



UNIVERSIDAD  
CATÓLICA  
DE CUENCA

**UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CUENCA**

*Comunidad Educativa al Servicio del Pueblo*

**UNIDAD ACADÉMICA DE INGENIERÍA,  
INDUSTRIA Y CONSTRUCCIÓN**

**CARRERA DE ELECTRICIDAD**

**PROTOTIPO PARA DETERMINAR FALLAS DE  
FUNCIONAMIENTO EN LUMINARIAS LED DE  
ALUMBRADO PÚBLICO**

**PROYECTO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL  
TÍTULO DE INGENIERO ELÉCTRICO**

**AUTOR: EDISON JONATHAN GUANUCHE LARGO**

**DIRECTOR: ING. OSCAR MAURICIO SIGUENCIA SIGUENZA,  
MGTR.**

**CUENCA – ECUADOR**

**2025**

**DIOS, PATRIA, CULTURA Y DESARROLLO**



**UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CUENCA**

*Comunidad Educativa al Servicio del Pueblo*

**UNIDAD ACADÉMICA DE INGENIERÍA,  
INDUSTRIA Y CONSTRUCCIÓN**

**CARRERA DE ELECTRICIDAD**

**PROTOTIPO PARA DETERMINAR FALLAS DE FUNCIONAMIENTO  
EN LUMINARIAS LED DE ALUMBRADO PÚBLICO**

**PROYECTO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL  
TÍTULO DE INGENIERO ELÉCTRICO**

**AUTOR: EDISON JONATHAN GUANUCHE LARGO**

**DIRECTOR: ING. OSCAR MAURICIO SIGUENCIA SIGUENZA,  
MGTR.**

**CUENCA - ECUADOR**

**2025**

**DIOS, PATRIA, CULTURA Y DESARROLLO**

## DECLARATORIA DE AUTORÍA Y RESPONSABILIDAD

Edison Jonathan Guanuche Largo portador de la cédula de ciudadanía N.º 0705714012. Declaro ser el autor de la obra: “Prototipo para determinar fallas de funcionamiento en luminarias LED de alumbrado público”, sobre la cual me hago responsable sobre las opiniones, versiones e ideas expresadas. Declaro que la misma ha sido elaborada respetando los derechos de propiedad intelectual de terceros y eximo a la Universidad Católica de Cuenca sobre cualquier reclamación que pudiera existir al respecto. Declaro finalmente que mi obra ha sido realizada cumpliendo con todos los requisitos legales, éticos y bioéticos de investigación, que la misma no incumple con la normativa nacional e internacional en el área específica de investigación, sobre la que también me responsabilizo y eximo a la Universidad Católica de Cuenca de toda reclamación al respecto.

Cuenca, 7 de abril de 2025



F: .....

EDISON JONATHAN GUANUCHE LARGO

0705714012

## **CERTIFICACIÓN**

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Edison Jonathan Guanuche Largo, bajo mi supervisión.

---

**Ing. Oscar Mauricio Siguenza Siguenza**  
**DIRECTOR**

## DEDICATORIA

Con el corazón lleno de gratitud, quiero dedicar este trabajo de titulación, en primer lugar, a Dios, por brindarme salud, vida, fortaleza, sabiduría y la oportunidad para alcanzar este sueño tan anhelado.

A mi querida hija, Bianca Brigitte Guanuche, quien es y siempre será mi mayor fuente de inspiración y motivo para seguir luchando por mis sueños, ya que este logro alcanzado es tanto suyo como mío, de igual manera, espero que esta meta académica cumplida se convierta en un ejemplo significativo y le inspire a luchar por sus sueños.

A mis apreciados padres, quienes, con su amor incondicional, esfuerzo y sacrificios me han apoyado en cada paso de este camino. Su confianza en mí ha sido el aliento necesario para superar cada obstáculo.

A mis demás familiares: abuelitos, hermanos, tíos y sobrinos, quienes, con sus palabras de aliento, gestos de cariño y compañía en los momentos más difíciles, me inspiraron a nunca rendirme, puesto que su apoyo emocional fue clave para mantener mi determinación y enfoque.

Además, extendiendo esta dedicatoria a mis docentes, quienes, con su profesionalismo, vocación y compromiso, me transmitieron los conocimientos necesarios y valores éticos esenciales que me permitirán afrontar con éxito los retos en el ámbito profesional.

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco a Dios por ser mi guía espiritual y fortaleza quien me ha acompañado a lo largo de este proceso.

A mi querida madre, Mercy Largo Ñaguazo, quien ha sido mi mayor apoyo y ejemplo de perseverancia. Gracias, mamá, por enseñarme, con tus acciones, que el esfuerzo, la responsabilidad y la dedicación son las claves para convertir los sueños en realidad.

Extiendo un profundo agradecimiento a mi padre, José Guanuche Pacheco, por sus sabios consejos, su ejemplo y motivación me han inspirado a avanzar con firmeza y confianza este camino hacia la culminación de mi carrera universitaria.

Agradezco de todo corazón a mi hija, Bianca Brigitte Guanuche, quien con su amor y su existencia ha llenado mi vida de felicidad y propósitos. Su presencia ha sido mi motor para esforzarme cada día y seguir este camino con entusiasmo y dedicación.

De igual manera, agradezco a la Universidad Católica de Cuenca y a todo su cuerpo docente por la formación integral que me brindaron a lo largo de mi carrera. En particular, expreso mi gratitud al Ing. Oscar Mauricio Siguenza Siguenza, quien, con su experiencia, paciencia y guía, fue un pilar esencial para el desarrollo y culminación de este trabajo de titulación.

Finalmente, a mis familiares, seres queridos y amigos, gracias por estar presentes en cada etapa de este camino.

## RESUMEN

El presente proyecto de investigación tiene como objetivo el diseño y la construcción de un prototipo de gestión remota para determinar fallas en el funcionamiento de luminarias LED de alumbrado público, con el propósito de optimizar las tareas de mantenimiento, reducir costos de operación y mejorar la eficiencia energética. Para ello, siguiendo las etapas establecidas en la metodología se logró la construcción del prototipo funcional que integra sensores de medición, microcontroladores y un módulo de comunicación GSM, lo que permite la supervisión en tiempo real de variables eléctricas clave, como voltaje, corriente, potencia, factor de potencia y consumo de energía. A su vez, el almacenamiento y visualización de datos se realiza a través de la plataforma Ubidots, mientras que la comunicación GSM facilita la transmisión de alertas automáticas y reportes periódicos diarios sobre el estado de las luminarias. Además, con respecto a los resultados obtenidos se demostró que el sistema desarrollado tiene una alta precisión en la medición de parámetros eléctricos, así como la capacidad misma de detectar y reportar de manera eficiente diversas fallas simuladas, como cortes de energía, caídas de voltaje, sobretensiones, caídas de corriente y consumos anómalos de energía. Con este estudio, se demuestra que la implementación de este sistema podría contribuir significativamente a la modernización de las infraestructuras en los sistemas eléctricos, promoviendo el concepto de ciudades inteligentes y el uso eficiente de la energía eléctrica.

*Palabras clave:* prototipo, luminarias LED, eficiencia energética, Ubidots, comunicación GSM.

## ABSTRACT

This research project aims to design and develop a remote management prototype to detect malfunctions in LED streetlights, optimize maintenance tasks, reduce operating costs, and enhance energy efficiency. To this end, a functional prototype was built following the steps established in the methodology. It integrates measurement sensors, microcontrollers, and a Global System for Mobile Communication (GSM) communication module, enabling real-time monitoring of key electrical variables, including voltage, current, power, power factor, and energy consumption. Data is stored and visualized through the Ubidots platform. At the same time, GSM communication facilitates the transmission of automatic alerts and daily status reports on the luminaires. Furthermore, the results demonstrated that the developed system provides high accuracy in measuring electrical parameters, and is capable of efficiently detecting and reporting various simulated faults, such as power outages, voltage drops, surges, current drops, and abnormal energy consumption. This study demonstrates that implementing this system could significantly contribute to the modernization of electrical infrastructure, promoting the concept of smart cities and the efficient use of electrical energy.

*Keywords:* prototype, LED luminaires, energy efficiency, Ubidots, GSM communication.

## ÍNDICE DE CONTENIDO

DECLARATORIA DE AUTORIA Y RESPONSABILIDAD .....	iii
CERTIFICACIÓN.....	iv
DEDICATORIA .....	v
AGRADECIMIENTOS.....	vi
RESUMEN .....	vii
ABSTRACT .....	viii
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	ix
LISTA DE FIGURAS.....	xii
LISTA DE TABLAS.....	xiv
CAPÍTULO I .....	1
1 Introducción.....	1
1.1 El problema.....	3
1.1.1 Formulación del problema.....	3
1.1.2 Delimitación del problema .....	5
1.2 Justificación .....	6
1.3 Objetivos.....	7
1.3.1 Objetivo general.....	7
1.3.2 Objetivos específicos .....	7
1.4 Metodología .....	7
1.4.1 Investigación aplicada.....	7
1.4.2 Desarrollo de la propuesta .....	8
CAPÍTULO II .....	12
2 Marco teórico .....	12
2.1 Sistema de Iluminación .....	12
2.1.1 Alumbrado Público.....	12
2.1.2 Facturación del alumbrado público.....	12
2.1.3 Elementos del sistema de Iluminación .....	13
2.1.4 Características técnicas de las lámparas de alumbrado público.....	13
2.1.5 Potencia Eléctrica .....	15
2.1.6 Luminarias .....	18
2.1.7 Tipos de luminarias utilizadas en el Alumbrado Público. ....	18
2.1.8 Alimentación y regulación en sistemas de alumbrado LED .....	22
2.1.9 Mantenimiento del sistema de alumbrado público:.....	22
2.1.10 Alumbrado público con luminarias LED.....	23
2.1.11 Iluminación LED Inteligente en el alumbrado publico .....	24

2.1.12	Smart City – Smart Grid .....	24
2.2	Sistemas para medición y adquisición de la información.....	25
2.2.1	Plataforma hardware open source.....	25
2.2.2	Microcontroladores.....	26
2.2.3	Sensores.....	27
2.2.4	Módulos de Comunicación .....	28
2.3	Sistemas de comunicación para el monitoreo remoto .....	29
2.3.1	Redes inalámbricas.....	29
2.3.2	Tecnologías inalámbricas.....	30
2.4	Sistemas de Monitorización, Gestión y Virtualización.....	32
2.4.1	La telegestión.....	33
2.4.2	Internet de las Cosas (IoT).....	33
2.4.3	Ubidots.....	36
2.4.4	Tecnología GSM .....	37
CAPÍTULO III: .....		40
3	Desarrollo Del Prototipo.....	40
3.1	Diagrama general del circuito.....	41
3.2	Definición de hardware y software.....	42
3.2.1	Descripción de hardware.....	42
3.2.2	Selección del módulo de comunicación.....	45
3.3	Descripción de software .....	46
3.3.1	Conexión del prototipo en fase de pruebas.....	46
3.3.2	Calibración de sensores.....	46
3.3.3	Diseño del circuito impreso mediante software.....	48
3.3.4	Diseño de la carcasa de soporte y protección del prototipo.....	51
3.3.5	Pantalla LCD 4x16 .....	52
3.3.6	Adquisición de datos .....	52
3.4	Fuente de alimentación del sistema .....	56
3.5	Comunicación del prototipo de detección de fallas.....	57
3.5.1	Diagrama de flujo de comunicación del sistema.....	57
3.6	Armado del prototipo.....	64
3.6.1	Lugar de estudio .....	64
3.6.2	Instalación del prototipo de medición autónoma.....	64
CAPÍTULO IV .....		66
4	Pruebas Del Prototipo.....	66
4.1	Pruebas del dispositivo final.....	66
4.2	Prueba de conectividad del prototipo con la plataforma Ubidots. ....	73

4.2.1	Prueba de datos enviados en un día.....	73
4.2.2	Prueba de datos enviados, totales.....	76
4.3	Prueba de envío de reportes diarios y alertas del prototipo mediante SMS.....	78
4.3.1	Reportes diarios generados por el prototipo.....	79
4.3.2	Notificaciones de alertas enviadas por el prototipo de variaciones de voltaje, corriente y potencia consumida.....	80
4.4	Exportación de los datos de la plataforma.....	81
4.5	Costo del prototipo de detección de fallas en luminarias LED de alumbrado Público.....	83
CAPÍTULO V.....		85
5	Conclusiones y recomendaciones.....	85
5.1	Conclusiones.....	85
5.2	Recomendaciones.....	86
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....		87
ANEXOS (Programaciones y pruebas de funcionamiento).....		91

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Diagrama de flujo de la metodología.....	11
<b>Figura 2.</b> Led con fibra óptica primaria.....	21
<b>Figura 3.</b> LED con placas PCB. ....	21
<b>Figura 4.</b> Elementos de una luminaria led.....	22
<b>Figura 5.</b> El paradigma del IoT en las redes eléctricas inteligentes.....	25
<b>Figura 6.</b> Distribución de los pines ESP32 WIFI.....	26
<b>Figura 7.</b> Sensor de voltaje ZMPT101B.....	27
<b>Figura 8.</b> Sensor de Corriente SCT013.....	28
<b>Figura 9.</b> Tarjeta electrónica SIM800L.....	29
<b>Figura 10.</b> Clasificación de las redes inalámbricas. ....	30
<b>Figura 11.</b> Ecosistema IoT.....	34
<b>Figura 12.</b> Pila de protocolos IoT.....	34
<b>Figura 13.</b> Plataforma de servidor Ubidots.....	36
<b>Figura 14.</b> Arquitectura de la red GSM.....	38
<b>Figura 15.</b> Diagrama general del circuito.....	41
<b>Figura 16.</b> Devanado primario y secundario del sensor.....	44
<b>Figura 17.</b> Interfaz del sensor con el conductor de corriente.....	44
<b>Figura 18.</b> Conexión inicial de componentes en la placa de pruebas.....	46
<b>Figura 19.</b> Calibración de Corriente (ZMPT101B y EmonLib).....	47
<b>Figura 20.</b> Calibración de Voltaje (ZMPT101B).....	47
<b>Figura 21.</b> Monitor serial de Arduino corriente RMS y voltaje RMS.....	48
<b>Figura 22.</b> Diseño de PCB para el módulo principal del prototipo realizado en Proteus 8. ...	48
<b>Figura 23.</b> Ruteo de pistas de la placa principal del prototipo.....	49
<b>Figura 24.</b> Diseño del circuito impreso para medir voltaje y corriente alterna, b) Diseño del circuito impreso para convertidor de señal PWM.....	49
<b>Figura 25.</b> Ruteo de pistas para medir voltaje y corriente alterna, b) Ruteo de pistas para convertidor de señal PWM a señal analógica.....	50
<b>Figura 26.</b> PCB principal del prototipo de detección de fallas en las luminarias LED de alumbrado público.....	50
<b>Figura 27.</b> PCBs fabricadas para la medición de factor de potencia.....	51
<b>Figura 28.</b> Diseño en Autodesk Inventor de la carcasa de soporte y protección del prototipo. .....	51
<b>Figura 29.</b> Vista de la Pantalla LCD.....	52
<b>Figura 30.</b> Acondicionamiento de la señal para su adaptación al rango de lectura del ESP32. .....	53
<b>Figura 31.</b> Solución para la adquisición de la señal de voltaje obtenida del sensor.....	53
<b>Figura 32.</b> Serial Plot de la lectura del sensor de voltaje ZMPT101B.....	54
<b>Figura 33.</b> Algoritmo para medir el factor de potencia.....	55
<b>Figura 34.</b> Diagrama de flujo del programa del sistema desarrollado.....	56
<b>Figura 35.</b> Diagrama de flujo de comunicación del sistema.....	57
<b>Figura 36.</b> Creación de la cuenta en UBIDOTS.....	58
<b>Figura 37.</b> Código desarrollo para comunicación con la plataforma Ubidots.....	59
<b>Figura 38.</b> Devices creados en la página de Ubidots.....	60
<b>Figura 39.</b> Nuevas variables.....	60
<b>Figura 40.</b> Widget personalizado.....	61
<b>Figura 41.</b> Código usado para la comunicación entre el Arduino y el módulo SIM800L.....	62
<b>Figura 42.</b> Verificación de la conexión y el estado de la red.....	63
<b>Figura 43.</b> Respuesta de comandos AT en módulo SIM800.....	63
<b>Figura 44.</b> Notificación de prueba de envío de variables mediante modulo GSM.....	64

<b>Figura 45.</b> Adecuación del lugar de estudio. ....	65
<b>Figura 46.</b> Ensamblado de todos los componentes del prototipo. ....	65
<b>Figura 47.</b> Multímetro digital Fluke 87V True RMS. ....	67
<b>Figura 48.</b> Variables medidas por el prototipo. ....	68
<b>Figura 49.</b> Variables medidas por el Multímetro digital Fluke 87V True RMS. ....	69
<b>Figura 50.</b> Variables medidas por la fuente de alimentación (AC Power Source). ....	69
<b>Figura 51.</b> Grafica de las mediciones de voltaje por prototipo y multímetro. ....	70
<b>Figura 52.</b> Grafica de las mediciones de corriente por prototipo y multímetro. ....	71
<b>Figura 53.</b> Grafica de las mediciones de factor de potencia por prototipo y fuente de alimentación. ....	72
<b>Figura 54.</b> Medición diaria del voltaje. ....	73
<b>Figura 55.</b> Medición diaria de la corriente. ....	74
<b>Figura 56.</b> Medición diaria de la potencia activa. ....	74
<b>Figura 57.</b> Medición diaria del factor de potencia. ....	75
<b>Figura 58.</b> Medición diaria de la energía consumida. ....	75
<b>Figura 59.</b> Medición total de datos enviados de voltaje. ....	76
<b>Figura 60.</b> Medición total de datos enviados de corriente. ....	76
<b>Figura 61.</b> Medición total de datos enviados de la potencia activa. ....	77
<b>Figura 62.</b> Medición total de datos enviados del factor de potencia. ....	77
<b>Figura 63.</b> Reporte enviado en horas de la mañana. ....	79
<b>Figura 64.</b> Reporte enviado en horas de la tarde. ....	79
<b>Figura 65.</b> Reporte enviado en horas de la noche. ....	80
<b>Figura 66.</b> Notificación de alerta de variaciones de corriente, voltaje y potencia consumida. ....	80
<b>Figura 67.</b> Notificación de alerta de variaciones de corriente, voltaje y potencia consumida. ....	81
<b>Figura 68.</b> Rango de exportación de datos. ....	81
<b>Figura 69.</b> Correo electrónico recibido de la plataforma para la descarga de los datos. ....	82
<b>Figura 70.</b> Archivos en formato Exel del total de datos descargados. ....	82
<b>Figura 71.</b> Libros totales exportados a Excel de las variables eléctricas. ....	83

