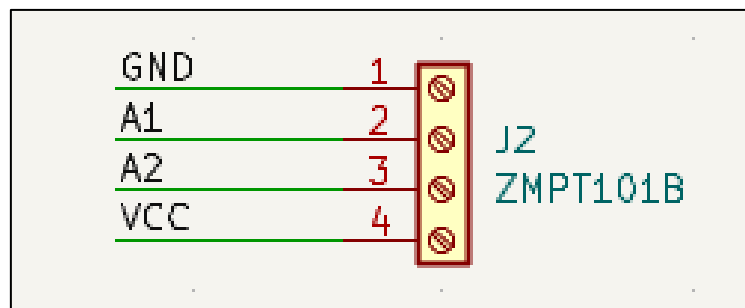


Fig 47. Conexión del sensor de voltaje ZMPT101B.

4.5.1.2 Conexión del sensor de corriente

El circuito mostrado permite la correcta polarización de la entrada analógica destinada al sensor de corriente. Se empleó un divisor de voltaje compuesta por las resistencias R2 y R3 de 10 kΩ, junto con R1 de 33 Ω, estableciendo un punto de referencia en el pin A5 del



microcontrolador. Además, se añadió el condensador C1 de 10 μ F con el fin de filtrar señales de alta frecuencia, mejorando así la calidad de la señal medida. Finalmente, la conexión del conector U1 definió las referencias GND y el pin de entrada a utilizar. El circuito de polarización y la asignación de pines se muestran en la Fig. 48.

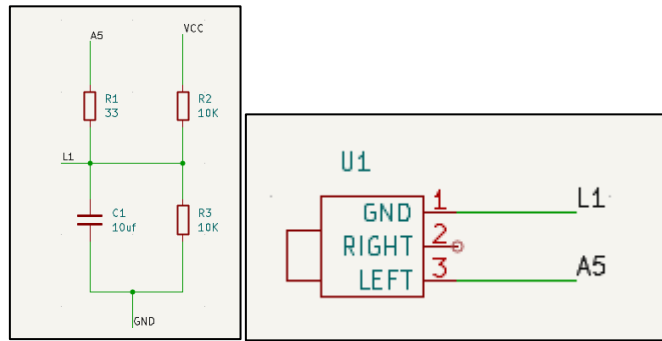


Fig 48. Circuito de polarización para entrada analógica y pines de señal.

4.5.1.3 Conexión del sensor de PIR

La Fig 49 representa el esquema de conexión empleado para el sensor PIR, encargado de detectar movimiento. Se conectó el pin VCC para la alimentación del módulo, el pin GND como referencia de tierra, y se utilizó el pin D6 para la transmisión de la señal digital de salida, permitiendo así que el microcontrolador interpretara correctamente las detecciones.

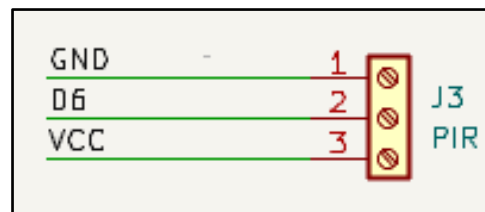


Fig 49. Esquemático de conexión del sensor PIR: alimentación y señal digital.

4.5.1.4 Conexión del asm1117.

El regulador de voltaje asm1117 se utilizó en este proyecto para obtener una salida estable de 3.3 V a partir de una entrada de 5 V. Esta conversión es fundamental para alimentar componentes sensibles que no toleran voltajes mayores, como ciertos sensores o módulos de comunicación (por ejemplo, LoRa). El circuito incorpora dos capacitores electrolíticos de 10 μ F, ubicados en la entrada y salida del regulador, cuya función es estabilizar el voltaje y filtrar



posibles ruidos o picos transitorios. Esta etapa garantiza que la alimentación eléctrica del sistema sea segura. La Fig. 50 muestra el circuito de regulación de voltaje empleado.

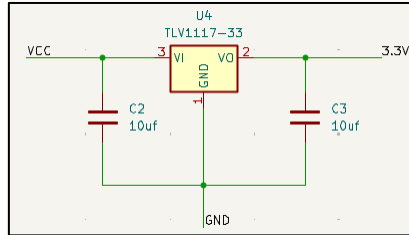


Fig 50. Regulador de voltaje TLV1117-33 para conversión a 3.3 V.

4.5.1.5 Conexión del LoRa.

El módulo LoRa se integra al sistema como medio de comunicación inalámbrica de largo alcance. Este módulo permite transmitir datos a kilómetros de distancia utilizando muy poca energía. La conexión se realiza a través de la interfaz SPI, por lo que se requiere una correcta asignación de los pines MOSI, MISO, SCK y NSS entre el microcontrolador y el módulo LoRa. Además, se deben considerar las condiciones eléctricas del módulo, como su alimentación a 3.3 V, para proteger el módulo. Esta etapa es clave para el envío de la información recolectada hacia un nodo central o receptor. La Fig. 51 presenta el esquema de conexión del módulo LoRa con el microcontrolador.

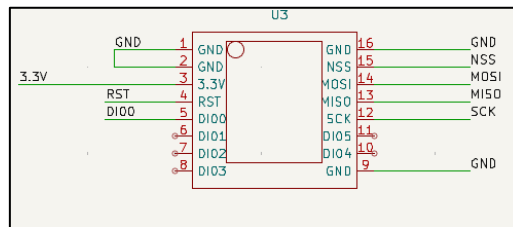


Fig 51. Conexión del LoRa.

4.5.1.6 Conexión del Arduino Pro mini

Su integración en el sistema se realiza a través de sus pines de entrada/salida digital, analógica y de comunicación serie como se observa en la Fig 52. A diferencia de otros modelos, el mini Pro incluye soporte nativo para USB, lo que permite emular dispositivos como teclados o ratones sin módulos adicionales. En este proyecto, el mini Pro se utiliza como unidad central



de procesamiento, encargada de recibir señales desde sensores y módulos periféricos, procesarlas, y transmitir los datos correspondientes.

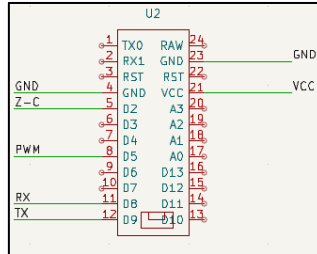


Fig 52. Diagrama de pines del Arduino mini Pro.

4.5.1.7 Conexión del Dimmer.

La Fig 53 muestra los pines usados en el módulo dimmer, destinado al control de carga mediante modulación PWM. Se conectaron las terminales VCC y GND para su alimentación, el pin Z-C para la detección del cruce por cero, y el pin PWM que permitió regular la potencia de salida hacia las respectivas luminarias.

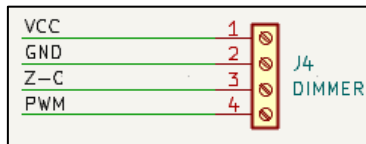


Fig 53. Conexión del módulo dimmer para control de carga.

4.5.1.8 Conexión del Arduino nano

En la Fig 54 se presenta el esquema de conexión de la placa del Arduino Nano que se utilizó como microcontrolador principal. En el que se vinculó las entradas analógicas y digitales necesarias para recibir las señales de los sensores y actuadores, estableciendo las conexiones de VCC y GND para garantizar la correcta alimentación y referencia común de todo el circuito.

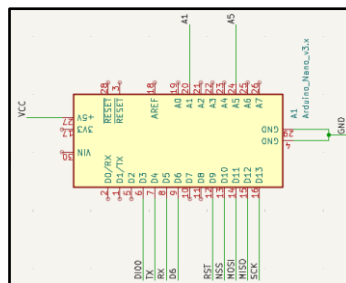


Fig 54. Conexión del Arduino nano.



4.5.1.9 Conexión de la fuente de 5V.

En la Fig 55 se tiene la conexión de la fuente de alimentación de 5V DC fue necesaria para energizar el circuito de control. Se utilizó el pin VCC para suministrar el voltaje regulado y el pin GND como referencia de tierra común, garantizando así una correcta distribución de energía a los distintos módulos del sistema.

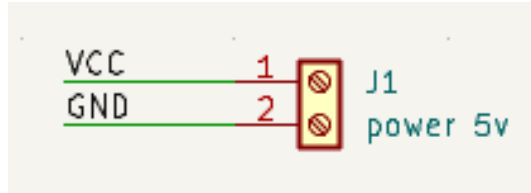


Fig 55. Conexión de la fuente.

4.5.2 Calibración y configuración de sensores

Una vez adquiridos los materiales necesarios para el desarrollo del prototipo, el primer paso consistió en la calibración de los sensores, considerando los valores reales de voltaje y corriente presentes en el lugar de prueba. Esta etapa fue fundamental para garantizar la precisión en las mediciones y el correcto funcionamiento del sistema.

4.5.2.1 Calibración del sensor de Corriente (SCT-013-100)

Para la calibración del sensor se requiere de una constante que permite tener valores precisos de corriente y para obtener esta constante se utilizó la siguiente expresión:

$$Constante\ nueva = FS_{Vieja} \times \frac{I_{real}}{I_{real}} \tag{4}$$

Donde:

$I_{arduino}$: Corresponde el valor medio por el sistema de adquisición

FS_{Vieja} : Factor de sensibilidad inicial del sensor

I_{real} : Es el valor real medido con el instrumento.

Para obtener la corriente real de la luminaria se utilizó como referencia un medidor digital de energía modelo KWS-AC301 como se ve en Fig 56, el cual permitió obtener el valor real de la corriente consumida por la luminaria durante las pruebas de funcionamiento.



Fig 56. Medidor digital de energía modelo KWS-AC301.

El valor de corriente medido es de 0,169 A, el cual fue considerado como referencia para el ajuste del sensor implementado en el sistema.

Posteriormente, para el ajuste de la constante de calibración se utilizó el código que se encuentra en el Anexo E, el cual permitió obtener las lecturas necesarias del sensor de corriente el cual se puede observar en el Anexo F y así comparar con el valor del instrumento externo. A partir de esta comparación, se realizó el ajuste de la constante de calibración mediante la expresión ya mencionada, con el objetivo de corregir la diferencia existente entre ambos valores.

Cálculo de la nueva constante de calibración:

$$Nueva\ constante = 65,4 \times \frac{0,169}{0,374} = 50$$

Reemplazando los valores obtenidos durante la medición, se determinó una nueva constante aproximada de 50, la cual fue incorporada en el código del microcontrolador. Con este ajuste, las lecturas del sensor de corriente se aproximaron a los valores reales de consumo eléctrico de la luminaria, mejorando la precisión del sistema de monitoreo.

La calibración se realizó con la luminaria operando a potencia constante, sin variaciones de dimerización, con el fin de asegurar condiciones estables durante la medición.

4.5.2.2 Calibración del sensor de Voltaje (ZMPT101B)

Para la calibración del sensor de voltaje se utilizó como referencia el valor real de voltaje de la red eléctrica medido mediante el instrumento que está en la Fig 56, durante las pruebas el voltaje de alimentación registrado fue de aproximadamente 125 V, valor que se tomó como



referencia real. Para obtener el nuevo factor de sensibilidad se realiza con la siguiente ecuación (5):

$$\text{Nuevo factor de sensibilidad} = \frac{V_{arduino} \times FS_{vieja}}{V_{real}} \quad (5)$$

Donde:

$V_{arduino}$: Corresponde el valor medio por el sistema de adquisición

FS_{vieja} : Factor de sensibilidad inicial del sensor

V_{real} : Es el valor real medido con el instrumento patrón.

Para el ajuste de la constante de calibración se utilizó un código específico, el cual se presenta en el Anexo G, mediante este código se obtuvieron las lecturas del sensor de voltaje, las cuales fueron comparadas con la medición real registrada, mostrada en el Anexo H. A partir de esta comparación, se realizó el ajuste de la constante de calibración utilizando la expresión previamente mencionada, con el objetivo de corregir la diferencia existente entre ambos valores.

El factor de sensibilidad del sensor de voltaje ZMPT101B es 556.75 el voltaje de la línea es de 125.1 V y el valor censado del sensor de voltaje es 128.50.

$$\text{Nuevo factor sensibilidad} = \frac{125,1 \times 571.89}{128.50} = 556,759$$

Este nuevo factor fue incorporado en el código del microcontrolador, permitiendo que las lecturas de voltaje obtenidas por el sistema se aproximen al valor real de la red eléctrica mejorando la precisión de las mediciones de voltaje utilizadas para el cálculo de la potencia eléctrica de la luminaria.

4.5.2.3 Configuración del sensor de movimiento tipo PIR

El sensor de movimiento no requirió un proceso de calibración matemática, debido a que su funcionamiento se basa en la detección de variaciones de radiación infrarroja generadas por cuerpos en movimiento. Para su correcta operación, únicamente se realizó la configuración de sus parámetros básicos, tales como el tiempo de activación y la sensibilidad, de acuerdo con las condiciones del entorno donde se instaló la luminaria. La señal de salida del sensor fue utilizada por el sistema de control para detectar la presencia de personas o vehículos y permitir el ajuste correspondiente de la potencia de la luminaria mediante el dimmer.



4.6 *Diseño y esquemático General de la PCB*

Posteriormente, se procedió a la elaboración de los diagramas de conexión en el software de KiCAD, los cuales sirvieron de guía para la elaboración de la PCB, tal como se muestra en la Fig 57.

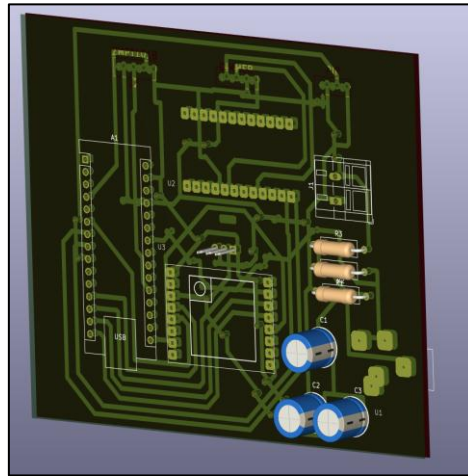


Fig 57. Vista 3D de la PCB en KiCad.

En el Anexo D se presenta el esquemático general de las conexiones utilizadas para integrar los sensores y demás componentes del prototipo.

Una vez verificada la operatividad de los componentes, se procedió al diseño del layout para realizar el circuito impreso (PCB). La vista correspondiente al diseño del PCB se presenta en la Fig 58, mientras que los archivos de pistas y máscara utilizados para su fabricación se incluyen en los Anexo I.

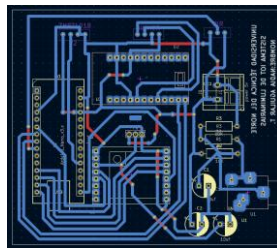


Fig 58. Layout del nodo de control y monitoreo del sistema.

La Fig 59 muestra el diseño del layout del circuito impreso (PCB) correspondiente al módulo gateway de comunicación del sistema. En este diseño se puede observar la disposición de las pistas de cobre y los puntos de conexión entre la Raspberry y el módulo de LoRa, lo cual



permitió ensamblar de manera ordenada y segura todos los elementos del sistema sobre una base de baquelita, facilitando su montaje dentro del gabinete metálico del prototipo.

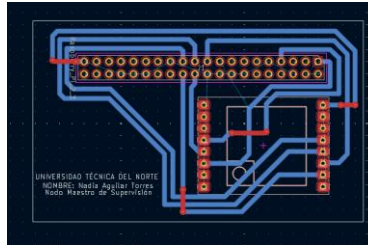


Fig 59. Layot del módulo Gateway de comunicación.

La Fig 60 muestra la placa de circuito impreso (PCB) con los componentes electrónicos integrados. En ella se identifican el sensor de corriente SCT013, el módulo LoRa, el regulador de voltaje y los microcontroladores. La disposición de los componentes permitió optimizar el espacio físico disponible y garantizar una adecuada estabilidad eléctrica del prototipo.



Fig 60. PCB con todos los elementos Integrados.

4.7 Esquema de conexiones eléctricos del sistema de alumbrado público.

En la Fig 61 se presenta el esquema general de conexión de los principales elementos eléctricos del sistema, incluyendo el sensor de voltaje, el sensor de corriente SCT y el dimmer. Cada componente fue dispuesto considerando criterios de seguridad eléctrica y correcta distribución de energía hacia la luminaria, facilitando su instalación física dentro del gabinete.

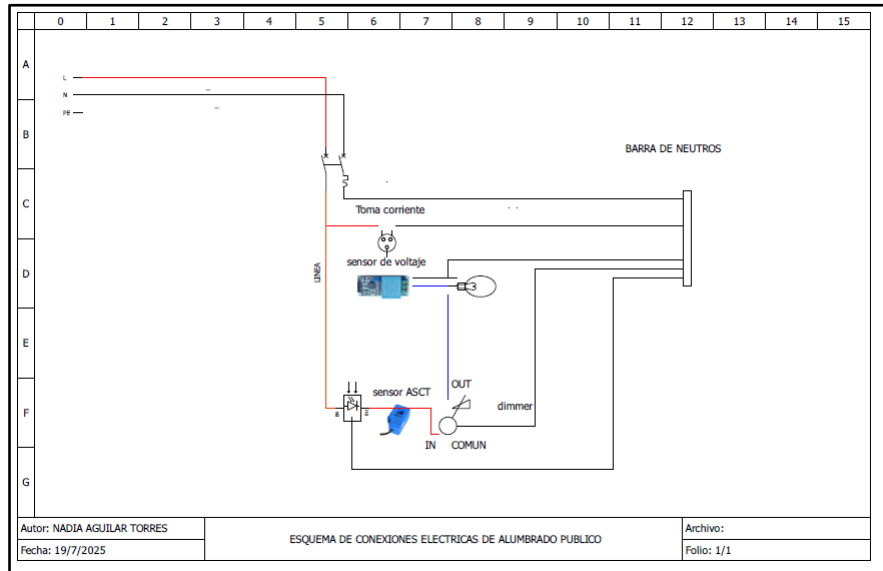


Fig 61. Esquemático de conexiones eléctricas de alumbrado público.

4.7.1 Dimensionamiento de gabinetes

De acuerdo con las dimensiones de los componentes electrónicos que conforman el sistema, se seleccionó un gabinete metálico de 30 × 20 × 15 cm, el cual proporciona el espacio necesario para su instalación y correcto funcionamiento, Fig 62.

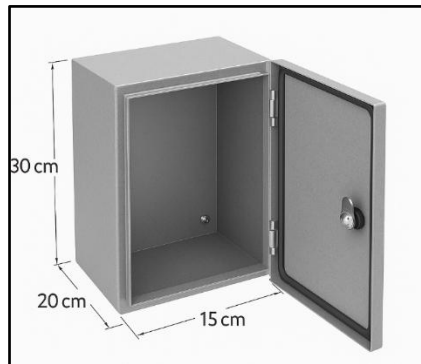


Fig 62. Gabinete metálico utilizado para el módulo de control y monitoreo.

Adicionalmente, se optó por un gabinete plástico de 18x23x13 cm su material aislante y su tamaño compacto resultaron adecuados para integrar el módulo gateway de comunicación, garantizando su operación estable dentro del entorno físico del prototipo. A continuación Fig 63.

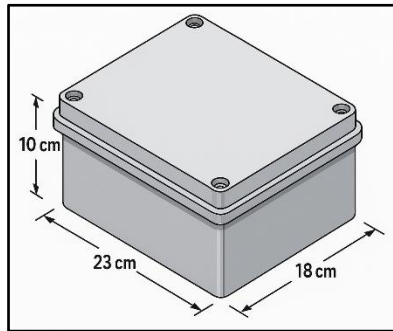


Fig 63. Gabinete plástico utilizado para el módulo de supervisión.

La selección de los gabinetes consideró tanto el espacio requerido por los componentes como las condiciones de instalación en campo.

4.7.2 Distribución interna de los componentes de control y monitoreo.

En la Fig 64 se aprecia el gabinete metálico AOSS line seleccionado para alojar el sistema de control y monitoreo.



Fig 64. Gabinete metálico AOSS line.

En su interior se organizaron de forma segura los elementos clave: fuente de alimentación, microcontroladores, sensores, módulo de comunicación y protecciones eléctricas. Esta configuración permitió asegurar una instalación robusta, protegida contra factores externos y de fácil mantenimiento.

4.7.3 Montaje del sistema central de supervisión

La Fig 65 muestra el interior del gabinete plástico donde se integraron componentes clave del sistema de monitoreo. En su interior se observa la placa de Raspberry Pi encargada de la recolección y envío de datos, un módulo de distribución eléctrica y una caja de protección



adicional. Este gabinete de menor tamaño fue utilizado como unidad de soporte para tareas específicas de supervisión y comunicación en tiempo real, optimizando espacio y funcionalidad.



Fig 65. Montaje del sistema central de supervisión.

4.8 *Funcionamiento y validación del sistema*

En esta sección se verificó el funcionamiento del prototipo mediante pruebas de encendido, regulación con el dimmer y medición de voltaje, corriente y potencia. Los valores obtenidos se compararon con un instrumento de referencia y se confirmó el envío y visualización de datos en la plataforma de monitoreo remoto.

4.8.1 *Plataforma Ubidots*

Se evaluó el desempeño del prototipo en condiciones de operación, verificando la correcta integración entre el módulo de control, los sensores eléctricos y el sistema de comunicación. Para ello, se realizaron pruebas de encendido, regulación mediante el dimmer y adquisición de variables como voltaje, corriente y potencia, comprobando la estabilidad de las lecturas y el envío de datos hacia la plataforma de monitoreo como se observa en Fig 66. La validación se efectuó comparando los valores medidos por el sistema con un instrumento externo de referencia, determinando que las mediciones obtenidas se mantienen dentro de un margen aceptable para el seguimiento del funcionamiento de la luminaria. Finalmente, se confirmó que la visualización remota y el registro de históricos permiten supervisar el estado del sistema y apoyar el diagnóstico de fallas durante su operación.



Fig 66. Interfaz del monitoreo remoto en Ubidots.

Se diseñaron paneles de control individuales para cada luminaria, en los cuales se muestran los valores instantáneos de potencia, así como gráficos históricos de voltaje y corriente. Adicionalmente, se configuraron alertas automáticas en la plataforma se observa en la Fig 67 donde se define condiciones para identificar luminarias apagadas o con valores fuera de los rangos establecidos, facilitando el diagnóstico de fallas durante la operación del sistema.

Entre las principales funcionalidades de la interfaz destacan:

- Monitoreo remoto desde cualquier dispositivo con acceso a internet.
- Visualización en tiempo real y almacenamiento de históricos.
- Alertas inteligentes configuradas para eventos críticos.

En las alertas se pusieron condicionales en donde si la potencia es menos que 30 W en horario de las 18:00 hasta las 5:59 se manda un mensaje de correo electrónico para su debido mantenimiento. De igual forma se tienen otras condiciones para cuando deba estar apagada no este encendida.



<input type="checkbox"/>	Nombre	Creado en ↓	Desencadenantes	Comportamiento	Organización	⌵
<input type="checkbox"/>	Si es un evento condicional, en...	14/07/2025 20:54:33				⋮
<input type="checkbox"/>	Si es un evento condicional, en...	14/07/2025 20:53:42				⋮
<input type="checkbox"/>	Si es un evento condicional, en...	14/07/2025 20:47:18				⋮
<input type="checkbox"/>	Si es un evento condicional, en...	14/07/2025 20:47:08				⋮
<input type="checkbox"/>	Si es un evento condicional, en...	14/07/2025 19:57:20				⋮
<input type="checkbox"/>	Si es un evento condicional, en...	14/07/2025 19:54:47				⋮
<input type="checkbox"/>	Si es un evento condicional, en...	14/07/2025 19:51:22				⋮
<input type="checkbox"/>	Si es un evento condicional, en...	14/07/2025 19:49:11				⋮
<input type="checkbox"/>	Si es un evento condicional, en...	14/07/2025 19:46:02				⋮

EVENTOS POR PÁGINA 10 1 - 9 de 9 < >

Fig 67. Alertas de la plataforma Ubidots, para futuros mantenimientos.

4.8.2 Comunicación y envío de datos a la plataforma

La comunicación entre las luminarias y la plataforma de supervisión se realiza mediante un esquema jerárquico de transmisión de datos. Cada nodo de monitoreo envía de forma inalámbrica la información obtenida por los sensores hacia un módulo gateway basado en Raspberry Pi, utilizando tecnología LoRa.

La Raspberry Pi actúa como nodo central del sistema, encargándose de recibir los datos provenientes de los nodos y reenviarlos hacia la plataforma Ubidots mediante el protocolo MQTT. Este mecanismo permite establecer un flujo continuo de información desde las luminarias hasta la nube, facilitando su almacenamiento, visualización y posterior análisis.

4.8.3 Lógica de funcionamiento.

En la Fig 68 se presenta el diagrama de flujo del módulo de control del sistema, en este esquema se muestra cómo cada nodo envía la información obtenida por los sensores hacia el microcontrolador, el cual verifica la disponibilidad de los datos antes de proceder con su transmisión. En caso de no recibir respuesta, el sistema verifica el estado de los módulos de censado. Una vez confirmada la recepción de los datos, el microcontrolador recibe los datos de los sensores y estos son enviados al Raspberry pi 3 para después ser enviados hacia la plataforma



Ubidots para su posterior transmisión a la plataforma Ubidots, donde se visualizan las variables medidas.

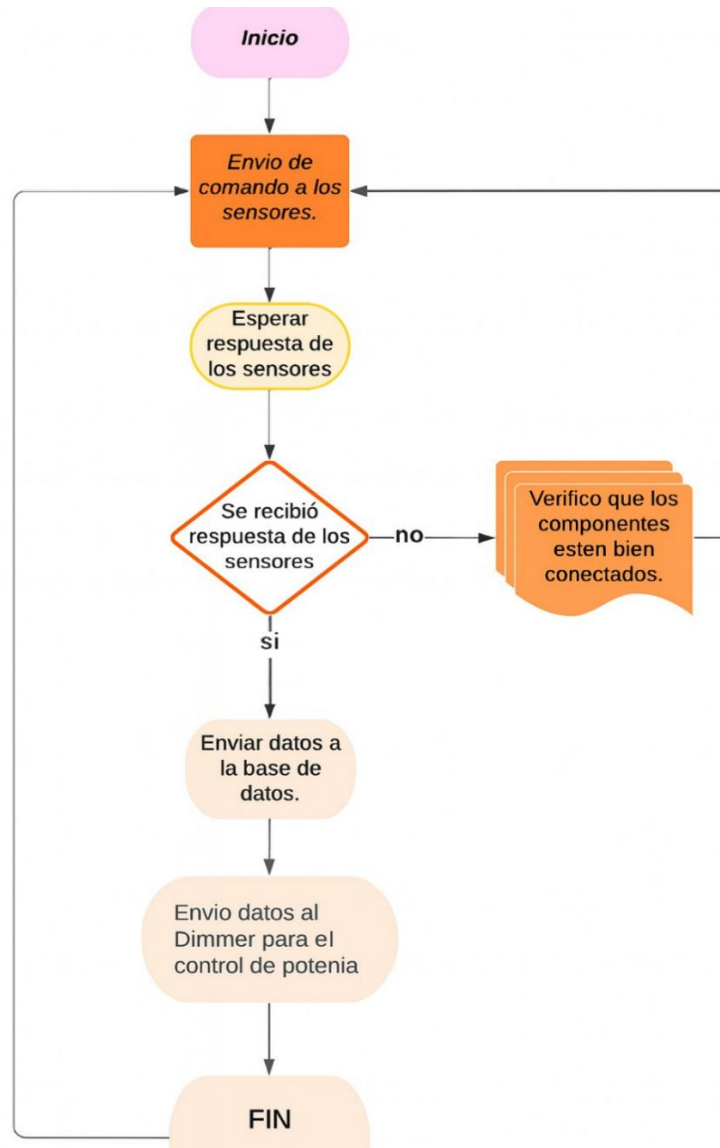


Fig 68. Diagrama de flujo del módulo de control.

El flujo mostrado corresponde al proceso de monitoreo y toma de decisiones, mientras que eléctricamente el dimmer es el encargado de modular la energía suministrada a la luminaria, variando el nivel de salida según las variables medidas. Así, en el intervalo de 00:00 a 03:59 el microcontrolador envía la consigna de atenuación y el dimmer reduce la potencia entregada,



disminuyendo el flujo luminoso al 60% y optimizando el consumo; cuando el PIR detecta movimiento, se genera una nueva consigna y el dimmer incrementa la potencia de manera automática conforme a la lógica definida.

4.8.4 Flujo de programación

A continuación, se presenta en Fig 69 el flujo de programación utilizada para el monitoreo y control de las luminarias. El diagrama describe la secuencia lógica del sistema desde el encendido del módulo, la sincronización horaria de la Raspberry Pi y la recepción de datos provenientes del módulo LoRa.

Con base en la información recibida, el sistema determina el estado de encendido de la luminaria y evalúa el horario de funcionamiento para decidir si es necesario reducir la potencia. Asimismo, se supervisa el estado operativo del sistema, permitiendo la generación de alertas en caso de detectar fallas o valores fuera de los rangos establecidos.