## LISTA DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Clasificación de luminarias LED. ....	20
<b>Tabla 2.</b> Características técnicas del módulo ESP32 WIFI. ....	27
<b>Tabla 3.</b> Características del módulo sensor de voltaje ZMPT101B. ....	28
<b>Tabla 4.</b> Características del sensor corriente SCT013-000. ....	28
<b>Tabla 5.</b> Características del Módulo GSM. ....	29
<b>Tabla 6.</b> Frecuencias de Operación GSM en Ecuador. ....	38
<b>Tabla 7.</b> Comandos AT empleados en la gestión de SMS. ....	39
<b>Tabla 8.</b> Tabla comparativa de microcontroladores. ....	42
<b>Tabla 9.</b> Tabla comparativa de sensores de voltaje. ....	43
<b>Tabla 10.</b> Tabla comparativa de sensores de corriente. ....	43
<b>Tabla 11.</b> Tabla comparativa de displays ....	45
<b>Tabla 12.</b> Tabla comparativa de módulos de comunicación. ....	45
<b>Tabla 13.</b> Características de la fuente conmutada. ....	57
<b>Tabla 14.</b> Características del regulador de voltaje. ....	57
<b>Tabla 15.</b> Mediciones de voltaje entre prototipo y multímetro. ....	67
<b>Tabla 16.</b> Mediciones de corriente entre prototipo y multímetro. ....	67
<b>Tabla 17.</b> Mediciones de factor de potencia entre prototipo y fuente de alimentación. ....	68
<b>Tabla 18.</b> Error en medición de voltaje ....	70
<b>Tabla 19.</b> Error en medición de corriente. ....	71
<b>Tabla 20.</b> Error en medición de factor de potencia. ....	72
<b>Tabla 21.</b> Costo del prototipo desarrollado. ....	84

## CAPÍTULO I

### 1 INTRODUCCIÓN

Las redes de alumbrado público se diseñaron en el siglo XIX y se construyeron utilizando la tecnología más avanzada disponible en esa época. En cierto modo, las lámparas utilizadas en estas redes tenían un consumo energético elevado. Esto ha llevado a la búsqueda de mejoras en la eficiencia energética mediante la implementación de tecnologías más modernas, como el uso de luminarias LED que destacan por su rendimiento y bajo consumo (Chantera & Tobar, 2013). Igualmente, el alumbrado público en la actualidad es decisivo para la seguridad y la calidad de vida en las localidades.

A partir del año 2023, todas las lámparas de los sistemas de alumbrado público deben ser de tipo LED, dado que todos los sistemas de alumbrado público deben actualizarse a la normativa y a las exigencias que presionan para una mayor eficiencia energética y un menor impacto ambiental. Varios organismos, como la Empresa Eléctrica Regional Centro Sur, están promoviendo desde 2010 este paso hacia el tipo LED en diferentes capitales de provincias para obtener una iluminación pública de mejor calidad y más duradera.

Existen fallos en los sistemas de alumbrado público: mantenimiento, vandalismo, cortes en el suministro eléctrico, etcétera, además de condiciones climáticas extremas, por ello es esencial mantener la planificación y la gestión de los fallos en los sistemas de alumbrado públicos a efectos de permitir un funcionamiento sostenido del alumbrado público para que las comunidades se beneficien de este servicio. Por tanto, no es adecuado limitarse a la utilización de tecnologías actuales; es igual de importante plantear estrategias para llevar a cabo una detección y resolutive de los fallos.

Unos de los principales desafíos siguen siendo la detección y reparación de fallas en estas luminarias. En algunos casos, las luminarias pueden permanecer encendidas durante el día y no funcionar correctamente durante la noche y la madrugada, lo que pone en riesgo la seguridad pública y aumenta los costos operativos debido al desperdicio de energía y la necesidad de trabajos de mantenimiento. Generalmente, la detección de estas fallas se realiza mediante inspección visual, lo que implica que la identificación de una avería depende de la observación directa del mal funcionamiento de las luminarias. Por lo tanto, el proceso de detección y reparación de fallas puede ser ineficiente, especialmente en redes extensas o en áreas con difícil acceso.

En respuesta a estos desafíos, se han desarrollado diversas tecnologías basadas en el concepto de IoT para el monitoreo y control que integran sensores avanzados, conectividad inalámbrica y plataformas de gestión centralizada (Güngör et al., 2017). En este contexto, la modernización de las infraestructuras de alumbrado público es esencial, especialmente integrar sistemas de monitoreo capaces de detectar de manera autónoma fallas de funcionamiento en luminarias de alumbrado público contribuyendo de manera significativa al

ahorro energético, Además esto facilitaría la optimización del mantenimiento y la operación correcta de las redes de alumbrado público.

Los sistemas de monitoreo para el alumbrado público han evolucionado significativamente en las últimas décadas, en varios países del mundo impulsados por la necesidad de mejorar la eficiencia energética, reducir costos operativos y aumentar la seguridad. Este tipo de tecnologías son clave para que las autoridades puedan gestionar y supervisar las redes de alumbrado de manera efectiva (Borges et al., 2020). Sin embargo, los sistemas de alumbrado público tradicionales en nuestro país a menudo no cuentan con tecnologías de monitoreo avanzadas. Esto radica la importancia de actualizar las infraestructuras mediante la incorporación de nuevas tecnologías en el sistema de alumbrado, lo que facilitaría una mejor detección de fallas y, en consecuencia, el uso eficiente de la energía eléctrica.

La tecnología LED está imponiéndose en el alumbrado público gracias a su alta eficiencia energética, que permite lograr potencias lumínicas más altas con un consumo hasta un 85% menor en comparación con las luminarias tradicionales de vapor de sodio de alta presión, las de mercurio de alta presión o las lámparas de halogenuros metálicos, las cuales requieren potencias elevadas y tienen un consumo energético mucho mayor. Aunque estas tecnologías antiguas son económicas y aceptables en desempeño, su corta vida útil conlleva costos adicionales en mantenimiento y reemplazos. En contraste, las luminarias LED ofrecen una vida útil prolongada, reduciendo significativamente los costos de mantenimiento. Además, al no contener mercurio ni metales pesados, las luminarias LED son más respetuosos con el medio ambiente, proporcionando una mejor reproducción de colores y menor contaminación lumínica. Estos beneficios hacen que la tecnología LED sea una opción más sostenible y económica para la iluminación pública (Almeida, H. 2019).

Las luminarias LED para alumbrado público pueden enfrentar una variedad de fallas, como problemas de encendido debido a fallos en el controlador LED o conexiones defectuosas, así como fallos en los chips LED que afectan la luminosidad. Además, pueden surgir fallas en la función SPD (protección contra sobretensiones) y una IP/IK más baja, que afecta la resistencia a condiciones ambientales adversas. Un recubrimiento en polvo deficiente puede comprometer la durabilidad de las luminarias, mientras que una distribución de iluminación inadecuada puede resultar en cobertura desigual. Problemas con el encapsulado y la presencia de componentes defectuosos, sumadas a las variaciones de voltaje, también pueden influir en el rendimiento y la vida útil de las luminarias. Sin embargo, en comparación con las luminarias tradicionales de vapor de sodio de alta presión, las de mercurio de alta presión y las luminarias de halogenuros metálicos, las luminarias LED presentan fallas menores y menos frecuentes, lo que contribuye a su mayor fiabilidad y menor necesidad de mantenimiento (Dorremochea, et al., 2011).

Una de las tecnologías más destacadas es la implementación de sensores de corriente y voltaje que permiten medir el consumo energético en luminarias LED. Estos sensores pueden detectar variaciones en el consumo de energía, lo que puede indicar la presencia de fallos o anomalías en el sistema prolongando la vida útil de los componentes (Chen et al., 2021). La conectividad inalámbrica juega un papel crucial en estos sistemas. Tecnologías como Wifi, Zigbee, LoRaWAN, NB-IoT, WLAN y GSM se emplean para transferir datos desde las luminarias hacia una plataforma centralizada o un smartphone, donde son analizados y gestionados. Esta comunicación en un determinado tiempo permite a los operadores tomar decisiones informadas y realizar ajustes inmediatos cuando se detectan problemas.

Las plataformas de gestión centralizadas, que a menudo se presentan como soluciones de software basadas en la nube, proporcionan una interfaz donde se pueden gestionar y supervisar el consumo de energía de las luminarias de alumbrado público de una ciudad o región. Estas plataformas proporcionan visualizaciones detalladas del estado operativo, determinado fallos o anomalías, así como análisis históricos del rendimiento energético. Algunos de los sistemas más avanzados incluso incorporan algoritmos de aprendizaje automático para predecir fallos y optimizar los horarios de encendido y apagado según los patrones de uso y condiciones ambientales (Raza et al., 2018).

A medida que las ciudades continúan creciendo y adoptando nuevas tecnologías se convierten en "ciudades inteligentes", la implementación de sistemas de monitoreo para el alumbrado público seguirá siendo un componente esencial. Es evidente que estas tecnologías avanzadas no solo mejoran la eficiencia operativa y reducen costos, sino que también contribuyen a la sostenibilidad y la calidad de vida urbana, haciendo que las ciudades sean más seguras y eficientes en términos energéticos (Johnson & Miller, 2023).

Al analizar el contexto actual, se pone de manifiesto la necesidad de construir un prototipo que adopte varias de estas tecnologías permitiendo así el monitoreo, detección y reporte de fallas en un determinado tiempo de variables como voltaje, corriente, potencia, factor de potencia, consumo de energía de luminarias LED en el sistema de alumbrado público implementando microcontroladores, sensores y módulo de comunicación GSM.

## **1.1 El problema**

### **1.1.1 Formulación del problema**

El alumbrado público es esencial para garantizar la seguridad y la calidad de vida tanto en áreas urbanas como rurales. Sin embargo, las fallas en las luminarias de estos sistemas suelen pasar desapercibidas durante tiempos prolongados, dejando zonas sin la iluminación adecuada y aumentando los riesgos de seguridad para peatones y conductores. La gestión actual de las fallas en el alumbrado público es principalmente manual y se basa en la intervención correctiva tras el reporte de una avería. Este enfoque, además de ser ineficiente,

implica un considerable retraso en la reparación, que puede extenderse por días o incluso semanas. Asimismo, la falta de un mantenimiento correctivo periódico puede presentar que algunas luminarias permanezcan encendidas innecesariamente, generando costos operativos adicionales y un mayor consumo de energía por el uso ineficiente de los recursos.

Del mismo modo la función del alumbrado público se centra en iluminar diversos espacios como vías, avenidas, parques, plazas, calles, puentes, zonas comerciales, etc., De tal manera en la ciudad de Cuenca, se ha llevado a cabo la sustitución de la iluminación tradicional de vapor de sodio de alta presión, mercurio de alta presión y halogenuros metálicos por luminarias LED en diferentes sectores. Entre los proyectos destacados, se encuentra la repotenciación de luminarias en el centro urbano, con especial énfasis en parques, vías, avenidas y zonas de alta concurrencia, para cumplir con los parámetros de uniformidad y eficiencia lumínica. Estas acciones forman parte de una estrategia que busca promover la eficiencia energética y fortalecer la sostenibilidad de la infraestructura urbana en la ciudad de Cuenca.

Considerando la reciente implementación de luminarias LED en el Centro Histórico de Cuenca, resulta relevante analizar la viabilidad de integrar sistemas de monitoreo para la gestión autónoma de fallas en la red de alumbrado público.

Según CENTROSUR (2024), se tiene planificado el reemplazo de un total de 2,900 luminarias LED, cada una con una potencia de 279 vatios (W). Si se estima que un 3 % de estas lámparas presentan fallas en el sistema o permanecen encendidas durante el día, esto representa un consumo ineficiente de energía.

- **Cálculo del consumo energético**

Consumo diario por lámpara:

$$279W \times 12 \text{ horas} / \text{día} = 3,348Wh / \text{día} = 3.348kWh / \text{día}$$

Consumo diario total:

$$2,900 \text{ lámparas} \times 3.348 \text{ kWh} / \text{día} = 9709.2Kwh / \text{día}$$

Consumo anual total:

$$9709.2kWh / \text{día} \times 365 = 3,543,858kWh / \text{año}$$

- **Impacto del consumo ineficiente**

Lámparas que presentan fallas en el sistema o permanecen encendidas:

$$2,900 \text{ lámparas} \times 3\% = 87 \text{ lámparas}$$

Consumo energético innecesario diario:

$$87 \text{ lámparas} \times 279W \times 12 \text{ horas} = 291.276kWh / \text{día}$$

Consumo energético innecesario anual:

$$291.276\text{kWh}/\text{dia} * 365 \text{ dias} = 106315.74\text{kWh}/\text{año}$$

En este contexto, se puede demostrar mediante este ejemplo práctico un consumo energético innecesario lo cual representara un costo significativo.

- **Ahorro Potencial**

Si el dispositivo de monitoreo inteligente puede reducir el consumo energético innecesario en un 95%, se tendría un ahorro significativo.

Ahorro diario:

$$291.276\text{kWh}/\text{dia} * 95\% = 276.71\text{kWh}/\text{dia}$$

Ahorro anual:

$$276.71 \text{ kWh}/\text{dia} * 365 = 100,999.953 \text{ kWh}/\text{año}$$

Por lo tanto, el alumbrado público, especialmente en los parques de Cuenca, es vital para la seguridad y el bienestar de los ciudadanos. Aunque las luminarias LED son eficientes, también son propensas a fallos. Ante esta problemática, se plantea la necesidad de implementar un sistema de detección de fallas proactiva mediante la monitorización del consumo energético en el sistema de alumbrado público, ya que este enfoque permitiría una gestión más eficiente, reduciendo los tiempos de respuesta y optimización en el uso de recursos.

### **1.1.2 Delimitación del problema**

El presente trabajo de titulación, está orientado al diseño y la construcción de un prototipo para medir variables eléctricas de tal forma que permita detectar fallas en el funcionamiento de luminarias LED considerando un sistema similar al de alumbrado público del parque la Libertad de la ciudad de Cuenca y que será desarrollado en el laboratorio de Luminotecnia del CIITT, específicamente, se monitorearán variables como voltaje, corriente, potencia, factor de potencia, consumo de energía y horas de funcionamiento en un grupo de lámparas.

La comunicación entre el sistema de iluminación LED de alumbrado público y el sistema de monitoreo se realizará mediante la utilización del módulo ESP32, que ofrece conexión a internet, junto con el módulo GSM. Estos componentes permitirán supervisar las variables eléctricas, enviar alertas automáticas y generar reportes periódicos sobre el estado de funcionamiento de las luminarias. Esta tecnología mejorará la respuesta ante fallas, optimizando los tiempos de mantenimiento y el consumo óptimo de la energía eléctrica.

Se trabajará únicamente con luminarias LED, excluyendo otras tecnologías de iluminación o sistemas de gestión de energía. Además, se espera que, a través de simulaciones y pruebas de campo, el prototipo desarrollado sea funcional y práctico de

manera que pueda ser implementado en parques y espacios públicos similares, de la ciudad de Cuenca en un futuro.

## **1.2 Justificación**

En la actualidad, la creciente necesidad de contar con sistemas de alumbrado público de calidad es cada vez más importante en diversos espacios públicos. Sin embargo, estos sistemas en la actualidad, a nivel nacional como local no cuentan con tecnologías inteligentes para que permitan su medición y monitoreo. Para abordar estas necesidades, es fundamental proponer e implementar soluciones tecnológicas avanzadas.

En este contexto, las luminarias LED, ampliamente reconocidas por su alta eficiencia energética y bajo impacto ambiental, son la opción predominante para la modernización de la infraestructura de alumbrado público. No obstante, la medición y el monitoreo de las variables de estas luminarias representan un desafío ya que los métodos tradicionales de mantenimiento, basados en inspecciones manuales, resultan ineficientes y costosos.

Con el paso del tiempo, estas luminarias se vuelven susceptibles a diversas fallas; entre las más comunes se encuentran, el desgaste de los componentes eléctricos, la exposición a condiciones climáticas adversas y las fluctuaciones en el suministro eléctrico son algunos de los factores que afectan su funcionamiento y rendimiento. Así mismo con la actualización del sistema de alumbrado público, se logra una disminución en las emisiones de carbono generadas por la producción de electricidad, contribuyendo así a un entorno más sostenible.

Del mismo modo, el enfoque de esta investigación está alineado con la tendencia mundial hacia el uso de tecnologías eficientes. Si bien ya existen diversos estudios que evalúan la eficiencia y la aplicación de la iluminación LED en el sistema de alumbrado público, hay pocos los que abordan la implementación de sistemas de monitoreo autónomos para la detección de fallas de manera eficaz, oportuna y a bajo costo. En este sentido, el desarrollo de este proyecto busca contribuir significativamente a llenar estos vacíos, proporcionando datos valiosos que puedan servir como base para futuras investigaciones en la gestión avanzada del alumbrado público a gran escala.

Por consiguiente, el presente proyecto propone la implementación de un prototipo de medición autónoma que permitirá la detección y reporte de fallas en el sistema de alumbrado público. Este sistema permitirá un monitoreo continuo, optimizando la identificación y respuesta ante fallas. Además, reducirá la dependencia de inspecciones manuales, facilitando una gestión proactiva y remota, lo que contribuirá a mejorar la calidad del servicio y la seguridad pública.

## **1.3 Objetivos**

### **1.3.1 Objetivo general**

Construir un prototipo de gestión remota basado en tecnologías actuales (sensores, microcontroladores y módulo GSM) para el monitoreo, detección y reporte de fallas en luminarias LED de alumbrado público, que permita el uso adecuado de la energía eléctrica y la calidad de la iluminación.

### **1.3.2 Objetivos específicos**

- Revisar la literatura científica y normativa mediante bases de datos especializados para contar con información actualizada y de calidad sobre diferentes mecanismos de detección y reporte de fallas en sistemas de alumbrado público.
- Realizar un análisis técnico del sistema de alumbrado existente, para establecer un marco de referencia sobre su funcionamiento actual.
- Implementar una interfaz de usuario accesible para la visualización y gestión remota del sistema de monitoreo.
- Diseñar un sistema de comunicación mediante el módulo GSM que facilite la transmisión de alertas y reportes sobre el estado operativo de las luminarias LED.

## **1.4 Metodología**

### **1.4.1 Investigación aplicada**

Para abordar el tema propuesto de manera integral, se emplean dos tipos de investigación fundamentales:

- **Tipo documental:** Este método consiste en llevar a cabo un análisis detallado de fuentes científicas especializadas, utilizando bases de datos como Web of Science, Scopus e IEEE Xplore, así como recursos enfocados en tecnología aplicada al alumbrado público, comunicación inalámbrica y sistemas de monitoreo. A través de esta investigación, se obtiene información actualizada sobre los últimos avances y teorías relacionadas con el monitoreo autónomo en luminarias LED, proporcionando un fundamento teórico sólido para el diseño del prototipo.
- **Tipo de campo:** Este tipo de investigación se lleva a cabo en un entorno controlado directamente relacionado con el tema de estudio. En este caso, el prototipo será diseñado, probado y evaluado en el laboratorio de luminotecnia, donde se llevarán a cabo simulaciones y pruebas prácticas para verificar su funcionamiento. Este proceso incluye la revisión y selección de tecnologías como sensores, microcontroladores y módulos GSM, asegurando que los componentes sean los más adecuados y compatibles con el sistema. Las pruebas en el laboratorio permiten obtener datos

precisos y resultados claros, que ayudarán a validar y mejorar el prototipo antes de aplicarlo a sistemas reales de alumbrado público.

#### **1.4.2 Desarrollo de la propuesta**

El sistema propuesto tiene como objetivo la detección y reporte de fallas en las luminarias LED de alumbrado público. Para lograrlo, se utilizarán sensores encargados de medir variables eléctricas clave como el voltaje, corriente, potencia, factor de potencia y el consumo energético, que permitirán identificar posibles fallas en el funcionamiento de las luminarias además de registrar las horas de funcionamiento de las luminarias LED. Los datos recolectados serán procesados por un microcontrolador ESP32 y visualizados en la plataforma de monitoreo Ubidots. Asimismo, mediante un módulo de comunicación GSM, se enviarán reportes periódicos a dispositivos móviles.

Este sistema permitirá detectar fallas como apagones, fluctuaciones de voltaje o cualquier otra anomalía en el funcionamiento de las luminarias, proporcionando alertas automáticas que facilitarán la gestión y el mantenimiento del alumbrado público. La plataforma de monitoreo permitirá un análisis continuo del estado de las luminarias y una pronta respuesta ante cualquier irregularidad.

La presente metodología se sintetiza en siete etapas técnicas, como se muestra en la figura 1, que detallan el proceso completo desde la conceptualización hasta la validación del prototipo. Cada etapa asegura la integración de diversos componentes necesarios para la identificación y notificación de fallas, utilizando tecnología de comunicación inalámbrica GSM y la plataforma Ubidots, que facilita la visualización y el monitoreo constante de variables.

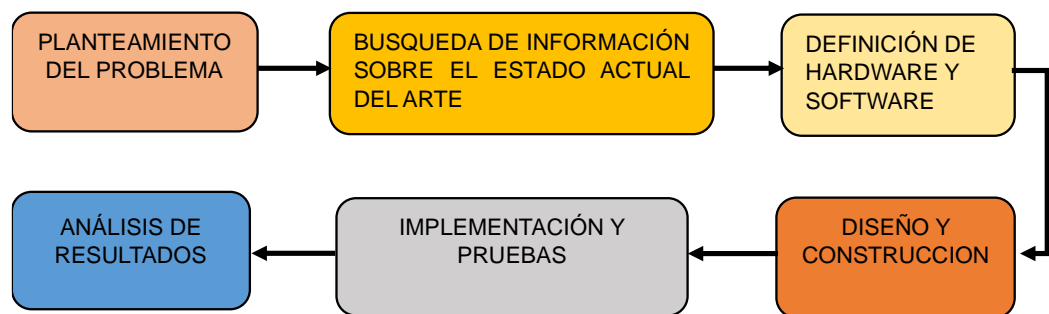
- En esta primera etapa se identificó claramente el problema de investigación, se analizaron posibles soluciones y se destacó su aporte y beneficios, presentando una propuesta para resolverlo de manera efectiva.
- En la segunda etapa, se analiza el impacto de las fallas en las luminarias LED del alumbrado público, evaluando cómo la iluminación inadecuada en los espacios públicos genera desperdicios de energía, afecta la visibilidad y pone en riesgo la seguridad de los usuarios.
  - Se recopiló información a partir de bases de datos como Scopus, Web of Science, Google Académico e IEEE, entre otras, con la finalidad de recopilar datos integrales que brinden una comprensión clara para el diseño del prototipo.
  - Se lleva a cabo una revisión exhaustiva de literatura técnica y científica relacionada con los problemas comunes en luminarias LED de alumbrado público, identificando las principales causas de fallas y su impacto en la iluminación.

- Durante la tercera etapa se identifican los componentes de hardware y software esenciales para el diseño e implementación del prototipo para alumbrado público con tecnología LED:
  - Se examinan y eligen cuidadosamente sensores que puedan medir con precisión parámetros eléctricos, así como también su compatibilidad con otros componentes del sistema. Estos parámetros incluyen voltaje, corriente, potencia, factor de potencia y el consumo de energía, además del tiempo de operación.
  - Evaluación de módulos GSM que garanticen una conexión estable y el envío eficiente de los datos recolectados mediante redes de telefonía celular además de su compatibilidad con los microcontroladores.
  - Se realiza una comparación técnica entre diferentes microcontroladores, como el ESP32 y Arduino, considerando varios factores. Entre ellos se incluye su capacidad de procesamiento para gestionar las tareas de monitoreo, su compatibilidad con los sensores seleccionados y la facilidad que ofrecen para ser programados.
  
- En la cuarta etapa se procede al diseño de la estructura, funcionalidad e interacciones del sistema a través de un modelo conceptual que combina hardware y software de manera integral.
  - Elaborar un diagrama general del circuito para planificar y visualizar la conexión de todos los elementos del sistema.
  - Se diseña una caja de protección especialmente destinada para resguardar el circuito del prototipo.
  - Definir la arquitectura de comunicación, especificando el proceso para la captura, procesamiento y transferencia de datos desde el sistema principal hacia los servidores en la nube, así como el envío de mensajes SMS a los dispositivos móviles.
  - Crear diagramas de flujo que detallen los algoritmos de programación, incluyendo las tareas de monitoreo para cada variable, la comunicación inalámbrica y la transmisión de datos al sistema de supervisión.
  
- En la quinta etapa de enfoco en la construcción e integración de los componentes seleccionados, incluyendo el desarrollo de algoritmos para control y monitoreo.
  - Hardware:
    - Montar los componentes, como los sensores, módulos de comunicación y microcontroladores en un protoboard para realizar las calibraciones iniciales y las pruebas de programación utilizando el entorno Arduino IDE.

- Realizar una placa electrónica que facilite el ensamblaje ordenado de los componentes electrónicos.
    - Construir una caja protectora para el circuito, proporcionando seguridad y protección frente a factores externos que puedan comprometer su funcionamiento y durabilidad.
  - Software:
    - Programar el microcontrolador para procesar las variables medidas por los sensores y generar alertas ante fallas detectadas.
    - Diseñar interfaces gráficas en Ubidots para visualizar parámetros como voltaje, corriente, potencia, factor de potencia, consumo de energía y horas de funcionamiento
    - Hay que asegurar que el módulo GSM transmita los datos medidos por los sensores hacia el teléfono móvil por medio de notificaciones SMS
    - Realizar pruebas iniciales del código para identificar y corregir errores de compilación.
- En la sexta etapa se valida el funcionamiento del prototipo bajo condiciones simuladas que representen un entorno de alumbrado público.
  - Ejecutar pruebas de medición de variables eléctricas, transmisión de datos, al mismo tiempo que se visualizan en la plataforma Ubidots y se envían notificaciones de forma periódica a dispositivos móviles, asegurando que los datos sean accesibles de manera eficiente para los usuarios responsables del monitoreo.
  - Instalar el prototipo en el laboratorio de luminotecnia, conectándolo a un sistema de luminarias LED simulado.
  - Se registra de manera detallada cómo responde el sistema bajo distintas condiciones de carga y fallas simuladas. Esto incluye el análisis de las mediciones realizadas por los sensores y la evaluación del rendimiento del prototipo frente a situaciones que podrían presentarse en un entorno real de alumbrado público.
  - Identificar y corregir errores relacionados con precisión, estabilidad de comunicación y sincronización entre sensores y microcontrolador.
  - Recolectar datos durante un período definido, observando parámetros eléctricos y detección de fallas en tiempo real, evaluando su efectividad en el monitoreo continuo.

En la última etapa se genera un documento final que compile los resultados obtenidos, análisis técnicos y posibles mejoras futuras.

- Comparar los resultados obtenidos con las especificaciones iniciales y evaluar la efectividad del sistema en la detección de fallas en luminarias LED de alumbrado público.
- Elaborar un informe final de las pruebas para su posterior publicación de los resultados obtenidos.
- Proponer mejoras en hardware y software, considerando avances tecnológicos y posibles limitaciones identificadas durante la implementación.
- Redactar conclusiones que destaquen la contribución del proyecto al monitoreo autónomo de alumbrado público en el contexto de ciudades inteligentes, promoviendo la sostenibilidad y la innovación tecnológica.



**Figura 1.** Diagrama de flujo de la metodología.

**Fuente:** Elaboración propia.

## CAPÍTULO II

### 2 MARCO TEÓRICO

#### 2.1 Sistema de Iluminación

Según Sáenz et al.(2024), describen un sistema de iluminación como la combinación de dispositivos y configuraciones destinadas a asegurar una distribución de luz homogénea y controlada. A través de esta definición, los autores destacan la importancia de una configuración precisa para alcanzar niveles óptimos de iluminación. Asimismo, (Fillipo et al., 2010) sugieren que un diseño de sistema de iluminación debe tener en cuenta tanto el rendimiento, la calidad y la eficiencia lumínica de los componentes como las características arquitectónicas del lugar. En particular, para los sistemas con tecnología LED, enfatiza la necesidad de adaptar el diseño a las especificaciones del espacio y a las necesidades del usuario final.

##### 2.1.1 Alumbrado Público

En Ponce (2023), se indica que un alumbrado público confiable es fundamental para facilitar la movilidad, garantizar la seguridad, embellecer el entorno y apoyar la práctica de deportes, de tal manera que se logre una iluminación eficiente y constante en las áreas públicas, proporcionando visibilidad adecuada para el desarrollo seguro de actividades nocturnas. Esto permite reducir accidentes, mejorar la percepción de seguridad y fomentar el uso de espacios al aire libre durante la noche.

##### 2.1.2 Facturación del alumbrado público

De acuerdo con Pulla (2013), nos indica que la facturación del alumbrado público en Ecuador se fundamenta en los principios tarifarios establecidos por la regulación CONELEC 008/2011. Esta regulación define los lineamientos para calcular los costos del servicio de alumbrado público general. Dichos costos son recuperados a través de los usuarios del servicio eléctrico, diferenciados por categorías (residencial, comercial e industrial), y distribuidos según el nivel de utilización del alumbrado público (Consejo Nacional de Electricidad, 2011).

Además Pulla (2013), señala que en el 2012, el CONELEC demostró que los ingresos generados por este servicio deben destinarse exclusivamente a cubrir los costos operativos del alumbrado público. En consecuencia, se ha dispuesto que el costo por alumbrado no supere el 20% del valor facturado por el servicio eléctrico. Del mismo modo afirma en base a esto que la CENTROSUR ha implementado porcentajes específicos para cada categoría de cliente:

- **Residencial:** 14% del consumo.
- **Comercial:** 18,5% del consumo y demanda.
- **Industrial:** 3,5% del consumo y demanda.

De igual manera a través de la Agencia de Regulación y Control de Electricidad (2019), por medio de la resolución N° 051/18 que regula la tarifa de alumbrado público en Ecuador, vigente desde 2019, establece un sistema tarifario basado en 14 rangos de consumo, aplicados a sectores como residencial, comercial, industrial, entre otros. En lugar del sistema anterior, que se fundamentaba en porcentajes sin respaldo técnico, el nuevo enfoque implementa una tarifa fija mensual (USD/abonado) ajustada según el consumo de energía en busca de una mayor equidad, eficiencia energética.

Así, los usuarios residenciales con consumos entre 0 y 700 kWh/mes pagarán entre 0,11 USD y 7,97 USD, mientras que aquellos con consumos superiores a 700 kWh/mes tendrán tarifas entre 21,16 USD y 179,54 USD. Este ajuste responde a la necesidad de cubrir los costos del servicio con base en estudios técnicos y garantizar su calidad (Ministerio de Energía y Minas, 2019).

### **2.1.3 Elementos del sistema de Iluminación**

Los sistemas de iluminación integran una serie de componentes, como lámparas, circuitos eléctricos, electrónicos, mecánicos y ópticos con la finalidad de dirigir, transformar y controlar el sistema de iluminación. Estos dispositivos deben cumplir con las normativas vigentes establecidas en el país, para garantizar su adecuado desempeño y adaptarse a distintas condiciones ambientales, asegurando así su funcionalidad continua (L. L. Chabla & Córdova, 2015).

### **2.1.4 Características técnicas de las lámparas de alumbrado público**

Franco & Israel (2017), nos indica que las lámparas para alumbrado público deben cumplir con una serie de características clave que garantizan su eficiencia y funcionalidad. Estas cualidades son esenciales para su rendimiento óptimo y se consideran de la siguiente manera:

#### *1.- Eficacia luminosa:*

Desde el punto de vista de Monroy (2006), lo determina como un indicador clave que mide el rendimiento energético de una lámpara o fuente luminosa, de tal manera que evalúa su capacidad para transformar la energía eléctrica en energía radiante visible de manera eficiente, lo que se expresa matemáticamente en la ecuación:

$$\eta = \frac{\phi}{P} \quad (1)$$

**En donde:**

$\Phi$  = Flujo luminoso en lúmenes (Lm)

P = Potencia eléctrica en vatios (W)

$\eta$  = eficiencia luminosa en Lm/W

Además Campisi et al. (2018) expresan como un parámetro esencial para evaluar el rendimiento energético en las luminarias LED, especialmente en el contexto de la transición energética que muchas ciudades están adoptando para modernizar sus sistemas de iluminación. Una alta eficiencia luminosa no solo optimiza el consumo eléctrico, sino que también contribuye a la sostenibilidad ambiental y la reducción de costos operativos.

**2.- Vida útil:**

Este factor está relacionado con el tiempo de vida útil de la lámpara, el cual influye directamente en el costo por lumen-hora (Franco & Israel, 2017). Su duración depende de variables técnicas y operativas como:

- **Vida útil real:** El tiempo que la lámpara permanece operativa bajo las condiciones específicas de instalación y uso.
- **Evolución del flujo luminoso:** Cómo se reduce el flujo de luz a lo largo del tiempo debido al envejecimiento de la lámpara.

Consideran Franco & Israel (2017), desde el punto de vista económico, la duración de la vida útil también está influenciada por el precio de la lámpara, los costos de instalación y el costo de reemplazo. Sin embargo, es fundamental considerar otros aspectos adicionales, aunque de menor relevancia, que afectan a la calidad de la instalación de alumbrado público.

- **Temperatura de color:** Este parámetro describe el color de la luz emitida por la lámpara y se clasifica en tres categorías principales:
  - **Cálido:** Con un tono blanco-amarillento, con una temperatura de color de alrededor de 3300° K.
  - **Intermedio:** Con una apariencia blanco-neutro, cuyo rango de temperatura de color se encuentra entre 3300° K y 5300° K.
  - **Frío:** Con un tono blanco-azulado, con una temperatura de color superior a los 5300° K.

Bajo esta perspectiva, estos aspectos resultan fundamentales al elegir las lámparas apropiadas para el alumbrado público, debido a su impacto en la calidad de la iluminación, la eficiencia energética y el mantenimiento del sistema.