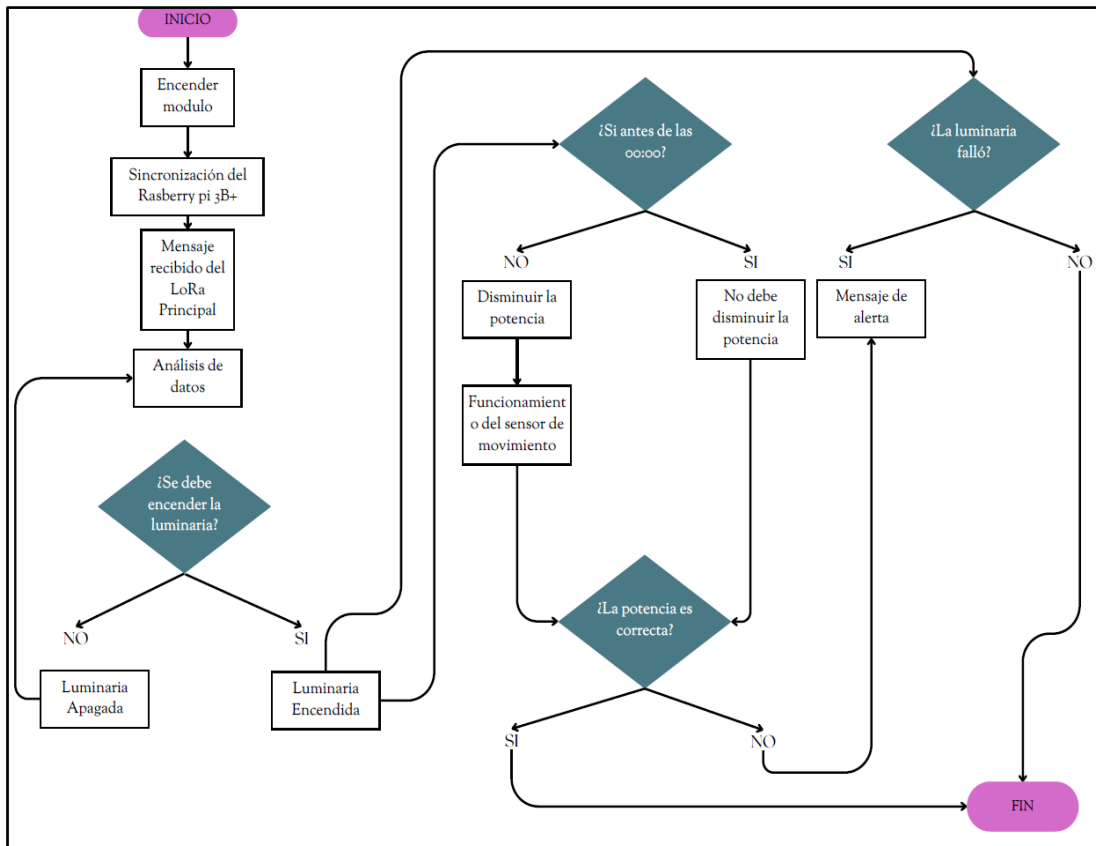


Fig 69. Flujo de programación.



4.9 Implementación del prototipo

Como parte final del trabajo de grado, se llevó a cabo la implementación del sistema de alumbrado inteligente en el sector La Victoria, en la ciudad de Ibarra. Esta fase permitió comprobar el desempeño real del prototipo implementado, el cual integra luminarias con capacidad de dimerización, sensores de presencia y monitoreo remoto a través de la nube. Con el acompañamiento del equipo técnico de la Empresa Eléctrica Regional Norte (EMELNORTE), se ejecutaron tareas como el retiro de luminarias previas, la instalación de los nuevos equipos y la revisión funcional en diferentes horarios. A continuación, se detalla el proceso mediante evidencia técnica y visual obtenida durante la instalación

4.9.1 Apoyo del personal técnico de EMELNORTE

Para la implementación del prototipo, se contó con el apoyo del personal técnico de la Empresa Eléctrica Regional Norte (EMELNORTE), como se observa en la Fig 70, quienes facilitaron el vehículo técnico y herramientas necesarias para realizar el montaje del sistema.



Fig 70. Apoyo del personal técnico de EMELNORTE durante el montaje del sistema de iluminación.

4.9.2 Desmontaje de luminarias existentes

El primer paso fue el desmontaje de las luminarias convencionales ubicadas en los postes de alumbrado público, tal como se muestra en la Fig 71, con el fin de reemplazarlas por las luminarias inteligentes diseñadas para este proyecto.



Fig 71. Desmontaje de las luminarias para la colocación de las luminarias IoT.

4.9.3 *Montaje de luminarias y caja de control*

A continuación, se procedió al montaje de las nuevas luminarias y la caja de control, en la Fig 72 se evidencia la instalación de los módulos de sensado, procesamiento y transmisión de datos, lo que permite el control automatizado del sistema.



Fig 72. Montaje de luminarias LED y caja de control del sistema de monitoreo y control.



4.9.4 *Verificación en la plataforma Ubidots*

Una vez completado el montaje, se validó que los valores censados por los sensores (corriente, voltaje, detección de movimiento, etc.) se reflejaran correctamente en la plataforma de visualización Ubidots, garantizando la conectividad y operatividad del sistema.

4.9.5 *Inspección nocturna y validación de funcionamiento*

Finalmente, se realizó una visita técnica en horario nocturno para verificar el comportamiento del sistema de dimerización, como se aprecia en la Fig 73. Se observó que las luminarias reducen su potencia automáticamente a medianoche y aumentan su intensidad cuando se detecta movimiento con el peatón caminando u vehículo circulando, cumpliendo con la lógica de funcionamiento programada.



Fig 73. Inspección nocturna y validación del funcionamiento del sistema de iluminación inteligente.

4.10 *Resultados*

Para la evaluación del desempeño del prototipo de red de alumbrado público basado en tecnología IoT, se realizó un monitoreo continuo durante una semana, comprendida entre el 1 y 9 de agosto del año 2025, en el sector de La Victoria, ciudad de Ibarra.

En este periodo se registraron los valores de voltaje, corriente y potencia eléctrica de cada luminaria, asimismo, mediante la plataforma Ubidots, se verificó el correcto



funcionamiento del sistema de regulación automática de potencia de las luminarias y la respuesta del sistema ante la detección de movimiento mediante el sensor PIR.

4.10.1 Comportamiento general del sistema por modo de operación.

El sistema de alumbrado público con base a tecnología de internet de las cosas opera bajo distintos modos de funcionamiento definidos en función de las condiciones de iluminación y detección de movimiento. En la TABLA XI se presenta un resumen del comportamiento eléctrico general del sistema para cada modo de operación durante el periodo de monitoreo.

TABLA XI
COMPORTAMIENTO GENERAL DEL SISTEMA POR MODO DE OPERACIÓN

Modo de Operación	Estado de la luminaria	Voltaje RMS (V) (Min/Max)	Potencia Promedio (W)
06h00 hasta 17h59	Apagada	11,22 - 13,62	3,497
18h00 hasta 23h59	Encendida	122,11 - 125,91	135,030
00h00 hasta 03h59	Encendida	71,32 – 125,60	91,33
04h00 hasta 05h59	Encendida	122,18 – 125,84	135,010

Con el fin de detallar las condiciones de operación asociadas a cada modo, en la TABLA XII se presentan los estados de control del sistema y los rangos de corriente eléctrica registrados.

TABLA XII
CONDICIONES DE CONTROL Y RANGOS DE CORRIENTE POR MODO DE OPERACIÓN

Modo de Operación	Estado del Dimmer	Activación Pir	Corriente RMS (A) (Min/Max)
06h00 hasta 17h59	N/A	No	0,34 - 0,62
18h00 hasta 23h59	Activado al 90%	No	1,05 - 1,2
00h00 hasta 03h59	Activado al 60%	Si (intermitente)	0,85 – 1,25
04h00 hasta 05h59	Activado al 90%	No	1,07 – 1,19

4.10.2 Comparación entre luminarias

En esta sección se compararon los valores eléctricos registrados en cada luminaria, considerando los distintos horarios de operación definidos, con el fin de identificar similitudes y diferencias en su comportamiento.



4.10.3 Comparación entre luminarias en modo diurno (06h00 hasta 17h59).

Durante el modo diurno, se registraron los valores eléctricos de las tres luminarias con el sistema de iluminación apagado.

TABLA XIII
COMPARACIÓN ELÉCTRICA ENTRE LUMINARIAS EN HORARIO DIURNO

Luminarias	Voltaje (Min/Max)	Corriente (Min/Max)	Potencia (Min/Max)	Potencia Promedio
L1	11,36 - 13,55	0,35 - 0,6	3,06 – 3,94	3,504
L2	11,22 - 13,62	0,34 - 0,62	3,12 – 3,88	3,493
L3	11,48 - 13,41	0,37- 0,58	3,03 – 3,97	3,496

A partir de los valores presentados en la TABLA XIII, se evidenció que las tres luminarias mostraron un comportamiento eléctrico similar durante el modo diurno, correspondiente al periodo en el que el sistema permaneció apagado. La Luminaria 2 presentó el mayor rango de voltaje registrado, con valores comprendidos entre 11,22 V y 13,62 V, mientras que la Luminaria 1 y la Luminaria 3 presentaron rangos cercanos de 11,36–13,55 V y 11,48–13,41 V, respectivamente, manteniéndose dentro de márgenes comparables.

En cuanto a la corriente eléctrica, las tres luminarias registraron rangos similares, destacándose la Luminaria 2 con un valor máximo de 0,62 A, seguida por la Luminaria 1 con 0,60 A y la Luminaria 3 con 0,58 A. Los valores mínimos se mantuvieron entre 0,30 A y 0,37 A, lo que reflejó un comportamiento homogéneo del sistema en condiciones diurnas.

Respecto a la potencia eléctrica, los valores mínimos y máximos registrados fueron cercanos entre las luminarias, con potencias promedio de 3,504 W, 3,493 W y 3,496 W para las luminarias L1, L2 y L3, respectivamente. La Luminaria 1 presentó el mayor valor promedio, aunque la diferencia observada fue reducida y atribuible a variaciones propias de cada punto de instalación.

En general, los resultados obtenidos evidenciaron una respuesta uniforme del sistema durante el modo diurno, sin diferencias relevantes entre luminarias, lo que confirmó la correcta operación del sistema en condiciones de inactividad.



4.10.4 Comparación entre luminarias en modo nocturno base (18h00 hasta 23h59).

En el periodo nocturno base, que abarcó desde las 18h00 hasta las 23h59, el sistema mantuvo un régimen de funcionamiento continuo, sin la aplicación del sistema de reducción de potencia, reflejándose en registros eléctricos consistentes entre las luminarias.

TABLA XIV
COMPARACIÓN ELÉCTRICA ENTRE LUMINARIAS EN MODO NOCTURNO BASE

Luminarias	Voltaje (Min/Max)	Corriente		Potencia		Potencia Promedio
		(Min/Max)	(Min/Max)	(Min/Max)	(Min/Max)	
L1	122,24 - 125,78	1,06	1,18	130,35	139,62	135,037
L2	122,11 - 125,91	1,05	1,2	130,08	139,91	135,012
L3	122,38 - 125,62	1,08	1,16	130,62	139,18	135,040

Los valores de voltaje registrados como se puede observar en la TABLA XIV, se mantuvieron dentro de los rangos próximos entre las luminarias, destacándose la Luminaria 2 con el mayor valor máximo de 125,91 V, mientras que la Luminaria 1 y la Luminaria 3 presentaron valores máximos de 125,78 V y 125,62 V, respectivamente.

En cuanto a la corriente eléctrica, los rangos mínimos y máximos fueron comparables entre las tres luminarias, con valores máximos comprendidos entre 1,05 A y 1,2 A, lo que indicó una demanda de corriente uniforme durante este periodo de operación.

Respecto a la potencia eléctrica, los valores mínimos y máximos registrados se mantuvieron dentro de intervalos estrechos, con potencias promedio de 135,037 W, 135,012 W y 135,040 W para las luminarias L1, L2 y L3. Las diferencias observadas entre luminarias fueron reducidas y no representaron variaciones significativas en el desempeño general del sistema durante el modo nocturno base.

4.10.5 Comparación entre luminarias en modo nocturno reducido (00h00 hasta 03h59).

Durante el horario reducido, el sistema operó con el sistema de regulación de potencia mediante el dimmer y activación intermitente del sensor PIR. En la TABLA XV se presenta la comparación de los valores de voltaje, corriente y potencia registrados en las 3 luminarias durante este modo de operación.



TABLA XV

COMPARACIÓN ELÉCTRICA ENTRE LUMINARIAS EN MODO NOCTURNO REDUCIDO

Luminarias	Voltaje (Min/Max)	Corriente (Min/Max)	Potencia (Min/Max)	Potencia Promedio
L1	71,33 - 124,90	0,87 – 1,24	70,07 – 136,98	91,29
L2	72,14 – 125,50	0,86 – 1,25	70,48 - 136,94	91,33
L3	71,61 - 125,61	0,85 – 1,24	70,03 – 136,99	91.39

Los datos presentados en la Tabla XV muestran que, durante el modo nocturno reducido, las variables eléctricas presentaron una mayor variabilidad en comparación con el modo nocturno base, este comportamiento estuvo asociado a la regulación de potencia mediante el dimmer y la activación intermitente del sensor PIR, para tener un mejor control de la luminaria. En cuanto al voltaje, las tres luminarias registraron valores mínimos cercanos a 71,33 V, correspondientes al régimen de reducción de potencia, mientras que los valores máximos se aproximaron a 125,61 V, asociados a los instantes de incremento temporal de potencia ante detección de movimiento. Estos valores no implicaron una disminución de la tensión nominal de la red eléctrica, sino una reducción del valor eficaz (RMS) producto del recorte de la señal aplicada al driver LED. De manera similar, la corriente eléctrica alcanzó valores máximos cercanos a 1,25 A, coherentes con los instantes de mayor demanda asociados a la detección de movimiento.

En relación con la potencia eléctrica, se registraron valores mínimos comprendidos entre 91,29 W y 91,39 W, característicos del régimen de operación reducido, mientras que los valores máximos alcanzaron hasta 136,99 W. En cuanto a la potencia promedio, la Luminaria 3 presentó el valor más elevado 91,39 W, seguida por la Luminaria 2 con una potencia promedio de 91,33 W y la Luminaria 1 con valores de 91,29 W, las variaciones en la potencia promedio se asociaron al comportamiento del sistema de detección de movimiento en cada luminaria durante el periodo de operación.