## 2.1.5 Potencia Eléctrica

### 2.1.5.1 Potencia instantánea

Para Hayt et al. (2007), definen a la potencia instantánea como la potencia suministrada a cualquier dispositivo eléctrico que depende del tiempo, la cual se obtiene mediante el producto de la corriente y la tensión instantáneas, donde en la ecuación (3) se muestra el cálculo de la potencia instantánea para señales senoidales.

$$p(t) = v(t)i(t) \quad (2)$$

$$p(t) = V_m \cos(\omega t + \theta_v) * I_m \cos(\omega t + \theta_i) \quad (3)$$

#### En donde:

$p(t)$  = Es la potencia instantánea.

$V_m$  y  $I_m$  = Amplitud máxima de la tensión y la corriente, respectivamente.

$\omega$  = Es la frecuencia angular de la señal

$\theta_v$  = Ángulo del voltaje

$\theta_i$  = Ángulo de la corriente

$t$  = Es el tiempo en que se mide la potencia instantánea.

### 2.1.5.2 Potencia activa o promedio (P)

Sostienen Hayt et al. (2007) que es el valor promedio de la potencia instantánea, y no depende del tiempo. Asimismo, mencionan que corresponde a la potencia utilizada por los equipos para realizar su trabajo, siendo la potencia deseada, de tal manera su unidad de medida es el vatio (W). Según la ecuación (4) la potencia promedio, en watts, es el promedio de la potencia instantánea a lo largo de un periodo.

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt \quad (4)$$

#### En donde:

$P$  = Es la potencia activa o promedio.

$T$  = Es el período del ciclo de la señal

$p(t)$  = Es la potencia instantánea en función del tiempo

Asimismo, en una carga resistiva (R) la potencia es absorbida todo el tiempo, mientras que una carga reactiva (L o C) absorbe una potencia promedio o nula. Se demuestra en la ecuación (5) que la potencia promedio puede expresarse como:

$$P = \frac{1}{2} V_{ef} * I_{ef} * \cos(\theta_v - \theta_i) \quad (5)$$

#### En donde:

$P$  = Potencia Activa o promedio

$V_{ef}$  = es el valor eficaz de la tensión.

$I_{ef}$  = es el valor eficaz de la corriente.

$(\theta_v - \theta_i)$  = son los ángulos de fase de la tensión y la corriente, respectivamente.

### 2.1.5.3 Valor eficaz (RMS)

Las ecuaciones (6) y (7), representa el voltaje y la corriente eficaces, también denominado valor cuadrático medio, se describe como cualquier corriente o tensión periódica que resulte igual al valor de la corriente o tensión continua que, al fluir a través de una resistencia entrega la misma potencia promedio (Hayt et al., 2007).

1. Voltaje eficaz o rms:

$$V_{ef} = \frac{V_m}{\sqrt{2}} \quad (6)$$

**En donde:**

$V_{ef}$  = Es el valor eficaz o RMS del voltaje.

$V_m$  = Es el valor máximo o de pico del voltaje de la señal alterna.

2. Corriente eficaz o rms:

$$I_{ef} = \frac{I_m}{\sqrt{2}} \quad (7)$$

**En donde:**

$I_{ef}$  = Es el valor eficaz o RMS de la corriente.

$I_m$  = Es el valor máximo o de pico de la corriente alterna.

En sistemas eléctricos, los valores eficaces se utilizan ampliamente en la transmisión y distribución de energía, ya que permiten calcular con precisión la potencia real consumida o transmitida en el sistema.

### 2.1.5.4 Potencia reactiva (Q)

Mencionan Hayt et al. (2007), que es la energía que circula entre capacitores e inductores en el sistema eléctrico para mantener campos eléctricos y magnéticos. Aunque no produzca trabajo útil, es esencial para la estabilidad de la red y su unidad son los voltamperios reactivos (VAR). Asimismo, la potencia reactiva se calcula mediante la ecuación (8):

$$Q = V_{ef} I_{ef} \text{sen}(\theta_v - \theta_i) \quad (8)$$

**En donde:**

$Q$  = Potencia reactiva.

$V_{ef}$  = Valor eficaz de la tensión.

$I_{ef}$  = es el valor eficaz de la corriente.

$(\theta_v - \theta_i)$  = son los ángulos de fase de la tensión y la corriente, respectivamente.

**2.1.5.5 Potencia aparente o compleja (S)**

Relacionan Hayt et al. (2007), como el resultado de la combinación vectorial de la potencia real y la potencia reactiva en un sistema eléctrico cuyo valor refleja la capacidad total de un sistema para transferir energía, incluyendo tanto el componente que realiza trabajo útil como el que mantiene los campos electromagnéticos. Así mismo la unidad es el voltamperio (VA). Donde la ecuación (9) representa a la potencia aparente (S) como una cantidad compleja que combina dos componentes, mientras que la ecuación (10) expresa la potencia aparente (S) en términos de los valores eficaces de la tensión ( $V_{ef}$ ) y la corriente conjugada ( $I_{ef}$ ) en el sistema eléctrico.

$$S = P + jQ \quad (9)$$

$$S = V_{ef} I_{ef}^* \quad (10)$$

**En donde:**

$S$  = Potencia aparente o compleja

$V_{ef}$  = Valor eficaz de la tensión.

$I_{ef}$  = Es el valor eficaz de la corriente conjugada.

**2.1.5.6 Factor de Potencia**

De acuerdo con lo planteado por Hayt et al. (2007), esta magnitud mide la eficiencia del uso de energía eléctrica en un sistema, donde un FP cercano a 1 indica pérdidas mínimas y representa una condición ideal, mientras que los valores bajos reflejan mayor desperdicio energético como se lo expresa en la ecuación 11.

$$Fp = \cos(\theta_v - \theta_i) = \frac{|P|}{|S|} \quad (11)$$

**En donde:**

$|P|$  = Magnitud de la potencia activa.

$|S|$  = Magnitud de la potencia aparente.

### 2.1.5.7 Kilovatio-hora (kWh)

Conforme a lo señalado por Sandoya (2021), es una unidad que mide la energía consumida o generada durante un tiempo determinado, utilizada para la facturación del consumo eléctrico. Inicialmente, la energía se calcula utilizando vatios (W) y segundos (s), como se muestra en la ecuación (12). No obstante, para expresar dicha energía en kilovatios-hora (kWh), se requiere convertir las unidades, tal como se describe en la ecuación (13). De este modo, cuando la demanda de potencia aumenta, también lo hace la energía consumida.

$$E = P(W) * t(s) \quad (12)$$

**En donde:**

$E$  = Representa la energía eléctrica total consumida o generada

$P(W)$  = Es la potencia en vatios (W)

$t(s)$  = Es el tiempo medido en segundos (s).

$$E = \left[ \left( P(W) \times \frac{1KW}{1000W} \right) * \left( t(s) \times \frac{1h}{3600s} \right) \right] \quad (13)$$

$$E = \left[ \frac{P}{3600000} \right] (Kwh)$$

### 2.1.6 Luminarias

Las luminarias son dispositivos de iluminación que gestionan la luz emitida por una o varias fuentes luminosas para distribuirla, filtrarla o modificarla según el entorno de aplicación. Estas incluyen componentes esenciales para el soporte, fijación y protección de las lámparas, asegurando tanto su estabilidad como su rendimiento (Franco & Israel, 2017).

En la actualidad, las lámparas LED para alumbrado público destacan por su mayor eficiencia energética, su larga vida útil y capacidad para ofrecer una iluminación uniforme. Esto contribuye a reducir significativamente el consumo de energía y los costos de mantenimiento a largo plazo, superando así a tecnologías más antiguas como las de vapor de sodio de alta presión y las de mercurio que han sido ampliamente utilizadas por décadas.

### 2.1.7 Tipos de luminarias utilizadas en el Alumbrado Público.

En las instalaciones de alumbrado público se emplean diversos tipos de luminarias, siendo las más comunes las siguientes:

### **2.1.7.1 Lámparas de vapor de sodio**

Para Alcívar Centeno et al. (2023), las lámparas de vapor de sodio son una tecnología de iluminación eficiente que emplea vapor de sodio para generar luz amarilla brillante, destacándose por su alto rendimiento luminoso. Se clasifican en:

- Baja presión (SBP): Más eficientes, generan hasta 200 lúmenes por vatio, pero tienen baja capacidad de reproducción cromática.
- Alta presión (SAP): Usadas en alumbrado público, combinan buen rendimiento (80-150 lúmenes por vatio) con mejor reproducción cromática.

Estas lámparas poseen una estructura resistente al calor y la corrosión, requieren balastos y arrancadores para funcionar, y tienen una vida útil de aproximadamente 24,000 horas. Su principal aplicación es en alumbrado vial y urbano, aunque la luz monocromática limita su uso en espacios donde el color es crítico.

### **2.1.7.2 Lámparas de vapor de mercurio**

Además Alcívar Centeno et al. (2023), sostiene que las lámparas de vapor de mercurio a alta presión funcionan mediante la descarga de gas en un tubo de cuarzo que contiene mercurio y argón. Operan en dos etapas: ignición y estabilización. A bajas presiones, emiten principalmente radiaciones ultravioletas, mientras que al incrementar la presión producen un espectro más visible (violeta, azul, verde y amarillo), siendo utilizadas en aplicaciones donde se requiere menos mantenimiento y alta luminosidad de manera rápida.

### **2.1.7.3 Lámparas de halógenos metálicos**

Para Malagón & Sánchez (2021), este tipo de dispositivos representan una variante de las lámparas de vapor de mercurio, se caracterizan por su elevada eficiencia lumínica, excelente capacidad para reproducir colores y su flexibilidad espectral. Esto se debe, principalmente, a la incorporación de aditivos como el yoduro de sodio, el talio o el indio. Sin embargo, aunque brindan un rendimiento notable y una vida útil aproximada de 10.000 horas, presentan ciertas limitaciones, ya que requieren un periodo de estabilización durante el encendido, además de un sistema especializado para operar a altas tensiones en las que funcionan.

### **2.1.7.4 Lámparas de descarga por inducción.**

Como lo mencionan Franco & Israel (2017), las lámparas de descarga por inducción, basadas en un inductor de ferrita, eliminan los electrodos, extendiendo su vida útil. De tal manera que ofrecen ahorros energéticos del 20% frente a lámparas de vapor de sodio y del 50% comparadas con las de vapor de mercurio, siendo ideales para alumbrado público por su eficiencia y bajo mantenimiento.







### 2.1.7.5 Luminarias LED

En base a lo que indica Ruiz & Martínez (2019), una luminaria de estado sólido emplea diodos emisores de luz (LED) como fuente de iluminación, ofreciendo mayor eficiencia energética y reducción del consumo en comparación con las lámparas convencionales, además de ser libre de sustancias tóxicas. Particularmente Los Leds, como semiconductores, emiten luz cuando la corriente eléctrica circula en una sola dirección.

### 2.1.7.6 Clasificación de las luminarias LED

Para llevar a cabo un análisis de las luminarias LED, estas se han organizado en la tabla 1.

**Tabla 1.** Clasificación de luminarias LED.

TIPOS DE LUMINARIAS LED				
LUMINARIA	ESTRUCTURA INTERNA	PARTE O COMPUESTO	EFICIENCIA LUMINOSA (lm/W)	IMAGEN
Bombilla LED	Orgánico	LED con óptica primaria	50 - 60	
Bombilla Par	Inorgánico		50 - 60	
Dicroicas LED		Placas de circuito Impreso PCB	50 - 60	
RGB LED			30 - 40	
Fluorescente LED		Módulos LED	60 - 70	
Downlight LED			70 - 80	
Streetlight			70 - 120	
Highbay			80	

**Fuente:** Elaboración propia.

#### 2.1.7.6.1 Clasificación según su estructura interna

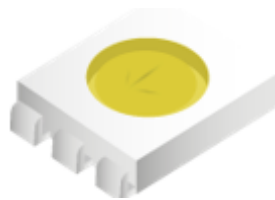
La clasificación según la estructura interna se refiere al tipo de material empleado en la fabricación de las luminarias. De esta forma, se pueden agrupar en dos categorías principales: materiales orgánicos e inorgánicos (Chabla & Córdova, 2015). Los LED utilizan materiales inorgánicos para emitir luz mediante energía eléctrica. los OLED emplean películas orgánicas que generan luz ante una estimulación eléctrica. Por lo tanto, son comunes en pantallas y monitores por su alta calidad de imagen (Chantera & Tobar, 2023).

### 2.1.7.6.2 Clasificación según su parte o compuesto

La clasificación se realiza según la estructura externa o los componentes integrados en estos dispositivos, los cuales son diseñados por los fabricantes para adaptarse a aplicaciones específicas (Chantera & Tobar, 2023).

#### 1.- LED con óptica primaria:

Son dispositivos LED básicos diseñados con una óptica integrada que direcciona y concentra la luz emitida. Fabricados de manera individual como se muestra en la figura 2, estos Leds independientes ofrecen gran versatilidad, lo que permite su implementación en una amplia gama de aplicaciones (Ingeniería SDL, 2011).

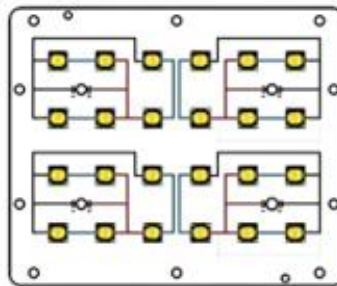


**Figura 2.** Led con fibra óptica primaria.

**Fuente:** (L. Chabla & Córdova, 2015).

#### 2.- LED con placas PCB:

Son Leds montados en placas de circuito impreso preconfiguradas para facilitar su instalación, como se muestra en la figura 3. Aunque ofrecen simplicidad y rapidez de implementación, tienen un campo de aplicaciones más limitado en comparación con los Leds con óptica primaria (Chantera & Tobar, 2023).



**Figura 3.** LED con placas PCB.

**Fuente:** (Chabla & Córdova, 2015).

### 2.1.7.7 Elementos de una luminaria LED de alumbrado público

Para Dumalux (2023), los elementos principales de una luminaria LED de alumbrado público incluyen, como se ilustra en la figura 4:

- Placa LED: Superficie donde se montan los Leds, encargada de emitir luz.

- Soporte para brazo: Sistema de anclaje que asegura la fijación estable de la luminaria, diseñado según su tamaño y peso.
- Aletas disipadoras de calor: Elementos que regulan y disipan el calor generado, fundamentales para mantener el rendimiento y la durabilidad de los Leds en condiciones de alta potencia.
- Driver: Dispositivo que regula la energía de la red eléctrica para alimentar los Leds, funcionando como transformador interno o externo. Además de estabilizar el flujo eléctrico, protege el sistema contra sobrecargas y prolonga la vida útil del equipo.



**Figura 4.** Elementos de una luminaria led.

**Fuente:** (Dumalux, 2023).

### **2.1.8 Alimentación y regulación en sistemas de alumbrado LED**

Para Orlando (2018), los sistemas de iluminación LED requieren una alimentación eléctrica adaptada a sus características operativas, lo que impide su conexión directa a la red eléctrica. Para cumplir con esta necesidad, se emplea un dispositivo especializado denominado driver, cuyo propósito principal es transformar, regular y acondicionar el voltaje y la corriente provenientes de la red.

### **2.1.9 Mantenimiento del sistema de alumbrado público:**

De acuerdo con el Ministerio de Minas Y Energía (2024), indica que el mantenimiento del sistema de alumbrado público exige políticas claras que aseguren niveles mínimos de iluminación y cumplan con un esquema de mantenimiento planificado. Los operadores deben priorizar y corregir fallas según su criticidad, registrar y clasificar daños, y analizar sus causas para optimizar materiales y métodos de mantenimiento. Del mismo modo se recomienda reemplazar luminarias cuando su flujo luminoso baje al 70% de su capacidad inicial, garantizando eficiencia y funcionalidad.

### **2.1.9.1 Mantenimiento preventivo**

Menciona el Ministerio de Minas Y Energía (2024), que el mantenimiento preventivo en los sistemas de alumbrado público, conforme a la normativa del RETILAP (Reglamento Técnico de Iluminación y Alumbrado Público), tiene como objetivo evitar fallas mediante acciones programadas que incluyen diagnósticos eléctricos, fotométricos y análisis de componentes, realizados con técnicas adecuadas y personal capacitado. Las mediciones periódicas garantizan niveles óptimos de iluminación según normativa y permiten ajustes en los esquemas de mantenimiento para asegurar la calidad del servicio

### **2.1.9.2 Mantenimiento correctivo**

Además, ratifica el Ministerio de Minas Y Energía (2024), que el mantenimiento correctivo del alumbrado público implica identificar fallas, reparar componentes eléctricos, ópticos y mecánicos, reemplazar elementos defectuosos (luminarias, drivers, herrajes), y gestionar la poda de árboles para optimizar el rendimiento y la funcionalidad del sistema.

### **2.1.10 Alumbrado público con luminarias LED**

Según Orlando (2018), lo define como un sistemas de alumbrado que integra un conjunto de tecnologías y componentes para crear un sistema funcional. Este sistema combina la fuente de luz LED con los elementos necesarios para asegurar su rendimiento adecuado, proteger los componentes más sensibles y proporcionar los circuitos auxiliares necesarios junto con la conexión adecuada a la red eléctrica. La tecnología LED ha demostrado ser significativamente superior a las fuentes de luz tradicionales en varios aspectos clave, lo que la convierte en una opción ideal para aplicaciones de alumbrado público y otros sistemas de iluminación. Las principales ventajas incluyen (Orlando, 2018).

- Una eficacia luminosa notablemente alta que se mantiene y mejora con el avance continuo de la tecnología. Esto se traduce en una mayor cantidad de luz generada por unidad de energía consumida.
- Excelente eficiencia cromática, ya que, al ser fuentes monocromáticas, las Leds permiten obtener una amplia gama de colores sin necesidad de filtros.
- Alta fiabilidad operativa, con una vida útil entre 50,000 y 100,000 horas, lo que equivale a unos 15 años de funcionamiento en aplicaciones de alumbrado público.
- Optimización de los recursos operativos debido a la reducción de los costos de mantenimiento gracias a su durabilidad.
- Emisión predominantemente de luz visible, reduciendo niveles significativos de radiación ultravioleta (UV) o infrarroja, lo que los hace más seguros para la salud humana y menos propensos a afectar el medio ambiente.

- Alto índice de reproducción cromática, que asegura una calidad luminosa precisa.
- Regulación sencilla ofreciendo opciones de control avanzadas como el control de fase, 1-10V, DALI, y protocolos inalámbricos, lo que facilita su integración en sistemas inteligentes de gestión de iluminación.
- Proporcionan el 100% de su flujo luminoso de forma inmediata al ser encendidos, sin tiempos de calentamiento.

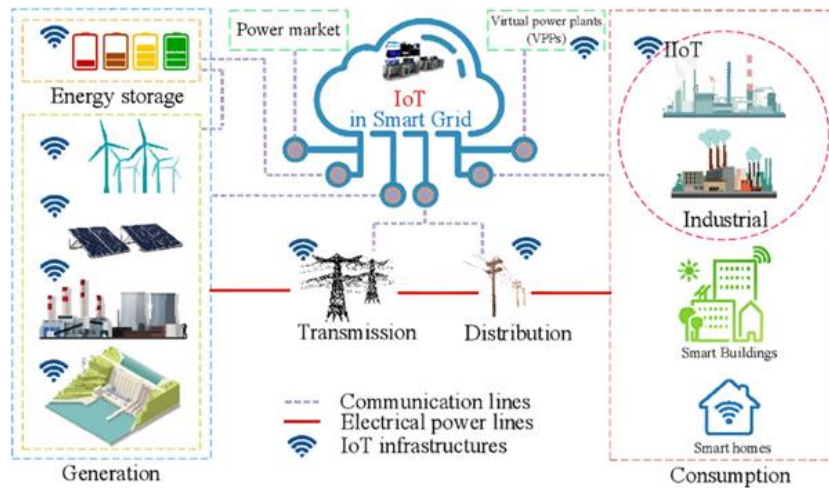
#### **2.1.11 Iluminación LED Inteligente en el alumbrado público**

La iluminación LED inteligente en el alumbrado público integra tecnologías de alta eficiencia lumínica con sistemas de control y monitoreo avanzados, ofreciendo múltiples beneficios sustanciales en términos de sostenibilidad, eficiencia energética y desarrollo urbano. De acuerdo con estudios recientes realizados por Arquiled (2022), afirma que este sistema ha demostrado ser una solución eficaz para reducir significativamente el consumo energético, con una disminución de entre un 50 % y un 80 % en comparación con las luminarias tradicionales. Estos avances se deben a la mayor eficiencia de los LED y a la capacidad de los sistemas inteligentes modernos de optimizar el uso de la energía eléctrica.

#### **2.1.12 Smart City – Smart Grid**

Las Smart Cities y las Smart Grids son elementos clave en la transformación de los entornos urbanos hacia un futuro más sostenible y eficiente. En este sentido Nejad et al. (2017) mencionan una Smart City se caracteriza por integrar tecnologías digitales y de comunicación para optimizar recursos y mejorar la calidad de vida de sus ciudadanos, gestionando eficientemente el transporte, la energía, la salud, la seguridad y otros servicios públicos.

Además Nejad et al. (2017) afirman que la Smart Grid permite gestionar de manera eficiente la generación, distribución y consumo de energía eléctrica, como se muestra en la figura 5. A través del uso de tecnologías de automatización, comunicación y monitoreo, estos sistemas optimizan el flujo de electricidad y facilita la integración de fuentes de energía renovable. Asimismo, incorpora capacidades de autorreparación, lo que posibilita la detección, clasificación y corrección de fallas sin necesidad de intervención externa, garantizando así la continuidad del suministro eléctrico.



**Figura 5.** El paradigma del IoT en las redes eléctricas inteligentes.

**Fuente:** (Shahinzadeh et al., 2019).

## 2.2 Sistemas para medición y adquisición de la información

En los últimos años, la gestión de sistemas eléctricos ha experimentado una notable evolución hacia una mayor eficiencia energética, gracias a la implementación de sistemas avanzados de monitoreo y control. Estos sistemas se basan en el uso de tecnologías como sensores inteligentes, microcontroladores y módulos de comunicación, los cuales destacan por su alta flexibilidad, bajo costo y eficiencia operativa.

### 2.2.1 Plataforma hardware open source.

#### 2.2.1.1 Arduino

Da a conocer Herrador (2009), que Arduino se establece como una plataforma de código abierto orientada al desarrollo de dispositivos interactivos, que combina hardware y software flexibles para facilitar la creación de proyectos electrónicos. Básicamente esta plataforma permite la recepción de señales de sensores y el control de dispositivos externos, como luces, motores y otros actuadores, a través de un microcontrolador programado con el Arduino Programming Language (basado en Wiring) y el Arduino Development Environment (IDE) (basado en Processing). Además Herrador (2009), ratifica que Arduino ofrece varias ventajas frente a otros sistemas de microcontroladores, como se detalla a continuación:

- Las placas son más económicas y pueden ser ensambladas manualmente, reduciendo aún más los costos.
- El software es compatible con Windows, macOS y GNU/Linux, superando las limitaciones de plataformas exclusivas para Windows.
- El entorno de desarrollo (IDE) es fácil de usar para principiantes y suficientemente robusto para usuarios avanzados.

- Las herramientas de programación son de código abierto y ampliables mediante librerías en C++.
- Está basado en microcontroladores ATmega de Atmel, y su diseño, bajo licencia Creative Commons, permite crear versiones personalizadas para extender funcionalidades o disminuir costos.

## 2.2.2 Microcontroladores

Son circuitos integrados que contiene un circuito digital complejo que combinan en un solo chip un procesador central, memoria (RAM, ROM, EPROM), puertos de entrada/salida y otros periféricos necesarios para controlar dispositivos y ejecutar tareas específicas (Domínguez et al., 2009).

### 2.2.2.1 Esp32

El ESP32, desarrollado por Espressif Systems, es un microcontrolador de bajo costo con conectividad WiFi y Bluetooth. Incluye un procesador de doble núcleo, 520 KB de SRAM, y soporta interfaces como UART, SPI e I2C. Además, cuenta con periféricos como ADC, DAC y PWM, y ofrece múltiples GPIO como se muestra en la figura 6 y la tabla 2, para conectar sensores y actuadores ideal para crear dispositivos de monitoreo versátiles. Para más detalles técnicos, se puede consultar la documentación oficial de Espressif Systems (Espressif Systems, 2020).

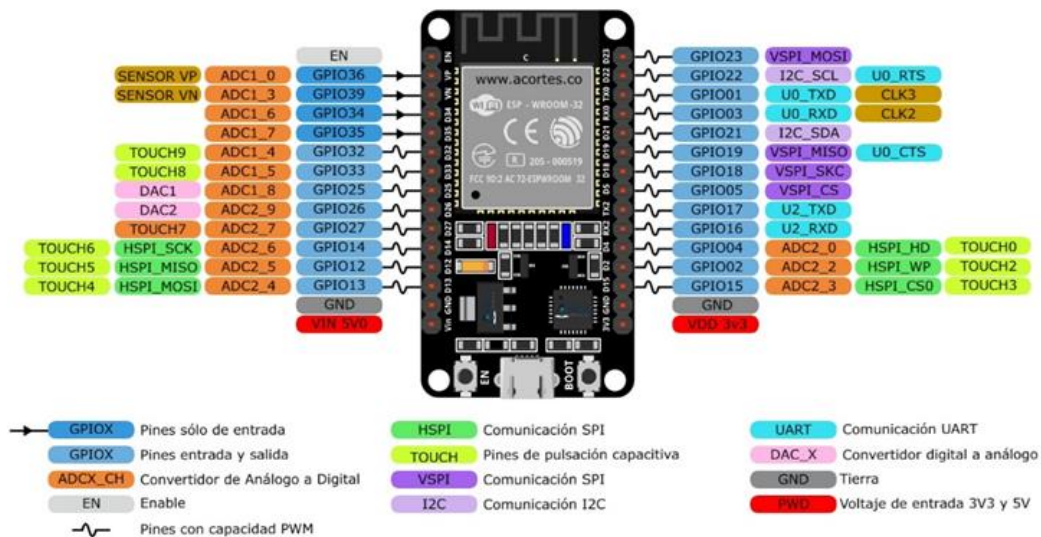


Figura 6. Distribución de los pines ESP32 WIFI.

Fuente: (Cortés, 2022).

**Tabla 2.** Características técnicas del módulo ESP32 WIFI.

Parámetro	Especificación
Modelo	ESP32-DevkitC-V4
Núcleo del MCU	ESP32-D0WDQ6
CPU	Dual core Tensilica LX6 (32 bit)
ROM	448 KB
SRAM	520 KB
Memoria Flash	4 MB
Seguridad	WPA, WPA2, WPA2-Enterprise, WPS
Frecuencia de Reloj	240 MHz
Voltaje de Alimentación	MicroUSB: 5 VDC, Directo: 5 VDC
Corriente de Operación	Mín. 80 mA – Máx. 500 mA
Protocolos Wi-Fi	802.11 b/g/n (hasta 150 Mbps en 802.11n)
Rango de Frecuencia Wi-Fi	2.4 GHz ~ 2.5 GHz

**Fuente:** Elaboración propia.

### 2.2.3 Sensores

Los sensores son dispositivos o componentes diseñados para detectar y medir cambios en variables físicas, químicas o ambientales, y convertir estos datos en señales eléctricas que puedan ser procesadas por circuitos electrónicos o microcontroladores. En el caso particular del alumbrado público para la detección de fallas en luminarias LED, se emplean los siguientes tipos de sensores

#### 2.2.3.1 Sensor de Voltaje AC ZMPT101B

Los sensores de voltaje AC son módulos diseñados específicamente para medir tensiones alternas, se basan en la inducción electromagnética. De tal manera el módulo de transformador de voltaje convierte voltajes altos en niveles manejables para su medición, es ajustable y adecuado para sistemas de domótica, con alta precisión, buena linealidad y aislamiento eléctrico hasta 3000V, dicho sensor se muestra en la figura 7 y sus características detalladas se presentan en la tabla 3.(Iglesias & Varas, 2020).



**Figura 7.** Sensor de voltaje ZMPT101B.

**Fuente:** (Iglesias & Varas, 2020).

**Tabla 3.** Características del módulo sensor de voltaje ZMPT101B.

Parámetro	Especificación
Modelo	ZMPT101B
Rango de Medición	0 - 250 V AC
Precisión	±0.5%
Voltaje de Operación	5V
Salida	Analógica

**Fuente:** Elaboración propia.

### 2.2.3.2 Sensor Corriente SCT013-000

Los transformadores de corriente, utilizados para medir corriente alterna, funcionan mediante inducción electromagnética. Fáciles de instalar, miden con precisión corrientes de hasta 100A y son ideales para aplicaciones en protección de circuitos y gestión de energía. Este sensor se muestra en la figura 8 y sus características detalladas se presentan en la tabla 4 (Iglesias & Varas, 2020).



**Figura 8.** Sensor de Corriente SCT013.

**Fuente:** (Iglesias & Varas, 2020).

**Tabla 4.** Características del sensor corriente SCT013-000.

Parámetro	Especificación
Modelo	SCT-013-000
Rango de Medición	0 - 100 A
Precisión	±1%
Voltaje de Operación	3.3V - 5V
Salida	Analógica (mV/A)

**Fuente:** Elaboración propia.

## 2.2.4 Módulos de Comunicación

### 2.2.4.1 Módulo de Comunicación GSM/GPRS/GPS SIM808

Dispositivo compacto que integra funciones de GSM, GPRS y GPS, lo cual permite realizar llamadas, enviar y recibir SMS, transmitir datos por GPRS y obtener ubicación GPS.

Opera en frecuencias de 850, 900, 1800 y 1900 MHz, lo que asegura compatibilidad global. Además, la programación a través de comandos AT facilita su uso con el módulo ESP32, siendo una opción versátil para prototipos de comunicación. Su bajo consumo energético y ranura para tarjeta SIM permiten la conexión eficiente a redes móviles, haciéndolo adecuado para el envío de datos y recepción de comandos. Este módulo se muestra en la figura 9 y sus especificaciones técnicas se presentan en la tabla 5 (Álvarez, 2017).



**Figura 9.** Tarjeta electrónica SIM800L

**Fuente:** (Álvarez, 2017).

**Tabla 5.** Características del Módulo GSM.

Parámetro	Especificación
Modelo	SIM800L
Frecuencia	850/900/1800/1900 MHz
Voltaje de Operación	3.4V - 4.4V
Consumo de corriente (max):	500 mA
Conectividad	GPRS, SMS, Llamadas
Interfaz	UART (TX/RX)

**Fuente:** Elaboración propia.

## 2.3 Sistemas de comunicación para el monitoreo remoto

La creciente demanda de transmitir datos, voz y video ha promovido el desarrollo de diversas tecnologías de acceso, sobresaliendo la transmisión inalámbrica por su sencilla instalación y conectividad, especialmente en lugares donde no es posible implementar sistemas cableados. En el ámbito del alumbrado público, las tecnologías avanzadas facilitan la interconexión de los componentes y su monitoreo desde centros de control, permitiendo la transmisión de información mediante cables o de forma inalámbrica a través de ondas electromagnéticas.

### 2.3.1 Redes inalámbricas

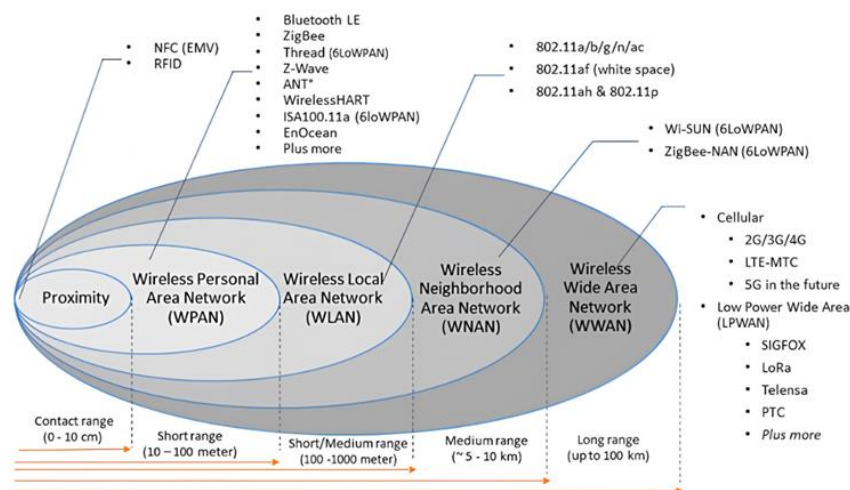
Para Rojas (2020), las redes inalámbricas son sistemas de comunicación que permiten la transmisión de datos, voz o video entre dispositivos sin necesidad de utilizar cables físicos. Utilizan ondas electromagnéticas, como radiofrecuencia, microondas o infrarrojos, como

medio de transmisión, facilitando la conectividad en diferentes entornos, ya sea a corta o larga distancia, además de permitir la transmisión de información a altas velocidades sin depender de la ubicación física del receptor.

Estas redes son esenciales en la tecnología moderna, ya que posibilitan el acceso a internet, la comunicación móvil y la interacción entre dispositivos en tiempo real. Asimismo, tecnologías como WiFi, 4G, 5G e IoT destacan por su flexibilidad y escalabilidad, siendo clave para la conectividad global y el desarrollo de aplicaciones innovadoras como las ciudades inteligentes. A continuación, se describen detalladamente cada una de las tecnologías inalámbricas disponibles hasta la actualidad.

### 2.3.2 Tecnologías inalámbricas

En la figura 10 se ilustra la clasificación de las redes inalámbricas en cuatro categorías según su alcance y aplicación, siendo estas redes tales como de área personal (WPAN), de área local (WLAN), de área metropolitana (WMAN) y de área amplia (WWAN). A si mismo estas redes se clasifican de corto y largo alcance. Las redes de corto alcance, como WPAN y WLAN, funcionan en espacios limitados, como hogares o edificios, y operan en bandas de frecuencia sin licencia, generalmente en 2.4 GHz y 5 GHz, lo que facilita su expansión sin necesidad de permisos. Por otro lado, las redes de largo alcance, como WMAN y WWAN, cubren áreas extensas (Salazar, 2017).



**Figura 10.** Clasificación de las redes inalámbricas.

**Fuente:** (Camaravalencia, s. f.)

#### 2.3.2.1 WPAN: Redes de Área Personal Inalámbricas

Según Rojas (2020), las redes inalámbricas de área personal (WPAN) permiten la comunicación y transferencia de datos entre dispositivos electrónicos de corto alcance, como

teléfonos móviles, tablets y computadoras, dentro de un espacio reducido. Para (Rojas, 2020), existen varias tecnologías comunes utilizadas en las redes de área personal inalámbricas (WPAN), entre las que se destacan: Bluetooth: Tecnología inalámbrica de corto alcance que facilita la comunicación y transferencia de datos entre dispositivos compatibles.

- **IrDA:** Tecnología basada en señales infrarrojas para la transferencia de datos entre dispositivos cercanos.
- **Zigbee:** Protocolo inalámbrico de baja potencia, ideal para aplicaciones de IoT y automatización del hogar.