4.10.6 Visualización y validación del sistema mediante Ubidots

Con el objetivo de respaldar el funcionamiento del sistema de monitoreo implementado, se empleó la plataforma Ubidots como servicio en la nube para la visualización y almacenamiento de las variables eléctricas del sistema de alumbrado público IoT.



Fig 74. Dashboard general del sistema en la plataforma Ubidots.

La Fig 74 presenta la vista general del panel de monitoreo en la plataforma Ubidots, donde se muestran las gráficas temporales de voltaje, corriente y potencia correspondientes a las tres luminarias durante el periodo de operación.

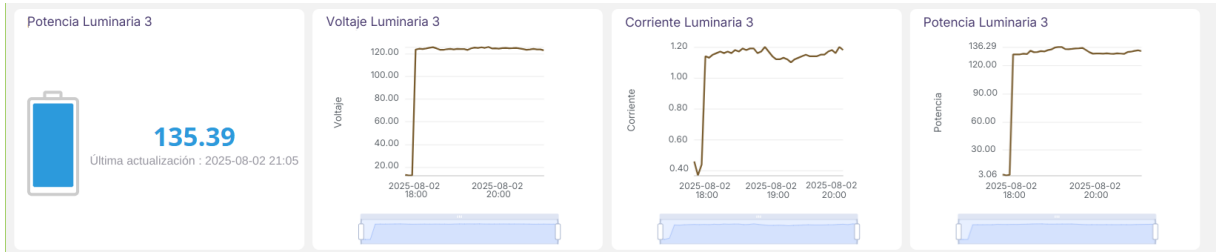


Fig 75. Registro temporal de voltaje, corriente y potencia de la Luminaria 3 durante operación nocturna.



En la Fig 75 se aprecia la evolución temporal de las variables eléctricas de la luminaria 3, donde el voltaje y la corriente se mantienen dentro de rangos estables, reflejándose directamente en un nivel de potencia uniforme durante el periodo de operación analizado. Esta coherencia entre las variables registradas permite observar un comportamiento estable del sistema bajo las condiciones de funcionamiento definidas.

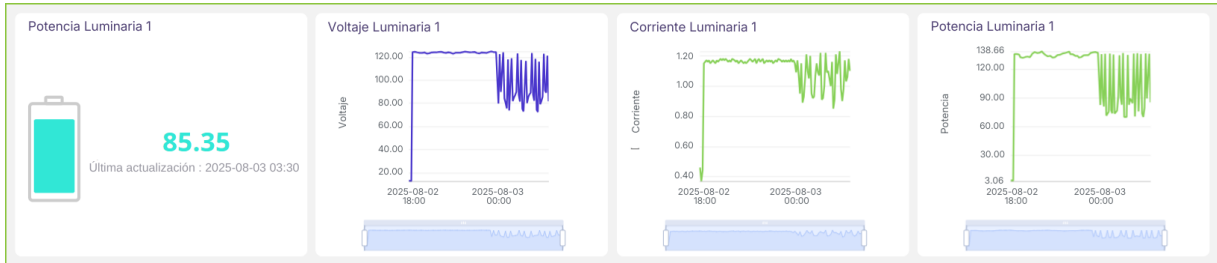


Fig 76. Comportamiento eléctrico de la luminaria ante la activación del sensor PIR durante el modo nocturno reducido.

La Fig 76 muestra el comportamiento de la luminaria 1 durante el modo nocturno reducido, cuando el sistema operó bajo la lógica de detección de movimiento mediante el sensor PIR, se observan reducciones periódicas en los niveles de voltaje y potencia correspondientes al estado de atenuación aplicado por el dimmer en ausencia de presencia. También, se identifican incrementos temporales de corriente y potencia asociados a la activación del sensor PIR, lo que evidencia la correcta respuesta del sistema al detectar tránsito en la zona.

El comportamiento observado permitió identificar que el sistema de control ajustó la potencia de la luminaria de acuerdo con la detección de movimiento en la zona, entre las 00:00 y las 03:59, el dimmer redujo el nivel de potencia en ausencia de tránsito, mientras que ante la activación del sensor PIR se registraron incrementos temporales de potencia, evidenciando la aplicación de la lógica de control definida para el modo nocturno reducido.

4.10.7 Verificación del funcionamiento mediante eventos

Con respecto a la gestión de alertas del sistema, se configuraron eventos condicionales en la plataforma Ubidots con el fin de detectar posibles condiciones anómalas en el funcionamiento de las luminarias, tales como valores de potencia fuera de los rangos establecidos o ausencia de consumo durante periodos programados de operación.



Durante las pruebas de funcionamiento del prototipo en condiciones normales de operación, no se registró la activación de alertas. Este comportamiento indica que la luminaria operó dentro de los rangos de potencia establecidos y cumplió correctamente con la lógica de control programada. La ausencia de alertas durante el periodo de prueba valida el correcto desempeño del sistema bajo condiciones normales.

4.10.8 Interpretación de resultados

Los resultados obtenidos evidenciaron que el sistema de alumbrado público basado en tecnología IoT operó conforme a los modos de funcionamiento definidos durante el periodo de evaluación. La regulación de la luminaria mediante el dimmer y la activación del sensor PIR permitieron verificar la correcta respuesta del sistema ante las condiciones de iluminación y detección de movimiento establecidas. La comparación entre luminarias mostró un comportamiento eléctrico homogéneo, con variaciones menores atribuibles a diferencias propias de instalación y condiciones de operación. Asimismo, la visualización de los datos en la plataforma Ubidots permitió validar la transmisión continua de la información y la coherencia entre las variables eléctricas registradas. En conjunto, los resultados confirmaron la estabilidad y correcto funcionamiento del sistema durante el periodo de monitoreo.

4.11 Análisis energético y factibilidad del sistema IoT

En esta sección se presentó la evaluación energética del sistema IoT, incorporando el consumo adicional de sus componentes, para comparar el consumo total con IoT frente al escenario sin IoT. Con ello se determinó la eficiencia energética y se discutió la factibilidad de implementación bajo las condiciones de operación medidas.

4.11.1 Consumo energético del sistema IoT.

El cálculo numérico se realizó en Excel implementando las ecuaciones 5, 6 y 7 del modelo propuesto. Con ello se obtuvo la energía acumulada por tramo horario durante 8 noches y su estimación mensual para agosto, resultados que se reportan en la TABLA XVI.

TABLA XVI. Consumo energético del sistema IoT de 8 días.

Tramo horario	kWh medidos (8 noches)	kWh agosto (KWh*31/8)
18h00 hasta 23h59	7,29	28,25
00h00 hasta 03h59	3,17	12,31



04h00 hasta 05h59	2,16	8,37
Total	12,37	47,95

El mayor consumo se concentra en el tramo 18h00–23h59 debido a que la luminaria opera más horas en ese periodo. El consumo total medido en 8 noches fue 12,37 kWh, estimándose 47,95 kWh para agosto.

4.11.2 Consumo Total del sistema IoT con los componentes electrónicos

El consumo mensual total del escenario con internet de las cosas se obtuvo sumando el consumo mensual estimado de la luminaria con control IoT TABLA XVI y el consumo adicional de la electrónica del sistema TABLA X. Así, el consumo total se calculó de acuerdo con la ecuación 8:

$$E_{Total_IoT} = 47,95 + 2.522 = 50,472 \text{ kWh}$$

Con ello, el consumo total del escenario con IoT fue de 50,472 kWh/mes, resultado de sumar el consumo mensual de la luminaria y el consumo adicional de los componentes.

4.11.3 Consumo del sistema sin IoT

El consumo mensual del escenario sin IoT se calculó utilizando la ecuación 9 considerando una luminaria operando a potencia fija durante el periodo nocturno, sin estrategia de atenuación. El consumo se determinó con la potencia nominal de 150 W y el tiempo total de operación mensual de 360 horas.

$$E_{sinIoT} = \frac{150}{1000} \times 360 = 54,0 \text{ kWh/mensual}$$

Se obtuvo un consumo de 54,0 kWh/mes para el escenario sin IoT. Este valor se utilizó como punto de referencia para comparar el consumo total del escenario con IoT y calcular la eficiencia energética del sistema implementado.

4.11.4 Eficiencia energética: Comparación con sistema sin IoT.

En esta sección se evaluó la eficiencia energética del sistema IoT, el cual incluyó el consumo de la luminaria y el consumo adicional de los componentes electrónicos comparando el consumo mensual del escenario sin IoT. La eficiencia se expresó como el porcentaje de reducción de consumo respecto al escenario sin IoT.



$$n(\%) = \frac{55,8 - 50,472}{55,8} \times 100 = 9,54\%$$

La eficiencia energética obtenida fue de 9,54%, lo que representó una reducción neta del consumo mensual respecto al escenario sin IoT. Este resultado se explicó por la atenuación aplicada por el dimmer durante periodos sin presencia y el incremento temporal de potencia únicamente cuando el sensor PIR detectó movimiento. En consecuencia, el sistema redujo el consumo en horas de baja actividad manteniendo la iluminación cuando existió tránsito.

4.11.5 Discusión de factibilidad del sistema IoT.

La implementación del control IoT resultó factible desde el punto de vista energético, ya que aun incorporando el consumo adicional de los componentes electrónicos con un valor de 2,52 kWh/mes, el consumo total con IoT es 50,472 kWh/mes fue menor que el escenario sin IoT, obteniéndose una eficiencia de 9,54%. Sin embargo, el desempeño depende del patrón de tránsito: a mayor presencia, menor tiempo en atenuación y, por tanto, menor ahorro. En consecuencia, la estrategia es más conveniente en zonas de baja o media circulación, donde el dimmer permanece más tiempo en niveles reducidos.

4.12 Conclusiones:

- Se describieron las principales tecnologías IoT aplicables al alumbrado público, comparando su aporte para monitoreo y supervisión (captura de variables, comunicación y visualización en plataformas). Esta revisión permitió justificar la arquitectura seleccionada para el prototipo, enfocada en la transmisión de datos hacia la nube y la gestión remota del sistema.
- Se determinaron los parámetros técnicos para el diseño del alumbrado público del sector de La Victoria conforme a la Regulación ARCERNR-007/23, estableciendo las clases de alumbrado M4 (calzada), P2 (aceras/ciclovia) y C4 (zona de conflicto). Con base en estas clases se definieron los criterios fotométricos de verificación (luminancia/iluminancia, uniformidades, deslumbramiento TI y relación de alrededores), los cuales fueron evaluados mediante simulación en DIALux y contrastados con la normativa.



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
CARRERA DE ELECTRICIDAD



Adicionalmente, se dejaron definidos los parámetros eléctricos de operación asociados al diseño y supervisión del sistema: potencia nominal de la luminaria propuesta 150 W, control de potencia mediante dimmer atenuación programada y recuperación por detección de presencia y el monitoreo de voltaje, corriente y potencia, asegurando un diseño técnicamente sustentado y verificable.

- Se desarrolló e implementó un prototipo funcional de control y supervisión de alumbrado público mediante IoT, conformado por un esquema de adquisición de datos, comunicación inalámbrica LoRa y un nodo central (gateway) basado en Raspberry Pi para el procesamiento de información. El sistema permitió el monitoreo remoto de variables eléctricas (voltaje, corriente, potencia) en la plataforma Ubidots mediante MQTT, con visualización en tiempo real, históricos y generación de alertas ante eventos no esperados.

4.13 Recomendaciones:

Se recomendó, como trabajo futuro, ampliar la validación del sistema IoT implementado adquisición de datos, comunicación LoRa, gateway y visualización en Ubidots, realizando pruebas por más tiempo en condiciones reales; extender la evaluación energética y fotométrica realizada con mediciones durante más días y en diferentes condiciones, para verificar el cumplimiento continuo de la Regulación ARCERNNR-007/23; y probar el sistema en un mayor número de luminarias y en otros sectores urbanos, incorporando eventos y alertas más completas para detectar fallos, desconexiones o comportamientos anómalos, con el fin de sustentar su implementación a mayor escala.



Bibliografía:

- [1] M. H. Kabir, A. Al Noman, A. Al Afiq, R. H. Raju, M. N. Hasan, and Ahmad, "Design and Implement IoT-Based Intelligent Manageable Smart Street Lighting Systems for Future Smart City", *Engineering Proceedings*, vol. 56, no. 1, doi: 10.3390/ASEC2023-15535.
- [2] F. Outferdine, K. Cherifi, D. Belkhiri, B. Bouachrine, and M. Ajaamoum, "Implementation of a low-cost intelligent street light system using internet of things," *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, Article vol. 33, no. 3, pp. 1387-1396, 2024, doi: 10.11591/ijeecs.v33.i3. pp1387-1396.
- [3] E. Y. P. Gonzalez, "DISEÑO DE PROTOTIPO FUNCIONAL DE ALUMBRADO PÚBLICO BASADO EN TECNOLOGÍAS IOT PARA LA CIUDAD DE BUCARAMANGA," FACULTAD DE INGENIERÍA PROGRAMA DE INGENIERÍA DE SISTEMAS UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BUCARAMANGA 2020. [Online]. Available: https://repository.unab.edu.co/bitstream/handle/20.500.12749/12733/2020_Tesis_Edier_Yasser_Perea_Gonzalez.pdf?sequence=1
- [4] I. Z. Biundini *et al.*, "LoRaCELL-Driven IoT Smart Lighting Systems: Sustainability in Urban Infrastructure," *Sensors*, Article vol. 24, no. 2, 2024, Art no. 574, doi: 10.3390/s24020574.
- [5] M. Dwiyaniti and K. M. Nitisasmita, "Energy Efficiency on Smart Street Lighting Using Raspberry Pi Based on Scada and Internet of Things (IoT)," in *Journal of Physics: Conference Series*, 2019, vol. 1364, 1 ed., doi: 10.1088/1742-6596/1364/1/012034. [Online]. Available: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85078292908&doi=10.1088%2f1742-6596%2f1364%2f1%2f012034&partnerID=40&md5=b77f4af570239c61de1da6c2266b9db3>



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
 Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
CARRERA DE ELECTRICIDAD