### **2.3.2.2 WLAN: Redes de Área Local Inalámbricas**

Como lo determina Rojas (2020), las redes inalámbricas de área local (WLAN) ofrecen una cobertura de hasta 100 metros y se utilizan en espacios como hogares, oficinas y campus. En este sentido, los estándares WiFi han experimentado una evolución constante con el propósito de responder a las necesidades de velocidad, cobertura, eficiencia, compatibilidad y adaptación a nuevas tecnologías. Como resultado, estas redes continúan siendo prácticas y competitivas en un mundo cada vez más interconectado. Existen varios estándares comunes utilizados en las redes de área local inalámbricas (WLAN), que definen las especificaciones técnicas y las velocidades de transferencia de datos. Algunos de los estándares más populares son:

- **802.11n:** Estándar que permite velocidades de transferencia de datos de hasta 600 Mbps y mejor rendimiento en comparación con los estándares anteriores.
- **802.11ac:** Estándar que permite velocidades de transferencia de datos de hasta varios gigabits por segundo y mejor rendimiento en redes congestionadas.
- **802.11ax:** Estándar en desarrollo que promete velocidades de transferencia de datos aún más altas y una mayor eficiencia en la comunicación inalámbrica.

### **2.3.2.3 WMAN: Redes de Área Metropolitana Inalámbricas**

Señala Salazar (2017), que las redes de área metropolitana inalámbricas (WMAN) son sistemas de comunicación inalámbrica que se utilizan para proporcionar conectividad en un área geográfica más amplia, como una ciudad o una región urbana, ofreciendo una velocidad alta de transferencia (20-70 Mbps) con alcance de 50 km. Las redes de área metropolitana inalámbricas (WMAN) utilizan diferentes tecnologías para brindar conectividad, como:

- **WiMAX:** Worldwide Interoperability for Microwave Access (Acceso Mundial Interoperable para Microondas) es una tecnología de comunicación inalámbrica que permite la transmisión de datos a largas distancias con velocidades de transferencia de datos elevadas.

- **LTE:** Long-Term Evolution es una tecnología utilizada en las redes de comunicación móvil de cuarta generación (4G) que proporciona velocidades de transferencia de datos rápidas y una baja latencia.

#### **2.3.2.4 WWAN: Redes de Área Amplia Inalámbricas**

Del mismo modo señala Salazar (2017), que ofrecen conectividad en zonas extensas, como áreas rurales o remotas. Emplean tecnología celular para ofrecer servicios como telefonía móvil e Internet. Así mismo menciona Aulla (2014), que una red celular está conformada por celdas que se interconectan para cubrir un área geográfica, distribuidas en forma de hexágonos. Las celdas tienen frecuencias asignadas, que se reutilizan en celdas no adyacentes para evitar interferencias, permitiendo que miles de usuarios usen dispositivos móviles simultáneamente. Desde su origen en los años 80, las WWAN han evolucionado a través de diversas generaciones tecnológicas:

- 1G: Llamadas de voz analógicas con velocidades de hasta 2,4 kbps.
- 2G: Introducción de tecnología digital (GSM) con mensajes de texto y velocidades de hasta 64 kbps.
- 2.5G: Mejora con GPRS, alcanzando hasta 144 kbps.
- 3G: Transferencias de datos de hasta 2 Mbps, introducida en el año 2000.
- 3.5G: Avances como HSDPA, logrando velocidades de hasta 14 Mbps.
- 4G: Incremento significativo, alcanzando hasta 1 Gbps.
- 5G: Introducida en 2020, promete velocidades ultra rápidas, baja latencia y capacidad para soportar más dispositivos conectados.

Además, las tecnologías específicas para IoT incluyen:

- NB-IoT: Red de bajo consumo para conectar dispositivos a largas distancias. Este sistema celular emplea frecuencias de radio con licencia, permitiendo la conexión eficiente de diversos dispositivos IoT a largas distancias.
- LTE Cat M1: Solución económica y eficiente para IoT, con velocidades de hasta 1 Mbps. Se utiliza en aplicaciones como seguimiento de activos y monitoreo industrial.

## **2.4 Sistemas de Monitorización, Gestión y Virtualización**

El acceso a plataformas tecnológicas resulta fundamental para la supervisión, control y simulación del comportamiento de los sistemas eléctricos, permitiendo monitorear en tiempo real las variables operativas de los sistemas y tomar decisiones oportunas. En este contexto, las tecnologías integradas en nuestro dispositivo incluyen:

- **Internet de las Cosas (IoT):** Esta tecnología facilita el almacenamiento, visualización y modificación en tiempo real de las variables operativas en una base de datos, optimizando la gestión y análisis de los sistemas de iluminación de alumbrado público.
- **Sistema Global para Comunicaciones Móviles (GSM):** Este estándar global para redes móviles permite la transmisión de voz y mensajes de texto (SMS) a largas distancias. Por lo tanto, constituye una solución accesible para que los operadores obtengan información precisa sobre el estado de las luminarias desde cualquier lugar en el que se encuentren, utilizando únicamente un teléfono móvil.

#### **2.4.1 La telegestión**

Para Sandoya (2021), es un sistema avanzado de control y monitoreo remoto que integra tecnologías como la generación distribuida, las redes eléctricas inteligentes (Smart Grids) y los medidores inteligentes en el contexto de una Smart City. Su objetivo principal es permitir la obtención de información en tiempo real sobre el consumo de energía, facilitando así una gestión eficiente de los recursos energéticos y una facturación precisa basada en el uso real. En este contexto, la tele gestión puede considerarse como una aplicación específica del IoT en el contexto de las Smart Cities y el sector energético. Utiliza tecnologías IoT, como sensores, redes de comunicación y análisis de datos, para mejorar la eficiencia en la gestión de recursos.

#### **2.4.2 Internet de las Cosas (IoT)**

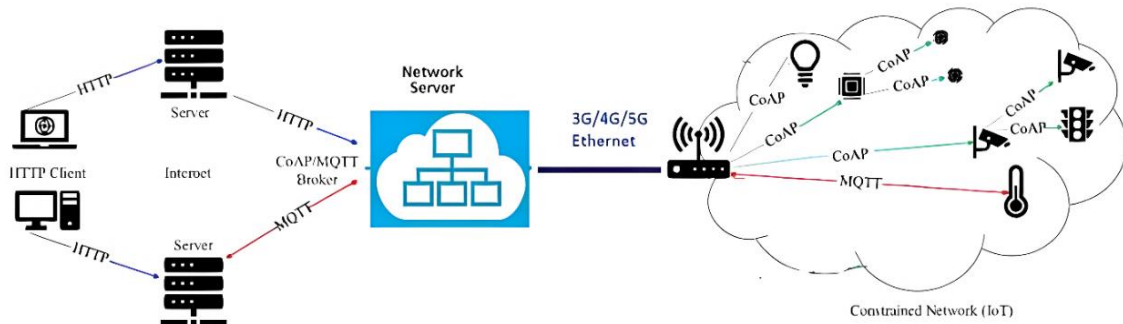
Como lo expresan Saleem et al. (2019), el Internet de las Cosas (IoT) es un ecosistema que conecta objetos físicos al entorno digital mediante tecnologías y protocolos estandarizados para la monitorización, gestión y automatización. Se basa en tres pilares: dispositivos inteligentes (sensores, actuadores, cámaras, escáneres laser, GPS, etc.), conectividad entre dispositivos (WiFi, ZigBee, Bluetooth, redes celulares) y semántica para interpretar datos eficientemente.

Además, tal como lo mencionan Saleem et al. (2019), el IoT ha transformado sectores como salud, transporte, seguridad, agricultura y redes eléctricas, permitiendo la automatización y comunicación eficiente entre dispositivos y sistemas externos. Su capacidad para integrar tecnologías avanzadas ha optimizado procesos y facilitado decisiones inteligentes en tiempo real.

##### **2.4.2.1 Ecosistema del IoT**

La Figura 11, se ilustra un ecosistema del Internet de las Cosas (IoT) estructurado en capas: nodos, conectividad, datos y aplicación. Los nodos incluyen dispositivos inteligentes como sensores y actuadores, que recopilan datos y los transmiten mediante protocolos como

CoAP y MQTT a través de redes 3G/4G/5G o Ethernet. La conectividad asegura la comunicación eficiente, mientras que la capa de datos procesa y gestiona la información en un servidor central. Finalmente, la capa de aplicación permite a los usuarios interactuar con los datos para monitoreo, análisis y toma de decisiones.



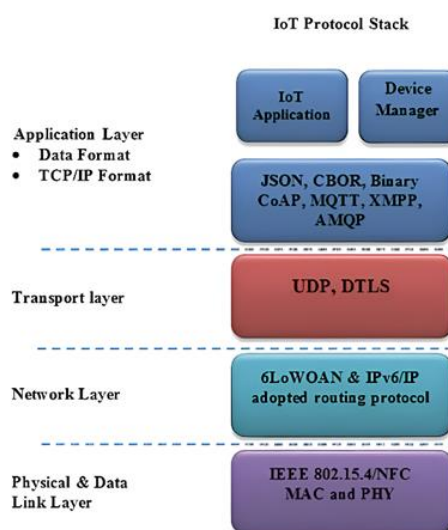
**Figura 11.** Ecosistema IoT

**Fuente:** (Farnell, s. f.).

## 2.4.2.2 Protocolos y medios de enlace

### 2.4.2.2.1 Pila de protocolos IoT

Manifiesta Dusuniot (2022), que los protocolos IoT son estándares que actúan como un "lenguaje" común para que los dispositivos puedan intercambiar información entre sí o con plataformas. Esta se organiza en capas al igual que el modelo TCP/IP, en la Figura 10 se pueden comprobar los diferentes protocolos de los que hace uso la especificación para gestionar y controlar los diferentes enlaces y conexiones. Además, la tecnología IoT opera dentro de la banda de frecuencia asignada, utilizando redes de baja potencia y ancho de banda optimizado, que permite garantizar la comunicación eficiente y estable entre los dispositivos conectados.



**Figura 12.** Pila de protocolos IoT.

**Fuente:** (Boke et al., 2021).

Desde una perspectiva técnica según Dusuniot (2022), los protocolos IoT de datos emergentes operan mediante varias capas:

- **Formato de Datos:** Define cómo se estructuran los datos (Binary, JSON, CBOR) para que sean compactos y eficientes en dispositivos IoT.
- **Capa de Aplicación:** Proporciona protocolos como CoAP, MQTT y AMQP para el intercambio de datos entre dispositivos IoT y aplicaciones.
- **Capa de Transporte:** Garantiza la transmisión de datos con protocolos como UDP (rápido) y DTLS (seguro).
- **Capa de Internet:** Gestiona la dirección y el enrutamiento de datos con IPv6 y 6LoWPAN para redes IoT de baja potencia.
- **Capa de Red/Enlace:** Define la conexión física y la transmisión en redes inalámbricas con estándares como IEEE 802.15.4 (Zigbee).

#### **2.4.2.2.2 Protocolos de nube:**

Estos protocolos se encargan de estructurar y codificar la información que se intercambia a través de las redes de acceso de tal manera funcionan como el lenguaje que permite a los dispositivos IoT interpretar los mensajes de manera uniforme y eficiente.

- **MQTT (Message Queuing Telemetry Transport):** Para Chucas (2022), este protocolo sigue un modelo de publicación-suscripción, ideal para redes con múltiples dispositivos de tal manera que un servidor central, conocido como broker, actúa como intermediario para recibir y distribuir mensajes de manera jerárquica y eficiente.
- **CoAP (Protocolo de aplicación restringido):** Sostiene Barbara (2024), que este protocolo fue diseñado para dispositivos con limitaciones de recursos, emplea el modelo REST de HTTP, combinado con características como soporte de multidifusión, baja sobrecarga y compatibilidad con UDP, lo que lo hace ideal para aplicaciones con restricciones de energía y procesamiento.
- **HTTP:** Agrega Chucas (2022) que este protocolo permite el intercambio de datos en la web mediante una arquitectura cliente-servidor y operaciones como GET , POST , PUT y DELETE. Si bien este protocolo es altamente eficiente para comunicaciones entre dos sistemas, presenta limitaciones en IoT al gestionar múltiples sensores que generan datos simultáneamente, dificultando la comunicación masiva hacia un servidor.

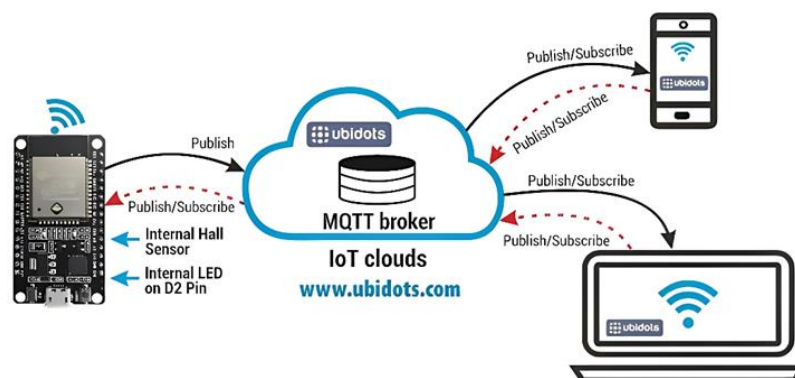
### 2.4.2.3 Importancia de protocolos

Expresa Barbara (2024), que los protocolos IoT son fundamentales para permitir una comunicación eficiente entre múltiples dispositivos con distintos requerimientos, como sensores, actuadores y sistemas de procesamiento y almacenamiento de datos.

- Permiten que dispositivos de diferentes fabricantes y con distintas arquitecturas se comuniquen de manera eficiente.
- Optimizan el consumo de energía al reducir la sobrecarga de comunicación y al administrar mejor los recursos.
- Soportan múltiples tipos de comunicación (bidireccional, unidireccional, en tiempo real, etc.) para adaptarse a diferentes aplicaciones.
- Incorporan medidas para proteger los datos y las comunicaciones frente a ataques cibernéticos.
- Aseguran un intercambio de datos preciso y consistente, incluso en redes congestionadas o en condiciones adversas.
- Facilita la conexión a través de redes de diferentes regiones, utilizando estándares universales.

### 2.4.3 Ubidots

Tal y como lo indica Suyadhi (2019), Ubidots es una plataforma de análisis y visualización en la nube diseñada específicamente para aplicaciones de Internet de las Cosas (IoT). Esta herramienta permite recolectar, procesar y gestionar datos en la nube provenientes de dispositivos conectados, facilitando la creación de soluciones IoT de manera eficiente. La figura 13 ilustra como opera el software Ubidots, donde el microcontrolador ESP32 envía y recibe datos mediante el protocolo MQTT, mientras que Ubidots actúa como un broker en la nube, permitiendo gestionar sensores, actuadores y dispositivos en tiempo real desde dispositivos móviles o computadoras.



**Figura 13.** Plataforma de servidor Ubidots.

**Fuente:** (Suyadhi, 2019).

### **2.4.3.1 Características Principales de Ubidots**

Permite monitorear y analizar datos en tiempo real sin la necesidad de configurar servidores o desarrollar software desde cero. Ofrece herramientas para la creación de dashboards interactivos, facilitando la visualización de datos mediante gráficos y widgets personalizados. Además, es compatible con múltiples protocolos de comunicación, como MQTT, HTTP y TCP/UDP, lo que permite una integración flexible con diversos dispositivos.

Su infraestructura la hace adecuada tanto para prototipos como para despliegues a gran escala. Así mismo, garantiza la seguridad de los datos mediante encriptación y mecanismos de control de acceso (Suyadhi, 2019).

### **2.4.4 Tecnología GSM**

Sostiene Aulla, (2014), que el Sistema Global para Comunicaciones Móviles (GSM) constituye un estándar de comunicación diseñado para dispositivos móviles que emplean tecnología digital de segunda generación (2G). Gracias a su naturaleza digital, los usuarios de GSM pueden establecer conexiones entre sus teléfonos y computadoras, permitiéndoles realizar diversas actividades, tales como menciona (Aulla, 2014):

- Enviar y recibir correos electrónicos.
- Navegar por internet.
- Acceder de manera segura a redes informáticas corporativas (LAN o Intranet).
- Transmitir datos, incluyendo el envío de mensajes mediante el Servicio de Mensajes Cortos (SMS).

El estándar GSM ofrece una capacidad máxima de transmisión de 9.6 kbps, tanto para datos digitales como para voz. En este contexto, se destacan servicios clave como:

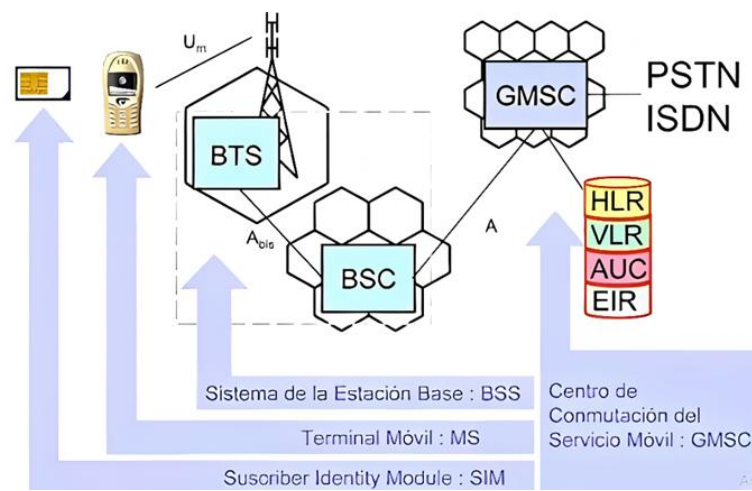
- **MMS:** El Servicio de Mensajes Multimedia, que facilita el envío de contenido como imágenes y videos.
- **SMS:** El Servicio de Mensajes Cortos, diseñado para la transmisión eficiente de textos breves.