- [6] K. M. Dange, "A comprehensive review on IoT based smart cities," *Sustainable Engineering and Innovation*, Article vol. 5, no. 1, pp. 48-57, 2023, doi: 10.37868/sei.v5i1.id188.
- [7] S. Deepaisarn, P. Yiwsiw, C. Tantiwattanapaibul, S. Buaruk, and V. Sornlertlamvanich, "Data-centric Smart Street Light Monitoring and Visualization Platform for Campus Management," *Journal of Information and Communication Convergence Engineering*, Article vol. 21, no. 3, pp. 216-224, 2023, doi: 10.56977/jicce.2023.21.3.216.
- [8] K. A. p. Druckmesstechnik. "Tecnología LoRa y LoRaWAN." <https://www.catsensors.com/es/lorawan/tecnologia-lora-y-lorawan> (accessed 3 de julio, 2024).
- [9] E. Lee, «10 claves para comprender la contribución de LoRa en los sistemas de iluminación inteligente,» *Generación IoT*, 12 marzo 2024. [En línea]. Available: <https://internetdelas cosas.xyz/articulo.php?id=5137>. [Último acceso: 4 de Julio, 2026].
- [10] A. Vaghef-Koodehi and B. H. Lapizco-Encinas, "Switching Separation Migration Order by Switching Electrokinetic Regime in Electrokinetic Microsystems," *Biosensors*, Article vol. 14, no. 3, 2024, Art no. 119, doi: 10.3390/bios14030119.
- [11] H. Zhong, S. Wang, Z. Wang, and J. Jiang, "Asymmetric self-powered cellulose-based aerogel for moisture-electricity generation and humidity sensing," *Chemical Engineering Journal*, Article vol. 486, 2024, Art no. 150203, doi: 10.1016/j.cej.2024.150203.
- [12] admin, "Retos de protección para las Smart City," *TMT News*, oct. 23, 2023. [En línea]. Disponible: <https://tmt-news.com/retos-de-proteccion-para-las-smart-city/> [Accedido: 10-feb-2026].
- [13] K. Altayib and I. Dincer, "Development of an integrated hydropower system with hydrogen and methanol production," *Energy*, vol. 240, p. 122780, 2022/02/01/ 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.122780>.
- [14] V. Electrónica, "Qué es ZigBee, cómo funciona y características principales," 3 de diciembre



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
 Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
CARRERA DE ELECTRICIDAD



- [15] M. Á. Ramos, “Schröder, conectividad en la Smart City a través del alumbrado público,” Comité Español de Iluminación (CEI), Apr. 15, 2020. [Online]. Available: <https://ceisp.com/articulo-lucescei/articulo-schreder-conectividad-en-la-smart-city-a-traves-del-alumbrado-publico-2/>. [Accessed: 7 de julio, 2024].
- [16] F. Sánchez Sutil and A. Cano-Ortega, "Smart public lighting control and measurement system using lora network," *Electronics (Switzerland)*, Article vol. 9, no. 1, 2020, Art no. 124, doi: 10.3390/electronics9010124.
- [17] H. Xie, Z. Zhang, J. Zhang, Z. Lei, Y. Li, L. Li, M. Tian y J. Song, “Energy-saving control system for public lighting,” *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 3074, no. 1, Art. no. 012028, 2025, doi: 10.1088/1742-6596/3074/1/012028.
- [18] L. del Valle Hernández, “SCT-013 mide el consumo eléctrico en tu casa con Arduino,” Programar Fácil, 2016. [En línea]. Disponible en: <https://programarfacil.com/blog/arduino-blog/sct-013-consumo-electrico-arduino/>. [Accedido: 8-ago-2024].
- [19] L. Llamas, “Sensor de corriente eléctrica no invasivo con Arduino y SCT-013,” Luis Llamas – Tutorials Arduino. [Online]. Available: <https://www.luisllamas.es/sensor-corriente-sct-013-arduino/>. Accessed: 10-ago. 2024.
- [20] Surbyte, “Programación medidor de consumo,” Arduino Forum, Jul. 2018. [Online]. Available: <https://forum.arduino.cc/t/programacion-medidor-de-consumo/538984/2> Accessed: 16-ago. 2024.
- [21] Sensor de voltaje AC ZMPT101B, [en línea] disponible: <https://naylampmechatronics.com/sensores-corriente-voltaje/393-transformador-de-voltaje-ac-zmpt101b.html>, consultada en 24 en septiembre de 2024.
- [22] D. F. Cevallos Troya, “Desarrollo de un sistema IoT para el monitoreo del consumo eléctrico de los dispositivos electrónicos domésticos de mayor consumo”, Trabajo de titulación, Universidad Tecnológica Israel, Quito, Ecuador, 2020. [En línea]. Disponible en: <http://repositorio.uisrael.edu.ec/handle/47000/2605>. Consultada en 25 en septiembre de 2024.



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
 Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
CARRERA DE ELECTRICIDAD



- [23] TVILIGHT, “Sensor de movimiento de alumbrado público inteligente,”
 TVILIGHT, s. f. [En línea]. Disponible en: <https://tvilight.com/es/productos/sensor-de-movimiento-de-luz-de-calle/>. [Accedido: 09-feb-2026].
- [24] Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE), “Guía técnica sobre tecnologías aplicadas al alumbrado público inteligente,” IDAE, Madrid, España, 2019.
 [En línea]. Disponible en: https://www.idae.es/sites/default/files/documentos/idae/tecnologias/ahorro_y_eficiencia_energetica/alumbrado_exterior/Guia_Tecnica_Smart_City-desde-alumbrado-exterior.pdf
- [25] Panox Display, “¿Cuáles son las diferencias clave entre Arduino y Raspberry Pi?,”
 Panox Display, 6 agosto 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.panoxdisplay.com/es/knowledge/key-differences-arduino-raspberry-pi.html#:~:text=Arduino%20y%20Raspberry%20Pi%20desempe%C3%B1an,sistemas%20operativos%20y%20aplicaciones%20complejas>. [Accedido: 09-feb-2026].
- [26] ASSURED Systems, “¿Qué son los controladores IoT?,” *ASSURED Systems*, [En línea].
 Disponible en: <https://www.assured-systems.com/es/faq/what-are-iot-controllers/#:~:text=Los%20controladores%20IoT%20tambi%C3%A9n%20pueden,evaluaci%C3%B3n%20de%20esta%20tecnolog%C3%ADa%20transformadora>.
 (accedido: 09-feb-2026).
- L. Sánchez, I. EliceGUI, J. Cuesta, L. Muñoz, and J. Lanza, "Integration of utilities infrastructures In a future internet enabled smart city framework," *Sensors (Switzerland)*, Article vol. 13, no. 11, pp. 14438-14465, 2013, doi: 10.3390/s131114438.
- [27] F. Fernando Martínez * "Red de sensores inalámbricos para la supervisión y control en tiempo real de fallas luminarias del alumbrado público.," vol. 2024, no. 17 de julio del 2024,



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
 Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
CARRERA DE ELECTRICIDAD



- [28] P. Catania, “¿Cómo empezar con Raspberry Pi? Kits y configuraciones,” *ADSLZone*, 1 octubre 2021. [En línea]. Disponible en: <https://adslzone.net/noticias/productos/kits-configuraciones-raspberry-pi-empezar/>. [Accedido: 09-feb-2026].
- [29] S. Kadam, C. Manani, P. Gandhi, S. Gade y C. Bansode, “Smart Street Light System Using Raspberry Pi,” *Proceedings of the 4th International Conference on Advances in Science & Technology (ICAST2021)*, May 7, 2021. [En línea]. Disponible en: <https://ssrn.com/abstract=3871011>. [Accedido: 09-feb-2026].
- [30] R. R. Vignesh et al., “Automatic Street Light Control and Fault Detection System,” *International Journal of Advanced Research in Science, Communication and Technology*, 2024. [En línea]. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/391473139_Automatic_Street_Light_Control_and_Fault_Detection_System. [Accedido: 09-feb-2026].
- [31] The Engineering Projects, “Introduction to Arduino Nano,” *TheEngineeringProjects.com*, 25-Jun-2018. [En línea]. Disponible en: <https://www.theengineeringprojects.com/2018/06/introduction-to-arduino-nano.html>. [Accedido: 09-feb-2026].
- [32] P. Chiradeja and S. Yoomak, "Development of public lighting system with smart lighting control systems and internet of thing (IoT) technologies for smart city," *Energy Reports*, vol. 10, pp. 3355-3372, 2023/11/01/ 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.egy.2023.10.027>. [Accedido: 09-feb-2026].
- [33] Steren, “Sensor de movimiento (PIR) ARD-315,” *Steren Ecuador*. [En línea]. Disponible en: <https://steren.com.ec/sensor-de-movimiento-pir.html>. [Accedido: 11-feb-2026].
- [34] C. A. Cheng *et al.*, "A single-stage high power factor power supply for providing an led street-light lamp featuring soft-switching and bluetooth wireless dimming capability," *Energies*, Article vol. 14, no. 2, 2021, Art no. 477, doi: 10.3390/en14020477. https://issuu.com/vnaldas/docs/revista_analisis_del_sector_la_victoria



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
 Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
CARRERA DE ELECTRICIDAD



- [35] Anonimo, “Control de velocidad retroalimentado para motor universal AC con Arduino,” Arduino Forum, dic. 2023. [En línea]. Disponible en: <https://forum.arduino.cc/t/control-de-velocidad-retroalimentado-para-motor-universal-ac-con-arduino/1192810/4>. [Accedido: 11-feb-2026].
- [36] A. Botta, W. de Donato, V. Persico, and A. Pescapé, “Integration of Cloud Computing and Internet of Things: A Survey,” *Future Generation Computer Systems*, vol. 56, pp. 684–700, Mar. 2016. doi: 10.1016/j.future.2015.09.021.
- [37] L. Da Xu, W. He, and S. Li, “Internet of Things in Industries: A Survey,” *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 10, no. 4, pp. 2233–2243, Nov. 2014. doi: 10.1109/TII.2014.2300753.
- [38] Agencia de Regulación y Control de Energía y Recursos Naturales No Renovables (ARCERNNR), “Regulación Nro. ARCERNNR-007/23”, sesión de Directorio, 22-jun-2023. [En línea]. Disponible en: https://arconel.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2024/07/Regulacion-Nro.-ARCERNNR-007_23.pdf. [Accedido: 11-jul-2024].
- [39] Sylvania, “ORION LED 150W 5000K (P25215) – Ficha técnica,” hoja de datos, s. f. [En línea]. Disponible en: <https://sylvania.com.ec/wp-content/uploads/2023/12/P25215-ORION-LED-150W-5000K.pdf>. [Accedido: 11-jul-2024].



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
 Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
CARRERA DE ELECTRICIDAD



Anexo A

TABLA A. I

PARAMETROS PARA LA SELECCIÓN DE LA CLASE DE ALUMBRADO TIPO (M)

Parámetros	Opciones	Valor de ponderación (V_{pM})	V_{pM} seleccionado
Velocidad	Muy alta, $v \geq 100$ [km/h]	1	
	Alta, $70 < v < 100$ [km/h]	0.5	
	Moderada, $40 < v \leq 70$ [km/h]	0	0
Volumen de tráfico	Muy alto	1	1
	Alto	0.5	
	Moderado	0	
	Bajo	-0.5	
	Muy bajo	-1	
Composición de tráfico	Mezcla con un alto porcentaje de tráfico no motorizado	2	
	Mezclado	1	1
	Solamente motorizado	0	
	No	1	



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
 Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
CARRERA DE ELECTRICIDAD



Separación de vías	Sí	0	0
Densidad de la intersección	Alta	1	
	Moderada	0	0
Vehículo parqueado	Se permite	0.5	0.5
	No se permite	0	
Iluminación ambiental	Alta	1	
	Moderadas	0	0
	Baja	-1	
Guías visuales	Pobre	0.5	
	Moderada o bueno	0	0
Sumatoria de las ponderaciones			2.5

TABLA A. II
PARAMETROS PARA LA SELECCIÓN DE LA CLASE DE ALUMBRADO TIPO (P)

Parámetros	Opciones	Valor de ponderación (V_{pp})	V_{pp} seleccionado
Velocidad de desplazamiento	Baja, $6 < v \leq 40$ [km/h]	1	1
	Muy baja, velocidad de caminar $v \leq 6$ [km/h]	0	
Volumen de tráfico	Muy alto, tránsito superior a 480 peatones y/o ciclistas por hora	1	1
	Alto, tránsito entre 300 y 480 peatones y/o ciclistas por hora	0.5	
	Moderado, tránsito entre 121 y 299 peatones y/o ciclistas por hora	0	
	Bajo, tránsito entre 60 y 120 peatones y/o ciclistas por hora	-0.5	



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
 Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
CARRERA DE ELECTRICIDAD



	Muy bajo, tránsito entre 60 peatones y/o ciclistas por hora	-1	
	Mezcla entre peatones, ciclistas y tránsito motorizado	2	2
Composición de tráfico	Mezclado entre peatones y tránsito motorizado	1	
	Mezclado entre peatones y ciclistas	1	
	Solamente peatones	0	
	Solamente ciclistas	0	
	No presentes	0	
	Moderados	0	
Vehículo parqueado	Se permite	0.5	0.5
	No se permite	0	
Iluminación ambiental	Alta	1	
	Moderadas	0	0
	Baja	-1	
	Sumatoria de las ponderaciones		4.5

TABLA A. III
PARAMETROS PARA LA SELECCIÓN DE LA CLASE DE ALUMBRADO TIPO C.

Parámetros	Opciones	Valor de ponderación	V_{pM} seleccionado
		(V_{pM})	
Velocidad	Muy alta, $v \geq 100$ [km/h]	3	
	Alta, $70 < v < 100$ [km/h]	2	
	Moderada, $40 < v \leq 70$ [km/h]	1	0
	Baja, $v \leq 40$ [km/h]	0	
Volumen de tráfico	Muy alto	1	1
	Alto	0.5	
	Moderado	0	



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
 Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
CARRERA DE ELECTRICIDAD



	Bajo	-0.5	
	Muy bajo	-1	
Composición de tráfico	Mezcla con un alto porcentaje de tráfico no motorizado	2	
	Mezclado	1	1
	Solamente motorizado	0	
Separación de vías	No	1	
	Sí	0	0
Iluminación ambiental	Alta	1	
	Moderadas	0	0
	Baja	-1	
Guías visuales	Pobre	0.5	
	Moderada o bueno	0	0
	Sumatoria de las ponderaciones		2

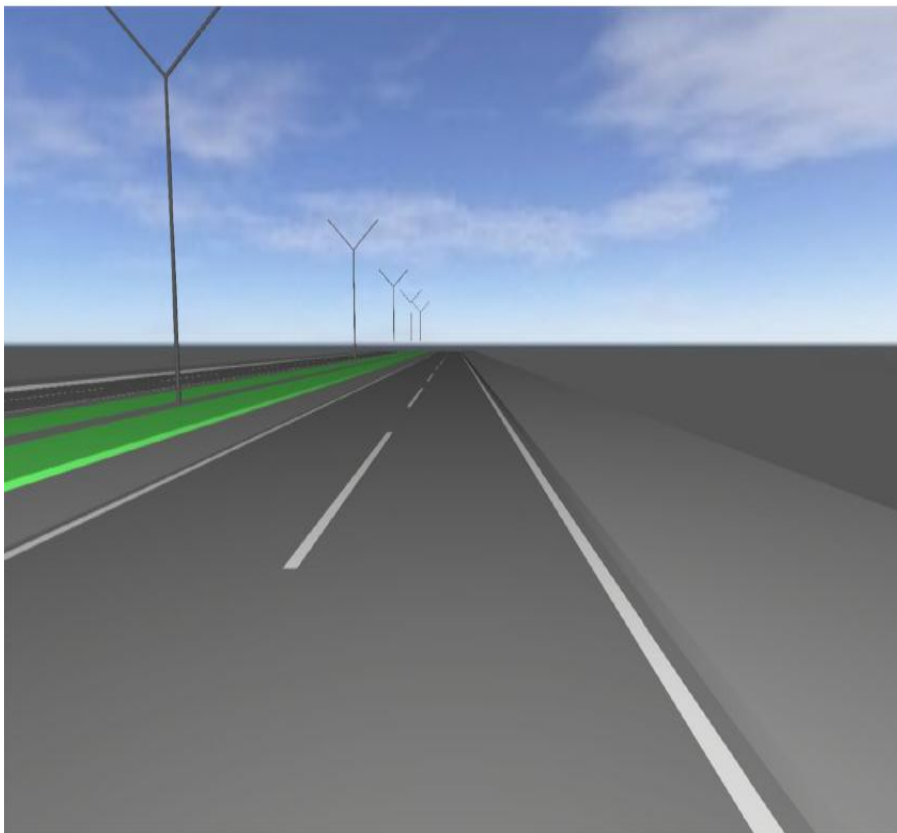


Anexo B

Informe técnico de simulación luminotécnica del tramo vial.

Fecha 4/12/2024

DIALux



Proyecto

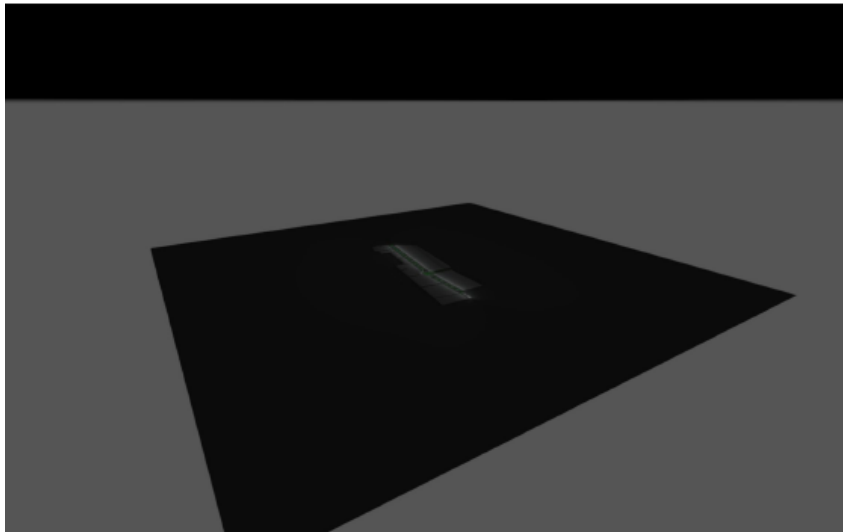


Anexo C

Informe completo de simulación luminotécnica de la avenida Padre Aurelio Espinosa Polit.

Fecha 2/12/2024

DIALux

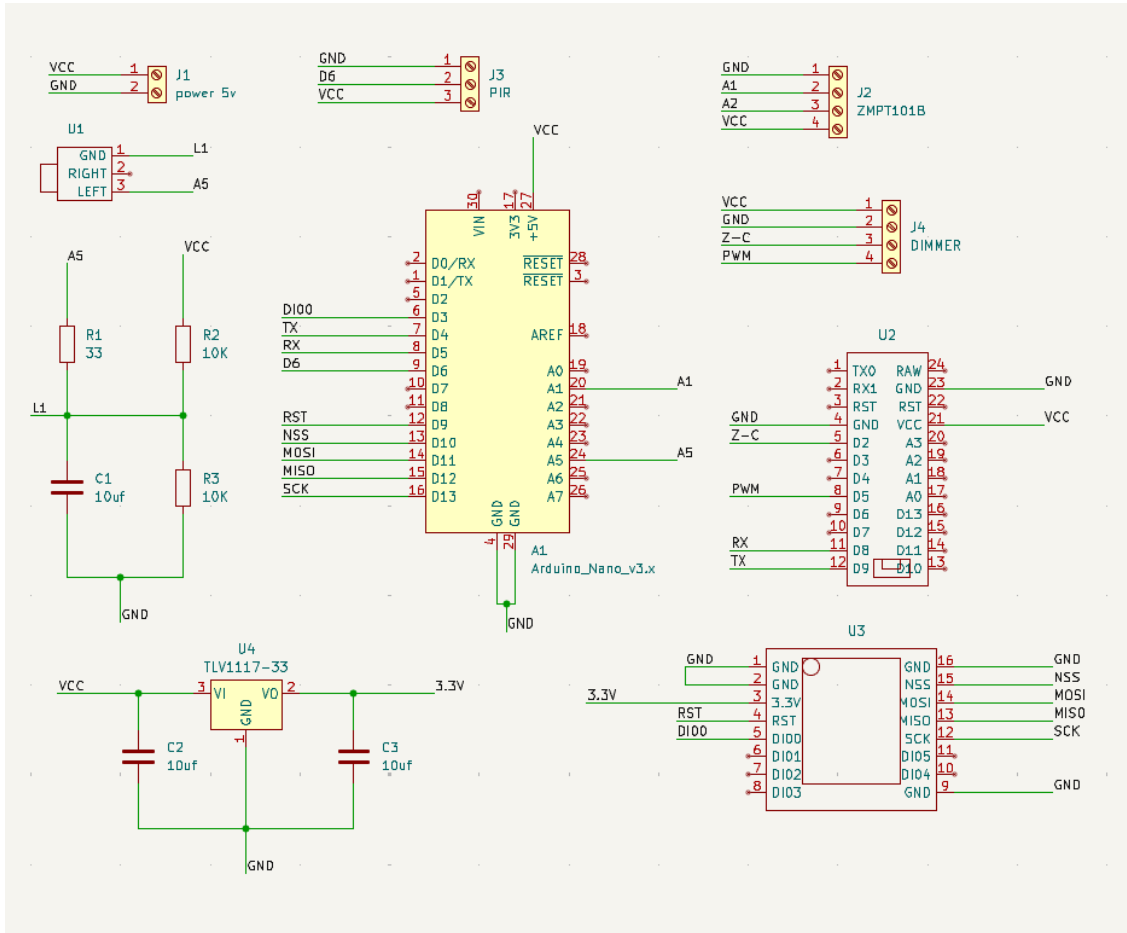


Proyecto



Anexo D

Esquema electrónico completo de control del sistema IoT de alumbrado público en el programa de KiCad.



Anexo E

Código de calibración y adquisición de datos de corriente (Arduino Nano)

```
#include "EmonLib.h"           // Incluir la librería EmonLib
EnergyMonitor emon1;         // Crear una instancia del monitor de energía

void setup()
```

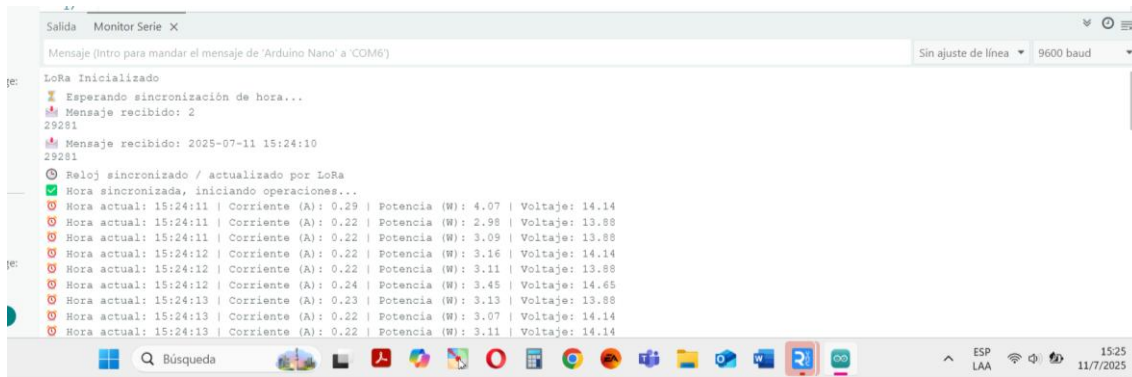


```
{
Serial.begin(9600);           // Inicializar la comunicación serial a 9600 baudios

emon1.current(1, 65.4);      // Configuración de corriente: pin de entrada y constante de
calibración
}
void loop()
{
double Irms = emon1.calcIrms(1480); // Calcular únicamente la corriente eficaz (RMS)
Serial.print(Irms * 230.0);   // Cálculo y envío de la potencia aparente (VA)
Serial.print(" ");
Serial.println(Irms);        // Envío del valor de corriente RMS (A)
}
}
```

Anexo F

Lectura de corriente obtenida desde el monitor serial de Arduino para la calibración del sensor.



Anexo G

Código de calibración y adquisición de datos de voltaje (Arduino Nano)

```
#include <ZMPT101B.h>
#define SENSITIVITY 571.89f // Constante de sensibilidad calibrada
ZMPT101B voltageSensor(A1, 60.0); // Pin analógico A1 y frecuencia de red (60 Hz)
```



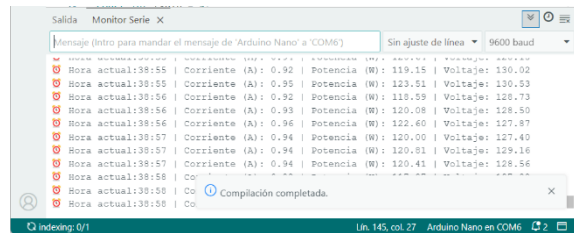
```
void setup() {
    Serial.begin(9600);

    // Configuración de la sensibilidad del sensor de voltaje
    voltageSensor.setSensitivity(SENSITIVITY);
}

void loop() {
    // Lectura del voltaje eficaz (RMS)
    float voltaje_rms = voltageSensor.getRmsVoltage();
    // Envío del voltaje para comparación con instrumento patrón
    Serial.println(voltaje_rms);
}
```

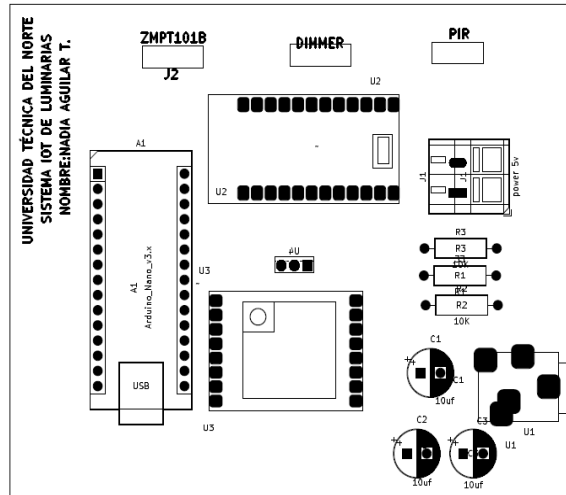
Anexo H

Lectura de voltaje obtenida desde el monitor serial de Arduino para la calibración del sensor.

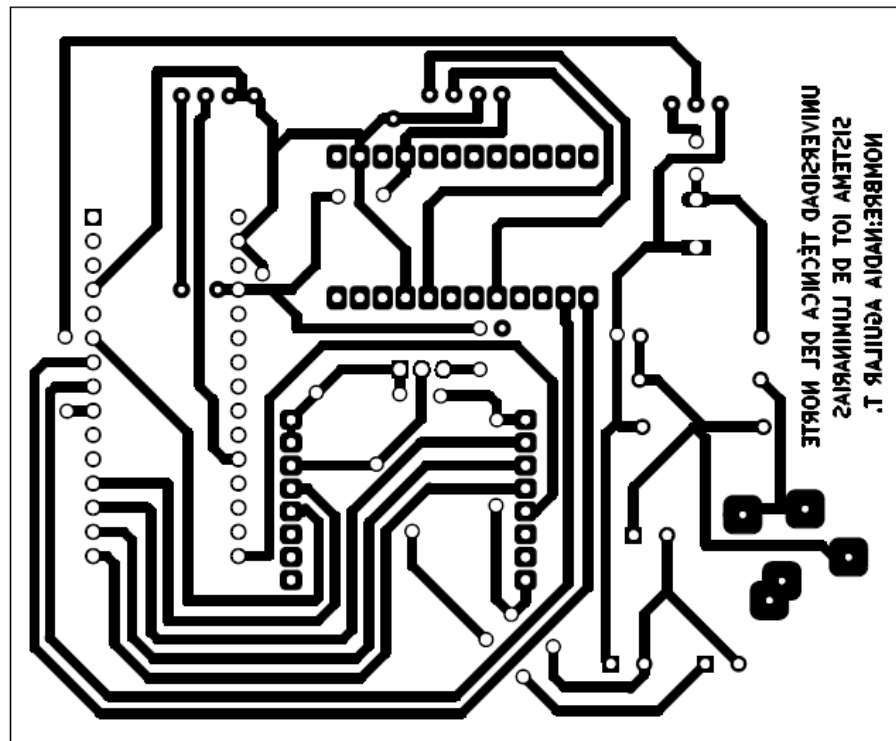


Anexo I

Mascara de la PCB del módulo de control y monitoreo.

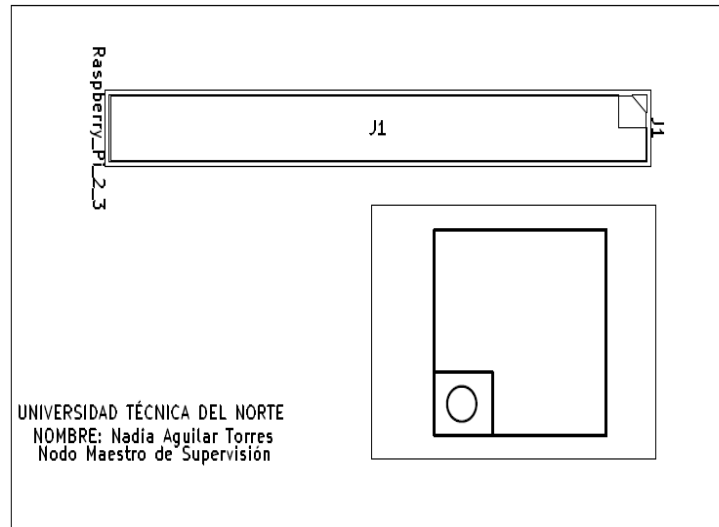


Pista de la PCB del módulo de control y monitoreo.