#### **2.4.4.1 Comunicación GSM**

Para lograr establecer esta comunicación con un teléfono celular a través de mensajes de texto, como lo indican Guerrero & Remigio (2010), es imprescindible contar previamente con una conexión a una red GSM. En este sentido, se requiere el uso de un módem GSM, así como una tarjeta SIM proporcionada por una empresa de telefonía móvil, lo cual permitirá acceder a dicha red.

### 2.4.4.2 Arquitectura de la red GSM

En la figura 14 muestra la arquitectura del sistema GSM, compuesta por elementos clave que permiten la comunicación móvil. El módulo SIM y el terminal móvil (MS) permiten al usuario conectarse a la red. El Subsistema de la Estación Base (BSS), que incluye la BTS y el BSC, gestiona las transmisiones por radio y garantiza la continuidad del servicio. El Centro de Conmutación de Servicios Móviles (GMSC) conecta la red GSM con otras redes como la PSTN o ISDN y utiliza bases de datos como el HLR, VLR, AUC y EIR para autenticar usuarios y validar equipos. Esta estructura asegura un servicio móvil seguro, eficiente y confiable (Aulla, 2014).



**Figura 14.** Arquitectura de la red GSM.

**Fuente:** (Barros et al., 2013).

### 2.4.4.3 Los sistemas GSM y sus frecuencias de operación

Como lo señala Aulla (2014), los sistemas GSM y sus frecuencias de operación se basan en un conjunto de bandas estandarizadas que permiten su uso a nivel global. En este contexto, es relevante señalar que en Europa predominan las bandas de 900 MHz y 1800 MHz, mientras que en Estados Unidos se utiliza mayormente la banda de 1900 MHz. Por lo tanto, para acceder a una red GSM, es indispensable contar con un módem que sea compatible con estas redes. En el caso de Ecuador, las principales compañías que operan bajo el sistema GSM son Movistar y Claro como se muestra en la tabla 6, cada una utiliza sus respectivas frecuencias de funcionamiento.

**Tabla 6.** Frecuencias de Operación GSM en Ecuador.

OPERADORA	BANDA DE FRECUENCIA
MOVISTAR	850 MHz
CLARO	850 MHz

**Fuente:** Elaboración propia.

#### 2.4.4.4 Mensajería de texto SMS en sistemas GSM

Teniendo en cuenta a Aulla (2014), el servicio SMS (Short Message Services) permite enviar y recibir mensajes de texto de hasta 160 caracteres, que pueden incluir números y caracteres alfanuméricos. Los mensajes pueden enviarse desde terminales móviles, direcciones IP o módems, incluso durante llamadas de voz o transmisión de datos. Este servicio requiere tecnologías como TDMA, CDMA o GSM, y es gestionado por el Centro de Servicios de Mensajes Cortos (SMSC), que se encarga de recolectar, almacenar, transferir y facturar los mensajes.

#### 2.4.4.5 Comandos AT

Tal como lo menciona Aulla (2014), los comandos AT son cadenas de caracteres ASCII que definen un lenguaje de comunicación entre la CPU del sistema y el módem GSM, el cual puede ser utilizado, entre otras funciones, para notificar al usuario mediante mensajes de texto (SMS). Estos comandos, que siempre inician con "AT" y concluyen con un retorno de carro, fueron desarrollados en 1977 por Dennis Hayes con el propósito inicial de configurar módems. Posteriormente, se convirtió en un estándar ampliamente utilizado en la telefonía móvil GSM.

Estos comandos permiten realizar operaciones diversas, tales como realizar llamadas, gestionar contactos, enviar SMS y configurar terminales. Asimismo, se presenta en la tabla 7, un análisis detallado de los comandos AT empleados en la gestión de SMS. Estos comandos poseen una notación específica que facilita su identificación y uso.

**Tabla 7.** Comandos AT empleados en la gestión de SMS.

CÓDIGOS AT PARA SMS	
COMANDOS	SMS MODO TEXTO ACCIÓN
AT+CSMS	Seleccionar Servicio de Mensaje
AT+CMGF	Formato de Mensaje
AT+CSMP	Configurar Parámetros del Modo Texto
AT+CSDH	Mostrar Parámetros del Modo Texto
AT+CSCB	Seleccionar Mensajes de Difusión
AT+CSAS	Guardar Configuración
AT+CRES	Restaurar Configuración
AT+CMGL	Listar Mensajes
AT+CMGR	Leer Mensaje
AT+CMGS	Enviar Mensaje
AT+CMGW	Escribir mensaje en Memoria
AT+CMGD	Escribir Mensaje

**Fuente:** (Guerrero & Remigio, 2010).

## **CAPÍTULO III:**

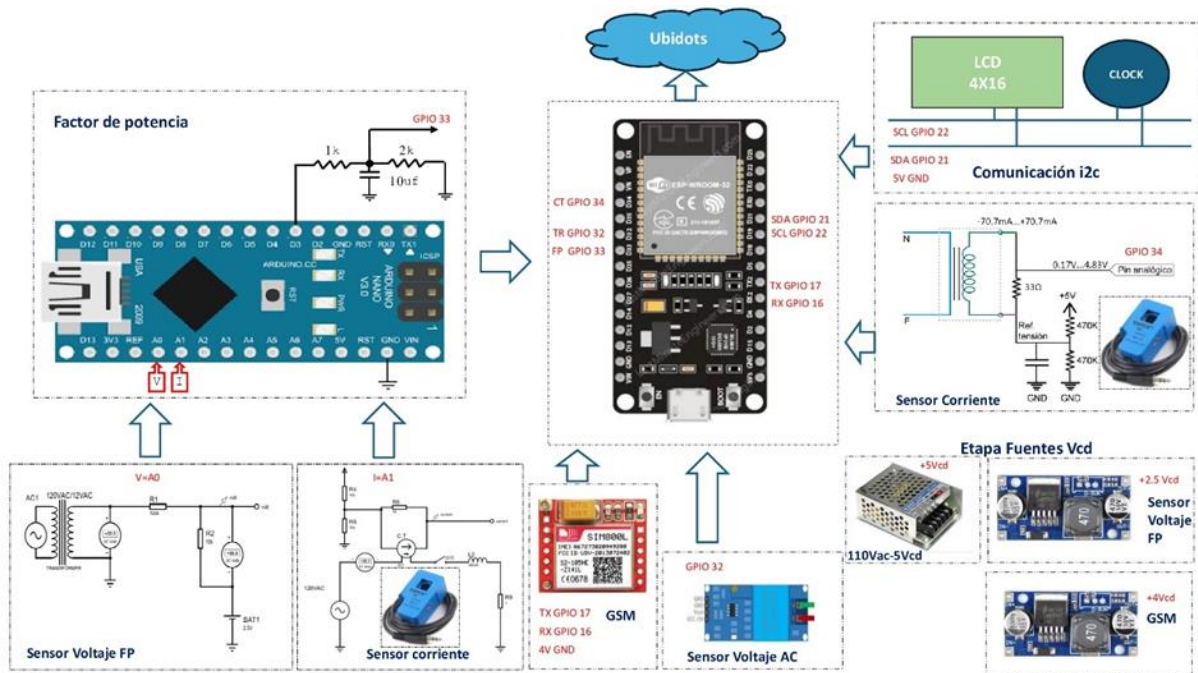
### **3 DESARROLLO DEL PROTOTIPO**

En este capítulo se detalla el desarrollo de un prototipo diseñado específicamente para la medición, monitoreo y detección de fallas en luminarias LED de alumbrado público. El sistema permitirá registrar variables eléctricas como corriente, voltaje, potencia, factor de potencia, consumo de energía y horas de funcionamiento. Para su medición y cálculo, se emplean sensores de corriente y voltaje. Para ello, en la medición y cálculo de estos parámetros, se emplean sensores de corriente y voltaje, los cuales permitirán recopilar información detallada sobre el estado operativo de las luminarias lo que facilitara un control más eficiente del sistema de alumbrado.

El sistema a desarrollarse se implementará utilizando hardware y software de código abierto, empleando componentes electrónicos de fácil acceso en el mercado. En particular, se utilizará el microcontrolador ESP32 y Arduino Nano para establecer la conexión a través de WiFi, lo que permitirá el envío de datos a la plataforma Ubidots mediante protocolos HTTP. Este proceso se complementa con notificaciones vía SMS enviadas de forma periódica sobre el estado operativo del sistema de iluminación y en caso de presentarse fallos en el sistema enviar alertas a un teléfono móvil, posibilitando la visualización de datos en tiempo real, el análisis de tendencias, y una telegestión eficiente del sistema de alumbrado público, garantizando una disponibilidad continua de la información sobre el estado de las luminarias.

Asimismo, este capítulo incluye una descripción detallada de los componentes que conforman el sistema, los dispositivos electrónicos a utilizar, los algoritmos de programación, así como el diseño y ensamblaje del prototipo. Posteriormente, tras la integración de todos los componentes eléctricos y electrónicos, el prototipo será incorporado en un entorno de prueba de alumbrado público simulado en el laboratorio de luminotecnia del CIITT de la Universidad Católica de Cuenca permitiendo su validación en condiciones controladas. Finalmente, tras su implementación, el prototipo estará en condiciones de ser sometido a pruebas, lo que permitirá extraer conclusiones y formular recomendaciones para optimizar su desempeño.

### 3.1 Diagrama general del circuito



**Figura 15.** Diagrama general del circuito.

**Fuente:** Elaboración propia.

La figura 15 describe el circuito de funcionamiento del sistema desarrollado. En primer lugar tenemos el Arduino Nano, el cual calcula el factor de potencia; éste cálculo es posible con la lectura de voltaje alterno proveniente del secundario del transformador (12Vca) más la ayuda de un divisor de tensión ( $R1 = 100k$  y  $R2 = 10k$ ) y una fuente de 2.5 Vcd que sirve como offset este circuito se conecta en el puerto analógico A0 y Transformador de corriente alterna usando la resistencia de shunt (10 ohm) en los terminales del transformador, un divisor de tensión ( $R4$  y  $R5 = 10k$ ) este circuito se conecta al puerto analógico A1; por último, el factor de potencia realiza un mapeo para convertir la señal de factor de potencia a señal PWM (pulse width modulation) de 5Vcd para enviar esta señal al ESP32 (GPIO 33) mediante el puerto D3 del Arduino Nano obtenemos la salida analógica mediante PWM y filtro pasa bajo ( $R=1k$  y  $C=10\mu f$ ).

El ESP32 es el núcleo principal del sistema, gestionando las conexiones con los sensores y módulos periféricos a través de sus pines de entrada/salida digital y analógico. Dicho módulo procesa las señales provenientes de los sensores de voltaje ZMPT101B (GPIO 32), sensor de corriente SCT013-000 (GPIO 34) y factor de potencia (Arduino nano).

Para la comunicación y el monitoreo remoto, el ESP32 aprovecha su conectividad WiFi para transmitir datos a la plataforma Ubidots mediante protocolos HTTP. De manera complementaria, el módulo GSM SIM800L establece una comunicación inalámbrica a través

de los pines UART alimentado a 4Vcd, lo que permite el envío de mensajes SMS con información actualizada sobre el estado del sistema de iluminación.

El sistema también incorpora una pantalla LCD 4x16, conectado al ESP32 mediante el protocolo I2C, el cual muestra información en tiempo real sobre las variables eléctricas monitoreadas como: voltaje, corriente, potencia activa, consumo de energía y factor de potencia. Además, se unifica también al sistema mediante la comunicación I2C el módulo RTC (Real-Time Clock) siendo un reloj en tiempo real que mantiene la fecha y la hora actualizadas, incluso cuando el sistema está apagado o reiniciado, es ideal para el cálculo de consumo energético y como temporizador para el envío de mensajes de texto del GSM para las notificaciones de las variables antes mencionadas.

### 3.2 Definición de hardware y software

#### 3.2.1 Descripción de hardware

Es el conjunto de dispositivos electrónicos que conforman un sistema para monitoreo autónomo y detección de fallas para un grupo de luminarias LED de alumbrado público, en donde mediante microcontroladores y sensores adquieren los datos necesarios para ser procesados y transmitidos por medio de conexión Wifi y comunicación GSM.

##### 3.2.1.1 Selección del microcontrolador

El microcontrolador es la unidad donde se recolectará y procesará los datos adquiridos por los sensores, de acuerdo con las necesidades del prototipo, en la tabla 8 se presenta las características de diferentes microcontroladores.

**Tabla 8.** Tabla comparativa de microcontroladores.

Microcontrolador	Arduino Nano	NodeMCU ESP8266	ESP32
Núcleo	ATmega 328	ESP8266	ESP32
Voltaje de operación	5	5(regulador integrado a 3.3)	5(regulador integrado a 3.3)
I/O Digitales	22	17	24
Voltaje de I/O	5	3.3	3.3
Entradas Analógicas	8	1	18
Memoria Flash	32Kb	4Mb (externa)	4Mb
SRAM	2 Kb	32 Kb	520 Kb
EEPROM	1 Kb	512 b	512 b
Frec. De Reloj	16 Mhz	80Mhz/160Mhz	240Mhz
Comunicaciones	UART/SPI/I2C	UART/SPI/I2C/ WIFI	UART/SPI/I2C/WIFI/ Bluetooth
Precio	\$5.50	\$12	\$15

**Fuente:** Elaboración propia.

Luego de evaluar las características de diversos microcontroladores, se llevó a cabo un análisis técnico que permitió determinar la necesidad de emplear tanto el ESP32 como el Arduino Nano. Esta decisión se fundamentó en la capacidad de ambos dispositivos para realizar la medición de todos los parámetros eléctricos establecidos en la investigación, así como en su compatibilidad con los requerimientos de comunicación y procesamiento.

### 3.2.1.2 Selección de sensor de voltaje

La adquisición de datos de voltaje de la red eléctrica lo realiza el sensor ZMPT101B, por su capacidad para medir voltajes de hasta 250 Vac con una salida ajustable de hasta 5 Vac, gracias a su diseño integrado con transformador y amplificador operacional. Su tamaño compacto facilita la integración, no requiere circuitos externos, y dispone de múltiples librerías para programación, en la Tabla 9 se observa la comparativa de los sensores de voltaje disponibles en el mercado.

**Tabla 9.** Tabla comparativa de sensores de voltaje.

Sensor	ZMPT101B	FZ0430	Transformador (110V a 12V)
Alimentación	5 Vdc	5 Vdc	No requiere
Voltaje que mide	CA	CC	CA
Voltaje de entrada	250 Vac (max)	25 Vdc (max)	110 Vac
Voltaje de salida	5Vac (ajustable)	5 Vdc	12 Vac
Precio	\$7.50	\$5	\$8

**Fuente:** Elaboración propia.

### 3.2.1.3 Selección de sensor de corriente

El censado de corriente se lo puede realizar de distintas maneras como por ejemplo efecto Hall o transformadores de corriente, en la tabla 10 se realiza la comparativa de los sensores de corriente ideales para el uso con microcontroladores.

**Tabla 10.** Tabla comparativa de sensores de corriente.

Sensor	TA12-100	ACS712	SCT013-000 100
Alimentación	5Vdc	5Vdc	No requiere alimentación externa
Corriente de entrada	0-5 A	0-30 A	0-100 A
Salida	0-1V	0-3Vdc	0-50mA
Sensibilidad	200mV/A	100mV/A	± 1%
Resistencia interna	Baja	1.2mOhm	620hm
Invasivo	no	si	no
Precio	\$5	\$4.50	\$10

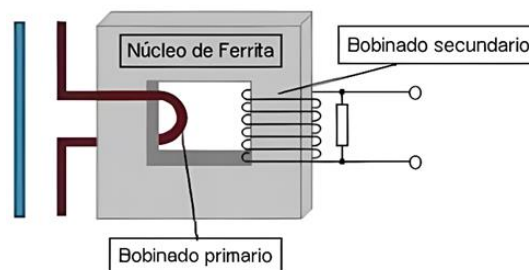
**Fuente:** Elaboración propia.

Terminado el análisis de la Tabla se seleccionó el sensor SCT013-000 100 debido a su capacidad para medir corrientes de hasta 100 A, lo que lo hace ideal para el proyecto. Es un transformador de corriente no invasivo en forma de broche, lo que facilita su instalación sin

necesidad de interrumpir el circuito. Su salida de 0-50 mA puede convertirse en 0-1 V al conectar una resistencia de 20 ohmios en paralelo entre sus terminales.

El principio de funcionamiento del sensor de corriente es similar al de una pinza amperométrica. Al acoplarse al conductor de la red eléctrica, genera inducción electromagnética, obteniendo una señal de corriente. Esta señal, captada por el devanado secundario del sensor, es proporcional a la intensidad que circula por el conductor del servicio eléctrico.

A continuación, en la figura 16 muestra un sensor de corriente basado en un transformador, compuesto por un núcleo de ferrita, un bobinado primario y un bobinado secundario. Además, incluye una resistencia en la salida, que permite obtener una señal proporcional a la corriente del conductor primario para cálculos posteriores.



**Figura 16.** Devanado primario y secundario del sensor.

**Fuente:** (Alonso, 2015).

En la figura 17 se muestra el sensor SCT-013-000, donde se puede apreciar su construcción y la ubicación del núcleo de ferrita. Además, se evidencia que no es invasivo al circuito de la red eléctrica.



**Figura 17.** Interfaz del sensor con el conductor de corriente.

**Fuente:** (Alonso, 2015).

#### **3.2.1.4 Selección de pantalla**

Para la visualización de los datos adquiridos y procesados por el microcontrolador se requiere de una pantalla, en la tabla 11, se observa las características de los módulos más utilizados.

**Tabla 11.** Tabla comparativa de displays

Display	RC2004B (LCD 20x4)	Oled
Resolución	20x4 caracteres	28x64
Táctil	No	No
Color	Monocromático	Monocromático
Costo	\$5	\$7
Comunicación	Bus de datos, I2C	I2C

**Fuente:** Elaboración propia

Para la aplicación en el prototipo se eligió al display RC2004B (LCD 20x4), para una visualización clara y sencilla, permitiendo la presentación de los datos por parte del microcontrolador.