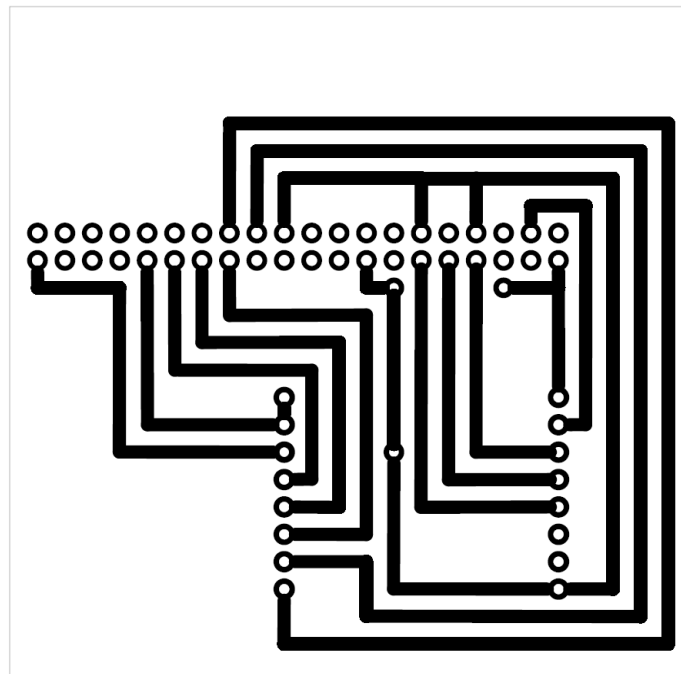


Anexo J

Mascara de la PCB del módulo de control y monitoreo.

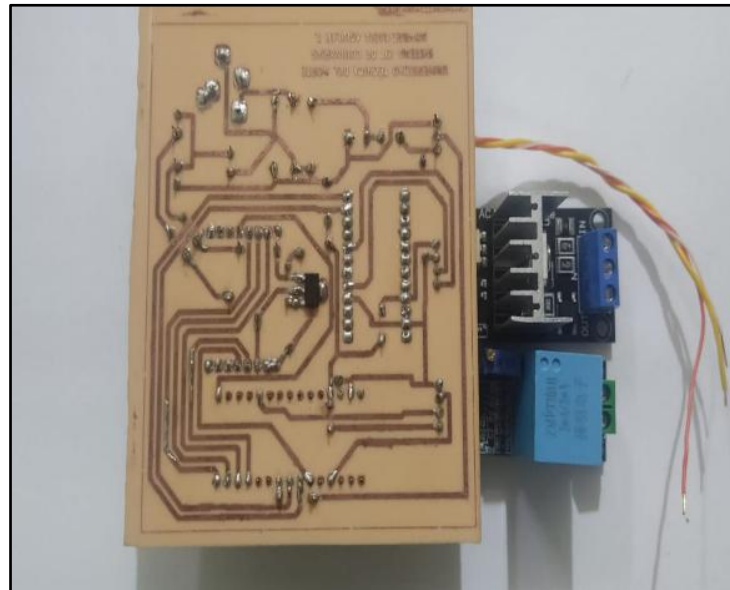


Pista de la PCB del módulo de control y monitoreo.



Anexo K

Pista con los componentes eléctricos soldados.



Anexo L

Código del módulo de control y de monitoreo

```
#include <SPI.h>
#include <LoRa.h>
#include <EmonLib.h>
#include <SoftwareSerial.h>
#include <ZMPT101B.h>

#define PIN_TO_SENSOR 6
#define LED_PIN 7 // Por ejemplo, pin 7 para el LED

int motion_state = LOW; // Estado actual del sensor
int prev_motion_state = LOW; // Estado anterior

#define SENSITIVITY 78.75f
ZMPT101B voltageSensor(A1, 60.0);
```



```
// Define los pines para SoftwareSerial
const int rxPin = 4; // No se usa si solo transmite
const int txPin = 5; // Pin para enviar datos

SoftwareSerial miSerial(rxPin, txPin); // RX, TX

EnergyMonitor emon1;
//CONTANTE TENSION
const float tension_nominal = 0;

//LORA SETTINGS
#define SS 10 // Pin NSS
#define RST 9 // Pin RESET
#define DIO0 3 // Pin DIO0

int contador = 0;

// Variables para control del tiempo con millis()
unsigned long ledOnTime = 0;
const unsigned long ledDuration = 10000; // 30 segundos
bool ledEncendido = false;

void setup() {
  miSerial.begin(9600);
  pinMode(PIN_TO_SENSOR, INPUT); // Pin del sensor como entrada
  pinMode(LED_PIN, OUTPUT); // Pin LED como salida
  digitalWrite(LED_PIN, LOW); // LED apagado al inicio
```



```

voltageSensor.setSensitivity(SENSITIVITY);
emon1.current(5, 174);
Serial.begin(9600); // Comunicación serie
while (!Serial);

pinMode(DIO0, INPUT);
LoRa.setPins(SS, RST, DIO0);

if (!LoRa.begin(433E6)) {
  Serial.println("LoRa no disponible");
  while (1);
}

Serial.println("LoRa Inicializado");
}

void loop() {
  prev_motion_state = motion_state;
  motion_state = digitalRead(PIN_TO_SENSOR);
  //SENSADO MOVIMIENTO
  if (prev_motion_state == LOW && motion_state == HIGH) {
    Serial.println("Motion detected!");
    miSerial.println("90");

    // Enciende LED y guarda tiempo
    digitalWrite(LED_PIN, HIGH);
    ledEncendido = true;
    ledOnTime = millis();
  }
}

```



```

// Enviar mensaje LoRa de detección
LoRa.beginPacket();
LoRa.print("Movimiento detectado!");
LoRa.endPacket();
}

// Apaga LED después de 30 segundos sin bloqueo
if (ledEncendido && (millis() - ledOnTime >= ledDuration)) {
  digitalWrite(LED_PIN, LOW);
  ledEncendido = false;

  Serial.println("LED apagado después de 30 segundos");
  miSerial.println("15"); // Opcional: mensaje de apagado al serial
}

double Irms = emon1.calcIrms(1480); // Mide la corriente RMS
float tension_nominal = voltageSensor.getRmsVoltage();
double potencia = tension_nominal * Irms; // Potencia estimada en vatios (W)

Serial.print("Corriente (A): ");
Serial.print(Irms, 2);
Serial.print(" | Potencia (W): ");
Serial.println(potencia, 2);

Serial.print("Enviando mensaje #");
Serial.println(contador);

```



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
CARRERA DE ELECTRICIDAD



```
LoRa.beginPacket();  
LoRa.print("Corriente (A): ");  
LoRa.print(Irms, 2);  
LoRa.print(" | Potencia (W): ");  
LoRa.print(potencia, 2);  
LoRa.print(" Voltage AC: ");  
LoRa.print(tension_nominal);  
LoRa.endPacket();  
  
contador++; // Incrementa el contador  
  
delay(1000); // Espera 1 segundo antes del siguiente mensaje  
}
```



Anexo M

Código del Arduino Pro-Micro

```
#include <RBDdimmer.h>
#include <SoftwareSerial.h>

// Pines para el dimmer
#define USE_SERIAL Serial
#define outputPin 5
#define zerocross 2

// Pines para SoftwareSerial
const int rxPin = 8; // Pin donde llega el dato
const int txPin = 9; // No se usa
SoftwareSerial softSerial(rxPin, txPin); // RX, TX (solo RX en este caso)

dimmerLamp dimmer(outputPin); // Inicializa dimmer
int outVal = 0;

void setup() {
  USE_SERIAL.begin(9600); // Solo para monitoreo
  softSerial.begin(9600); // Comunicación serial alternativa

  dimmer.begin(NORMAL_MODE, ON); // Inicializa el dimmer

  USE_SERIAL.println("Esperando valores por SoftwareSerial...");
}

void printSpace(int val) {
```



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
 Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
CARRERA DE ELECTRICIDAD



```

if ((val / 100) == 0) USE_SERIAL.print(" ");
if ((val / 10) == 0) USE_SERIAL.print(" ");
}

void loop() {
  int preVal = outVal;

  // Recibe valores desde SoftwareSerial
  if (softSerial.available()) {
    int buf = softSerial.parseInt();
    if (buf > 0 && buf <= 100) { // Validamos que esté en el rango
      outVal = buf;
      dimmer.setPower(outVal);

      USE_SERIAL.print("Valor recibido por SoftSerial: ");
      printSpace(outVal);
      USE_SERIAL.print(outVal);
      USE_SERIAL.println("%");
    }
    delay(200);
  }

  delay(50);
}

```



Anexo N

Código del Raspberry pi

```
#!/usr/bin/env python3
# Script en Raspberry Pi que:
# 1) Recibe tramas LoRa (SX127x) por SPI + GPIO (DIO0).
# 2) Extrae variables (ID, voltaje, corriente, potencia) con regex.
# 3) Publica esas variables a AWS IoT Core por MQTT (TLS) en formato JSON.

import RPi.GPIO as GPIO
import time
import spidev
import ssl
import paho.mqtt.client as mqtt
import json
import re
from datetime import datetime # (importado, pero en este script no se usa)

# --- Configuración MQTT AWS IoT Core ---
MQTT_HOST = "a2joqptz8l0o2-ats.iot.us-east-2.amazonaws.com" # endpoint de AWS IoT
Core
MQTT_PORT = 8883 # puerto MQTT seguro (TLS)
MQTT_TOPIC = "lora/luminaria" # topic donde se publican los datos

# Ruta de certificados (CA + certificado + llave privada del "Thing")
CERT_PATH = "/home/luminarias/aws_certs/"

# Cliente MQTT
mqtt_client = mqtt.Client()
```



```
# Configura TLS para conectar con AWS IoT Core (autenticación por certificados)
mqtt_client.tls_set(
    ca_certs=CERT_PATH + "AmazonRootCA1.pem",
    certfile=CERT_PATH + "certificate.pem.crt",
    keyfile=CERT_PATH + "private.pem.key",
    tls_version=ssl.PROTOCOL_TLSv1_2
)

print(" 🍷 Conectando con AWS IoT Core...")
mqtt_client.connect(MQTT_HOST, MQTT_PORT) # abre conexión TCP/TLS al broker de
AWS IoT
mqtt_client.loop_start()          # hilo interno para manejar keepalive/reintentos de MQTT

# --- Configuración LoRa ---
# Pines Raspberry Pi (BCM)
RESET_PIN = 25 # reset del módulo LoRa
DIO0_PIN = 4   # DIO0: se pone en HIGH cuando llega un paquete (RxDone)

# Parámetros LoRa (deben coincidir con el transmisor)
FREQUENCY = 433.0    # MHz (banda 433)
SPREADING_FACTOR = 12 # SF12: mayor alcance, menor velocidad
BANDWIDTH = 125e3    # 125 kHz típico
CODING_RATE = 1      # CR (aquí se usa como índice para setear bits)
PREAMBLE_LENGTH = 8  # preámbulo LoRa
SYNC_WORD = 0x12     # sync word (debe coincidir con el transmisor)

# SPI para comunicar con el chip LoRa (SX127x)
```



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
 Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
CARRERA DE ELECTRICIDAD



```

spi = spidev.SpiDev()
spi.open(0, 0)          # bus 0, dispositivo 0 (CE0)
spi.max_speed_hz = 5000000 # velocidad SPI
spi.mode = 0           # modo SPI

def setup_gpio():
    """Configura los pines GPIO para reset y para leer DIO0."""
    GPIO.setmode(GPIO.BCM)
    GPIO.setup(RESET_PIN, GPIO.OUT)
    GPIO.setup(DIO0_PIN, GPIO.IN, pull_up_down=GPIO.PUD_DOWN)

def reset_module():
    """Resetea el módulo LoRa con un pulso corto en el pin RESET."""
    GPIO.output(RESET_PIN, GPIO.LOW)
    time.sleep(0.01)
    GPIO.output(RESET_PIN, GPIO.HIGH)
    time.sleep(0.01)

def write_register(reg, value):
    """Escribe un registro del SX127x por SPI."""
    spi.xfer([reg | 0x80, value]) # bit 7 = 1 => escritura

def read_register(reg):
    """Lee un registro del SX127x por SPI."""
    return spi.xfer([reg & 0x7F, 0])[1] # bit 7 = 0 => lectura

def setup_lora():
    """
  
```



Inicializa el SX127x:

- Modo LoRa
- Configura frecuencia
- Configura SF, BW, CR, preámbulo, sync word
- Pone el módulo en modo recepción continua

""""

Pasa a modo sleep LoRa (dos veces, típico en inicialización)

```
write_register(0x01, 0x80)
```

```
write_register(0x01, 0x80)
```

```
time.sleep(0.1)
```

Standby LoRa (0x88 suele ser LoRa + standby)

```
write_register(0x01, 0x88)
```

Frecuencia: calcula FRF (registros 0x06,0x07,0x08)

```
frf = int(FREQUENCY * 1000000.0 * 524288.0 / 32000000.0)
```

```
write_register(0x06, (frf >> 16) & 0xFF)
```

```
write_register(0x07, (frf >> 8) & 0xFF)
```

```
write_register(0x08, frf & 0xFF)
```

Configuración SF y otros (ojo: estos registros pueden variar según implementación SX127x)

```
write_register(0x0E, 0x80 | ((SPREADING_FACTOR << 4) & 0x70))
```

```
write_register(0x0D, 0x04 | ((CODING_RATE << 1) & 0x0E))
```

Configuración de ancho de banda (BW)

```
if BANDWIDTH == 125e3:
```

```
    bw_val = 0x70
```



```

elif BANDWIDTH == 250e3:
    bw_val = 0x80
elif BANDWIDTH == 500e3:
    bw_val = 0x90
else:
    bw_val = 0x70

# Aplica BW preservando bits bajos
write_register(0x0D, (read_register(0x0D) & 0x0F) | bw_val)

# Otros ajustes (dependen de tu módulo/driver)
write_register(0x0F, 0x0C)

# Preámbulo (MSB/LSB)
write_register(0x20, (PREAMBLE_LENGTH >> 8) & 0xFF)
write_register(0x21, PREAMBLE_LENGTH & 0xFF)

# Sync word
write_register(0x39, SYNC_WORD)

# Potencia TX o configuración (aquí se pone 0xFF; depende del registro real del chip)
write_register(0x09, 0xFF)

# Modo recepción continua (0x85 suele asociarse a RxContinuous en algunas
implementaciones)
write_register(0x01, 0x85)

def receive_packet():

```



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
 Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
CARRERA DE ELECTRICIDAD



"""

Espera a que DIO0 se active (paquete recibido),
 lee el tamaño del paquete y luego lee bytes del FIFO.

"""

```
# Espera a que DIO0 = 1 (RxDone)
while not GPIO.input(DIO0_PIN):
    time.sleep(0.1)

# Longitud del paquete recibido y dirección actual del FIFO
packet_length = read_register(0x13)
current_addr = read_register(0x10)

# Posiciona el puntero del FIFO donde empieza el paquete
write_register(0x0D, current_addr)

# Lee los bytes del FIFO
data = []
for _ in range(packet_length):
    data.append(read_register(0x00))

# Limpia flags de interrupción (RxDone, etc.)
write_register(0x12, 0xFF)

return bytes(data)
```

def parse_and_send(mensaje):

"""

Extrae con expresiones regulares:



```

- ID de luminaria
- corriente, potencia, voltaje
y lo publica en AWS IoT Core como JSON.
"""

# Busca: "ID: LUMINARIA_2" -> captura el número
id_match = re.search(r"ID:\s*LUMINARIA_(\d+)", mensaje)

# Busca: "Corriente (A): 1.23"
corriente_match = re.search(r'Corriente \((A)\):\s*(\[\d.\]+)', mensaje)

# Busca: "Potencia (W): 120.5"
potencia_match = re.search(r'Potencia \((W)\):\s*(\[\d.\]+)', mensaje)

# Busca: "Voltaje AC: 110.2"
voltaje_match = re.search(r'Voltaje AC:\s*(\[\d.\]+)', mensaje)

# Si encontró todo, arma el payload y publica
if all([id_match, corriente_match, potencia_match, voltaje_match]):
    payload = {
        "id": int(3), # ⚠️ fijo en 3: si quieres, aquí debería ir el ID real del nodo/gateway
        "luminaria": f"LUMINARIA_{id_match.group(1)}",
        "corriente": str(corriente_match.group(1)),
        "potencia": str(potencia_match.group(1)),
        "voltaje": str(voltaje_match.group(1))
    }

    mensaje_json = json.dumps(payload)
    mqtt_client.publish(MQTT_TOPIC, mensaje_json, qos=1) # QoS 1 = al menos una vez
    
```



```

print(" 📄 Publicado:", mensaje_json)

else:

    # Si el formato no coincide, muestra el mensaje para depurar
    print(" ❌ Error al extraer campos del mensaje:")
    print(mensaje)

def main():
    """Flujo principal: inicializa LoRa, espera paquetes y los publica por MQTT."""
    try:

        print(" ⚙ Inicializando LoRa...")
        setup_gpio()
        reset_module()
        setup_lora()

        print(" 🟢 Esperando datos LoRa...")

        while True:
            try:
                data = receive_packet()
                # decodifica bytes a texto (latin-1 para evitar errores con bytes raros)
                mensaje = data.decode('latin-1', errors='replace')
                print(f"\n 📄 Recibido: {mensaje}")
                parse_and_send(mensaje)

            except Exception as e:
                # si algo falla en un paquete, no detiene el programa
                print(f" ! Error al procesar paquete: {e}")
  
```



```
time.sleep(1)
```

```
except KeyboardInterrupt:
```

```
    # ctrl+c
```

```
    print("\n 🛑 Interrupción del usuario.")
```

```
finally:
```

```
    # libera recursos SPI y GPIO al salir
```

```
    spi.close()
```

```
    GPIO.cleanup()
```

```
    print(" ✅ Recursos liberados. Programa terminado.")
```

```
if __name__ == "__main__":
```

```
    main()
```

```
# Este script actúa como un “orquestador”:
```

```
# Ejecuta dos programas por turnos (en un bucle infinito) y los detiene
```

```
# después de un tiempo definido.
```

```
#!/usr/bin/env python3
```

```
import subprocess
```

```
import time
```

```
# Ruta al ejecutable de Python dentro del entorno virtual (venv)
```

```
# Así te aseguras de usar las librerías instaladas en ese entorno.
```

```
PYTHON_VENV = "/home/luminarias/lum-iot/bin/python"
```

```
# Tiempos de ejecución
```

```
TIEMPO_RECEPCION = 3600 # 1 hora (3600 segundos) -> tiempo que se deja correr
```

```
revisar.py
```

```
TIEMPO_ENVIO = 30 # 30 segundos -> tiempo que se deja correr enviando_hora.py
```



Bucle infinito: repite el ciclo siempre

while True:

1) Ejecuta enviando_hora.py por un tiempo corto (30 s)

print(" ▶ Ejecutando receptor.py") # (ojo: el print dice receptor.py, pero en realidad ejecuta enviando_hora.py)

proc_receptor = subprocess.Popen([PYTHON_VENV, "enviando_hora.py"]) # inicia el proceso

time.sleep(TIEMPO_ENVIO) # espera 30 s

proc_receptor.terminate() # detiene el proceso

proc_receptor.wait() # espera a que cierre bien

2) Ejecuta revisar.py por 1 hora

print(" ▶ Ejecutando revisar.py")

proc_emisor = subprocess.Popen([PYTHON_VENV, "revisar.py"]) # inicia el proceso

time.sleep(TIEMPO_RECEPCION) # espera 1 hora

proc_emisor.terminate() # detiene el proceso

proc_emisor.wait() # espera a que cierre bien

Este script en la Raspberry Pi:

1) Inicializa un módulo LoRa (SX127x) por SPI.

2) Configura el LoRa en 433 MHz (SF7, BW 125 kHz, etc.).

3) Envía por LoRa un mensaje con la hora actual (timestamp) cada 5 segundos.

-> Es como un "beacon" de hora para sincronizar o verificar comunicación.

#!/usr/bin/env python3

import spidev

import RPi.GPIO as GPIO

import time

from datetime import datetime



----- CONFIGURACIÓN -----

TIEMPO_ACTUALIZACION = 5 # Cada cuántos segundos se envía la hora por LoRa

Parámetros LoRa (deben coincidir con el receptor)

FREQUENCY = 433.0 # Frecuencia en MHz

SPREADING_FACTOR = 7 # SF7: más rápido, menos alcance que SF12

BANDWIDTH = 125e3 # 125 kHz típico

CODING_RATE = 1 # CR (aquí no se usa directamente en cálculo, se fija en registro 0x1D)

PREAMBLE_LENGTH = 8 # preámbulo LoRa

SYNC_WORD = 0x12 # sync word (debe coincidir entre TX/RX)

Pines LoRa (BCM)

RESET_PIN = 25 # pin para resetear el módulo LoRa

DIO0_PIN = 4 # pin DIO0: se pone en HIGH cuando termina de transmitir (TxDone)

Configuración SPI para hablar con el chip LoRa

spi = spidev.SpiDev()

spi.open(0, 0) # bus 0, dispositivo 0 (CE0)

spi.max_speed_hz = 5000000 # velocidad SPI

spi.mode = 0 # modo SPI

def setup_gpio():

"""Configura GPIO: RESET como salida, DIO0 como entrada."""

GPIO.setmode(GPIO.BCM)



```
GPIO.setup(RESET_PIN, GPIO.OUT)
```

```
GPIO.setup(DIO0_PIN, GPIO.IN, pull_up_down=GPIO.PUD_DOWN)
```

```
def reset_lora():
```

```
    """Reinicia el módulo LoRa con un pulso en RESET."""
```

```
    GPIO.output(RESET_PIN, GPIO.LOW)
```

```
    time.sleep(0.01)
```

```
    GPIO.output(RESET_PIN, GPIO.HIGH)
```

```
    time.sleep(0.01)
```

```
def write_register(reg, value):
```

```
    """Escribe un registro del SX127x por SPI."""
```

```
    spi.xfer([reg | 0x80, value]) # bit 7 = 1 => escritura
```

```
def read_register(reg):
```

```
    """Lee un registro del SX127x por SPI."""
```

```
    return spi.xfer([reg & 0x7F, 0])[1] # bit 7 = 0 => lectura
```

```
def setup_lora():
```

```
    """
```

```
    Inicializa el chip LoRa en modo transmisor:
```

- Entra en modo LoRa/standby
- Configura la frecuencia
- Configura BW/CR/SF y CRC
- Configura preámbulo y sync word
- Configura FIFO para transmisión

```
    """
```

```
    write_register(0x01, 0x80) # Sleep (LoRa)
```



```

time.sleep(0.1)
write_register(0x01, 0x88) # Standby en modo LoRa

# Configura frecuencia: FRF (0x06, 0x07, 0x08)
frf = int(FREQUENCY * 1000000.0 * 524288.0 / 32000000.0)
write_register(0x06, (frf >> 16) & 0xFF)
write_register(0x07, (frf >> 8) & 0xFF)
write_register(0x08, frf & 0xFF)

# RegModemConfig1 (0x1D): BW, coding rate, header
# 0x72 normalmente significa BW=125kHz, CR=4/5, explicit header (según datasheet)
write_register(0x1D, 0x72)

# RegModemConfig2 (0x1E): SF y CRC
# (SPREADING_FACTOR << 4) pone SF, | 0x04 activa CRC
write_register(0x1E, (SPREADING_FACTOR << 4) | 0x04)

# Preámbulo
write_register(0x20, (PREAMBLE_LENGTH >> 8) & 0xFF)
write_register(0x21, PREAMBLE_LENGTH & 0xFF)

# Sync word
write_register(0x39, SYNC_WORD)

# Direcciones FIFO para TX
write_register(0x0E, 0x80) # FIFO TX base addr
write_register(0x0F, 0x80) # FIFO addr pointer

```



```
# Potencia de transmisión (registro de PA config; 0xFF es "alto", depende del módulo)
write_register(0x09, 0xFF)
```

```
# Pone el módulo en modo TX (en realidad aquí lo deja listo; luego se vuelve a setear al
enviar)
```

```
write_register(0x01, 0x83) # TX mode
```

```
def send_message(message):
```

```
    """
```

```
    Envía un texto por LoRa:
```

- Carga el FIFO con los bytes del mensaje
- Configura la longitud
- Inicia transmisión
- Espera a TxDone por DIO0

```
    """
```

```
print(" 📡 Enviando mensaje:", message)
```

```
# Reinicia punteros del FIFO TX
```

```
write_register(0x0E, 0x80) # FIFO TX base addr
```

```
write_register(0x0D, 0x80) # FIFO pointer (addr)
```

```
# Escribe cada carácter del string al FIFO
```

```
for c in message:
```

```
    write_register(0x00, ord(c))
```

```
# Define longitud del payload
```

```
write_register(0x22, len(message))
```



```
# Inicia transmisión
```

```
write_register(0x01, 0x83) # TX mode
```

```
# Espera señal TxDone (DIO0 se pone en HIGH)
```

```
while not GPIO.input(DIO0_PIN):
```

```
    time.sleep(0.01)
```

```
# Limpia bandera TxDone
```

```
write_register(0x12, 0x08)
```

```
# Vuelve a modo recepción continua (opcional; aquí no se usa RX, pero queda "listo")
```

```
write_register(0x01, 0x85)
```

```
def main():
```

```
    """Inicializa el módulo y envía la hora actual cada TIEMPO_ACTUALIZACION
segundos."""
```

```
    try:
```

```
        print("🔧 Iniciando LoRa en Raspberry Pi")
```

```
        setup_gpio()
```

```
        reset_lora()
```

```
        setup_lora()
```

```
        print("📡 LoRa listo. Enviando hora cada", TIEMPO_ACTUALIZACION, "segundos")
```

```
    while True:
```

```
        # Toma la hora local de la Raspberry Pi
```

```
        hora_actual = datetime.now().strftime("%Y-%m-%d %H:%M:%S")
```

```
        # La envía por LoRa
```



```
send_message(hora_actual)

# Espera 5 segundos y repite
time.sleep(TIEMPO_ACTUALIZACION)

except KeyboardInterrupt:
    print("\n 🛑 Interrumpido por el usuario")
finally:
    # Libera recursos al salir
    spi.close()
    GPIO.cleanup()
    print(" ✅ GPIO limpio, SPI cerrado")

if __name__ == "__main__":
    main()
```



Anexo O

Ficha Técnica de la Luminaria

SYLVANIA

START

LED Outdoor
LED OUTDOOR ORION 150W NW P25215



Luminaria LED para iluminación exterior, con diseño moderno y robusto, driver de corriente constante integrado en la luminaria. Montaje en brazo horizontal. Proyección uniforme de la luz, reduce los costos de consumo de energía y de mantenimiento.

CARACTERÍSTICAS

- Diseño moderno con fuente LED SMD y lentes en policarbonato
- Chasis robusto en aluminio inyectado, liviano con disipador de calor integrado
- Driver de alta precisión con salida de corriente constante

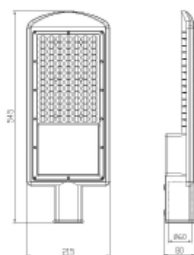
APLICACIONES

- Iluminación general en exteriores en áreas privadas
- Iluminación perimetral
- Iluminación exterior en clubes e instalaciones deportivas
- Iluminación de jardines privados

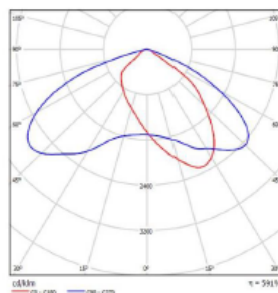


DATOS ÓPTICOS		DATOS FÍSICOS		DATOS ELÉCTRICOS	
Temperatura de color	5000K	Acabado	Pintura gris (RAL 7031)	Potencia de entrada	150 W
Flujo luminoso	18000 lm	Grado de protección IP IK	IP65 IK07	Tensión de operación	100-240V 50/60Hz
Tipo de distribución	Directa asimétrica Tipo II	Dimensiones (WxLxH)	545x215x80 mm	Corriente de entrada	0.23 A @ 220 V
Reproducción de color (IRC)	80	Tipo de montaje	Brazo horizontal	Corriente de módulo LED	1050mA
Vida útil	30000 h	Chasis	Aluminio inyectado	Factor de potencia	>0.9
Eficacia	120 lm/W	Material óptica	Lente PC	Tipo de driver	Independiente CC
Chip LED	2835	Temperatura de operación Ta	-25°C ~ +40°C	Atenuable	No
		Diámetro soporte	50 mm	Base Fotocelda	No

DIMENSIONES



FOTOMETRIA



* Producto no diseñado para aplicaciones de alumbrado público.

Las características de los productos pueden ser modificadas sin previo aviso según la evolución de la tecnología LED. 07/21

Producto Ecológico: Permite ahorrar energía comparado con productos tradicionales. Libre de mercurio.

by **FEILO SYLVANIA**



Anexo P

Realización de pruebas antes del montaje en oficinas de EmelNorte



Anexo Q

Montaje de las Luminarias con ayuda del personal de EmelNorte



Luminaria ya ubicada





Anexo R

Datos obtenidos de las luminarias 1, 2 y 3.