### 3.2.2 Selección del módulo de comunicación

La selección del módulo de comunicación se fundamenta en su capacidad para transmitir información de manera eficiente y confiable dentro de un sistema de comunicación inalámbrica. En este sentido, la opción más adecuada es el módulo GSM, debido a su compatibilidad con redes de telefonía móvil, su amplia disponibilidad en el mercado y su capacidad para operar en frecuencias estandarizadas a nivel global. Estas características técnicas analizadas en base a la tabla 12, permiten su implementación en diversos proyectos y regiones, sin la necesidad de realizar complicadas modificaciones relacionadas con las frecuencias.

**Tabla 12.** Tabla comparativa de módulos de comunicación.

Dispositivo	SIM800L (GSM)	LoRa (Largo Alcance)	HC-05 (Bluetooth)
Alcance	Cobertura global (red celular)	Hasta 10 km	Hasta 10 m
Velocidad de Datos	Máximo 85.6 kbps	Baja (0.3-50 kbps)	1 Mbps
Frecuencia de Operación	GSM: 850/900/1800/1900 MHz	433/868/915 MHz	2.4 GHz
Interfaz de comunicación	UART	UART/SPI	UART
Aplicaciones	SMS, llamadas, IoT, monitoreo remoto	Redes de largo alcance IoT	Comunicación entre dispositivos cercanos
Consumo de Energía	Moderado (~2 mA en reposo)	Muy bajo (~10-15 mA)	Bajo (~30 mA en operación)
Costo	\$4-\$6	\$6-\$10	\$4-\$6

**Fuente:** Elaboración propia.

### 3.3 Descripción de software

En el desarrollo del sistema de prototipado propuesto, se utilizaron diversas herramientas de software para la programación, simulación, diseño y monitoreo. En primer lugar, Arduino IDE permitió la escritura, depuración y carga del código de microcontroladores, facilitando el desarrollo del software para nuestro sistema. De igual manera, Proteus Professional se empleó para el diseño de las placas PCB del prototipo y la simulación de circuitos electrónicos, asegurando el correcto funcionamiento del diseño antes de su implementación física. Por otro lado, Autodesk Inventor fue utilizado para el diseño de la caja protectora del prototipo, permitiendo su modelado en 3D para optimizar la fabricación y ensamblaje. Finalmente, Ubidots proporcionó su plataforma en la nube para la gestión y monitoreo remoto de datos, permitiendo la supervisión en tiempo real de las variables del sistema.

#### 3.3.1 Conexión del prototipo en fase de pruebas.

De acuerdo con el diagrama general mostrado en la figura 15, se realizó la conexión de los componentes principales en la protoboard, incluyendo el ESP32, sensores de corriente, voltaje, el módulo GSM SIM800L, el DS3231 para el registro de tiempo y una pantalla LCD como se muestra en la figura 18, a su vez se realizó la programación en la interfaz ID de Arduino para el microcontrolador ESP32, con el fin de realizar la calibración de los sensores y a la vez asegurando la integración de todos los componentes para su correcto funcionamiento.



**Figura 18.** Conexión inicial de componentes en la placa de pruebas.

**Fuente:** Elaboración propia.

#### 3.3.2 Calibración de sensores

La calibración de los sensores ZMPT101B (voltaje AC) y SCT013-000 (corriente) se llevó a cabo utilizando un ESP32 como controlador principal y el uso de Arduino IDE. Para el

sensor ZMPT101B y EmonLib la calibración de la corriente RMS se define con la constante como se observa en la figura 19.

```
#define currCalibration 2.32
```

**Figura 19.** Calibración de Corriente (ZMPT101B y EmonLib).

**Fuente:** Elaboración propia.

Para calibrar correctamente:

- Se debe conectar una carga conocida (por ejemplo, un foco).
- Uso de multímetro para medir la corriente real.
- Ajuste de la variable currCalibration hasta que la medición del sensor coincida con la del multímetro.

Por ejemplo: si el multímetro mide 2.0 A, pero el código muestra 1.8 A, se tiene que aumentar el valor de currCalibration. Y si muestra 2.2 A, se tiene que reducir dicha constante.

Por otra parte, para calibrar el sensor de voltaje (ZMPT101B) es necesario seguir el mismo procedimiento de ajuste de variables que se presentan en la figura 20.

```
#define SENSITIVITY 600.0f  
#define CALIBRATION_FACTOR 1.10
```

**Figura 20.** Calibración de Voltaje (ZMPT101B).

**Fuente:** Elaboración propia.

De la misma manera la precisión de la lectura del voltaje depende de varios factores, por lo que se deben considerar los siguientes pasos para una calibración adecuada:

- Se tiene que medir con un multímetro el voltaje real de la red eléctrica.
- Ajustar el parámetro CALIBRATION\_FACTOR en el código hasta que la lectura obtenida en el puerto serial del Arduino coincida con la medición del multímetro.

Por ejemplo, si el multímetro indica un voltaje de 127 V, pero la lectura en el puerto serial del Arduino muestra 120 V, será necesario aumentar el valor de CALIBRATION\_FACTOR. En cambio, si la lectura en el código es 130 V, se deberá reducir este parámetro hasta obtener un valor exacto.

Una vez calibrados los sensores, es posible visualizar los valores medidos de voltaje RMS y corriente RMS a través del monitor serial, como se muestra en la figura 21.

```

Output Serial Monitor x
Message (Enter to send message to 'ESP32 Dev Module' on 'COM5')

06:29:44.069 -> Irms: 0.000A, Potencia: 0.000W
06:29:44.069 -> Valor de sensor Corriente :
06:29:44.102 -> 0.000
06:29:44.136 -> Valor de sensor Voltaje :
06:29:44.136 -> 2414
06:29:44.170 -> Vrms: 120.786 VAC
06:29:45.056 -> Irms: 0.000A, Potencia: 0.000W
06:29:45.134 -> Valor de sensor Corriente :
06:29:45.145 -> 0.000
06:29:45.145 -> Valor de sensor Voltaje :
06:29:45.158 -> 1390
06:29:45.158 -> Vrms: 120.560 VAC
06:29:46.060 -> Irms: 0.000A, Potencia: 0.000W
06:29:46.092 -> Valor de sensor Corriente :
06:29:46.124 -> 0.000
06:29:46.124 -> Valor de sensor Voltaje :
06:29:46.156 -> 621
06:29:46.156 -> Vrms: 120.613 VAC
06:29:47.057 -> Irms: 0.000A, Potencia: 0.000W
06:29:47.090 -> Valor de sensor Corriente :
06:29:47.121 -> 0.000
06:29:47.121 -> Valor de sensor Voltaje :
06:29:47.153 -> 176
06:29:47.153 -> Vrms: 120.379 VAC

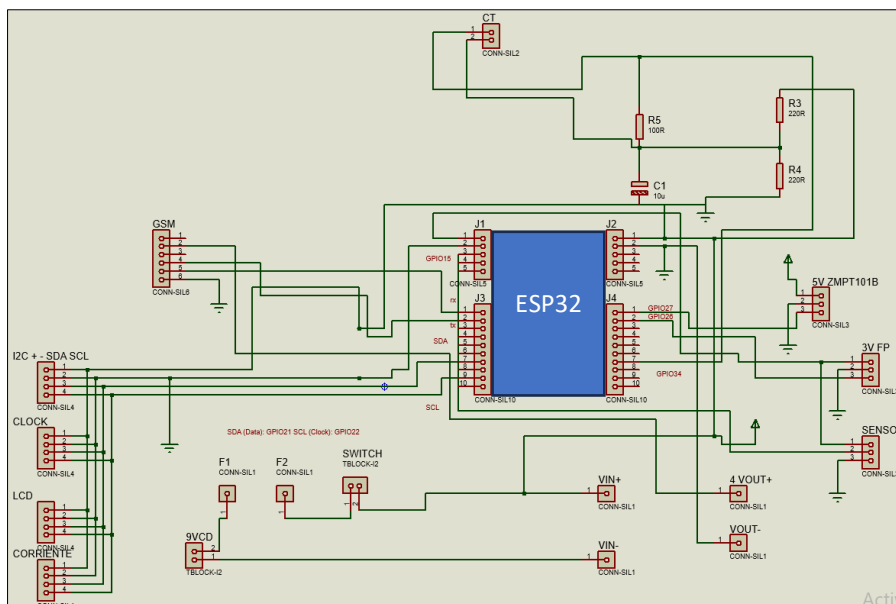
```

**Figura 21.** Monitor serial de Arduino corriente RMS y voltaje RMS.

**Fuente:** Elaboración propia.

### 3.3.3 Diseño del circuito impreso mediante software

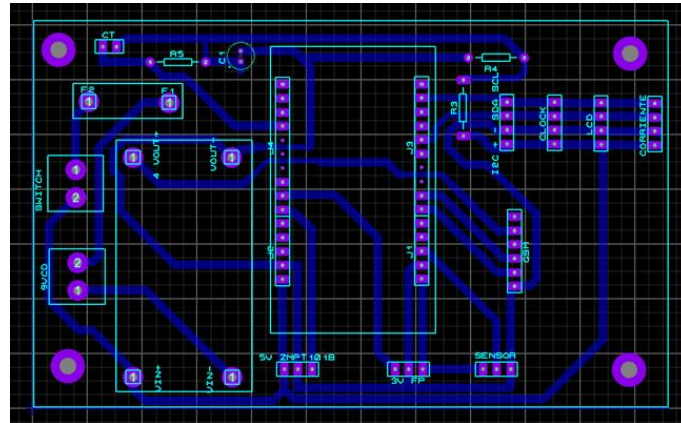
El diseño de las PCB para su impresión se llevó a cabo en el software Proteus 8. Para ello, se establecieron las conexiones tomando como referencia el circuito previamente realizado en el protoboard. Así mismo, con el fin de simular los módulos y microcontroladores, se emplearon los conectores disponibles en la librería de PCB. De tal manera se consideraron elementos clave como las borneras de alimentación, módulos y las conexiones con los sensores, asegurando una correcta integración del sistema para el módulo principal del prototipo, como se ilustra en la Figura 22.



**Figura 22.** Diseño de PCB para el módulo principal del prototipo realizado en Proteus 8.

**Fuente:** Elaboración propia.

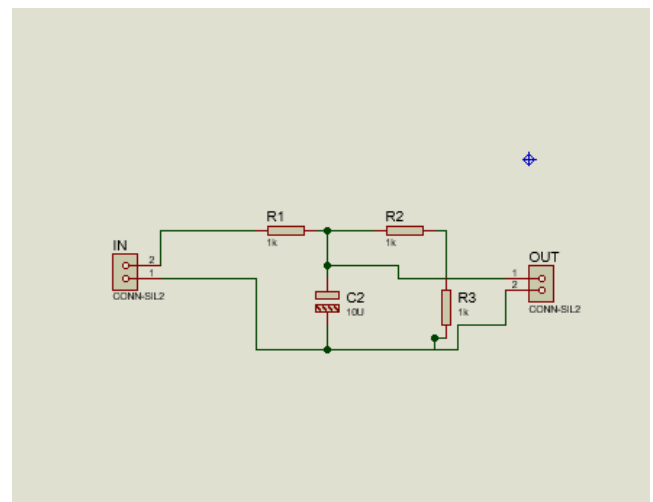
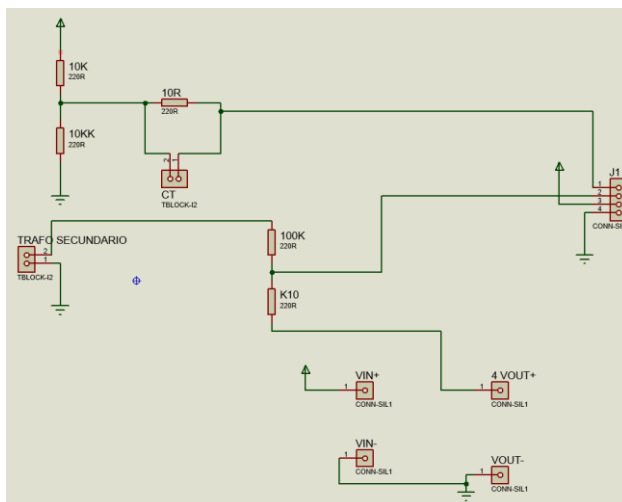
Tras verificar todas las conexiones requeridas, se llevó a cabo el ruteo de las pistas. Para ello, se asegurará una distribución óptima de los componentes, teniendo en cuenta sus dimensiones físicas, con el propósito de prevenir posibles errores en el diseño. Como resultado, el diseño final de la PCB quedó definido, tal como se muestra en la Figura 23.



**Figura 23.** Ruteo de pistas de la placa principal del prototipo.

**Fuente:** Elaboración propia.

Por otra parte, los diseños presentados en la Figura 24 representan lo siguiente: a) la conexión del transformador de corriente a través de la bornera CT, así como la entrada del secundario del transformador (12VCA). La salida de este circuito, denominada bornera J1, incluye las conexiones VCC y GND, las cuales se conectarán a las entradas analógicas A0 y A1 del Arduino Nano. Por otro lado, el diseño b) corresponde al circuito destinado a la conversión de una señal PWM en una señal analógica.



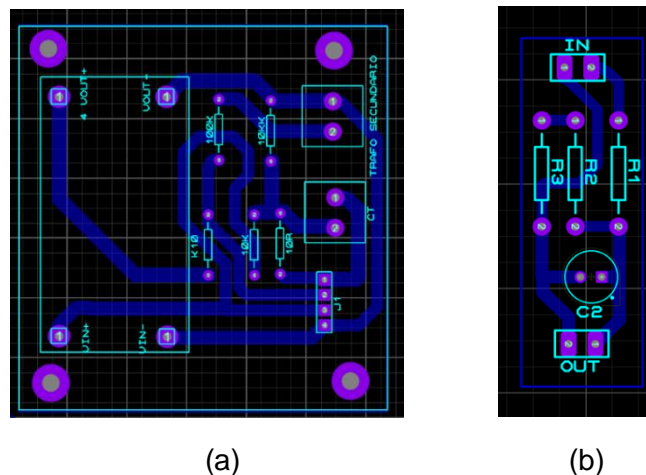
(a)

(b)

**Figura 24.** Diseño del circuito impreso para medir voltaje y corriente alterna, b) Diseño del circuito impreso para convertidor de señal PWM.

**Fuente:** Elaboración propia.

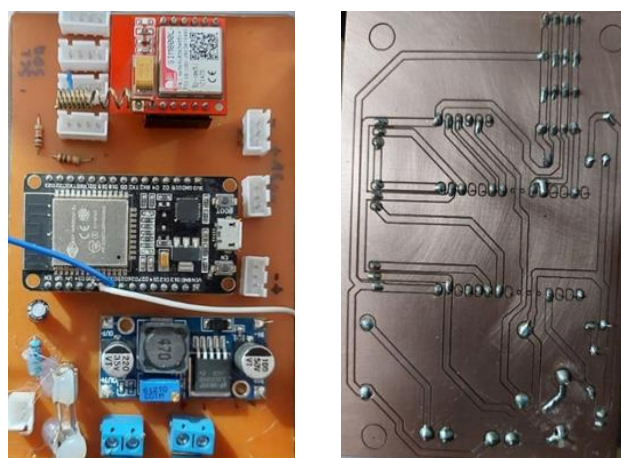
De igual forma, al igual que en el diseño anterior realizado, es necesario dibujar las pistas y los pads que interconectan los elementos. En la Figura 25, se muestran dos diseños: a) el ruteo de pistas para medir voltaje y corriente alterna, y b) el ruteo de pistas para convertidor de señal PWM a señal analógica. Cabe señalar que los diseños de la Figura 25a y 25b se conectan mediante el Shield IO para Arduino Nano V1.0 (borneras). Estos módulos, en conjunto, permiten la medición del factor de potencia.



**Figura 25.** Ruteo de pistas para medir voltaje y corriente alterna, b) Ruteo de pistas para convertidor de señal PWM a señal analógica.

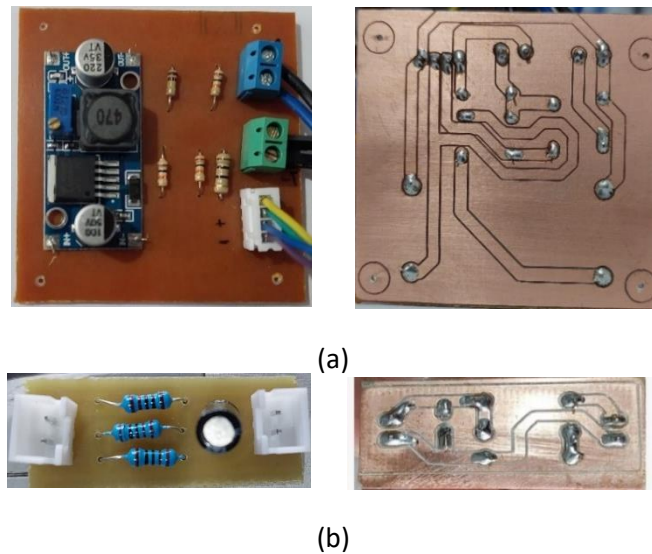
**Fuente:** Elaboración propia.

Una vez terminado los diseños de las PCB, como se observa en la figura 26 y 27, se llevó a cabo el proceso de mecanizado utilizando la maquina CNC ORTUR. Posteriormente, tras completar esta etapa para la fabricación de los módulos, finalmente se realizó la soldadura de todos los componentes electrónicos en cada una de las placas.



**Figura 26.** PCB principal del prototipo de detección de fallas en las luminarias LED de alumbrado público.

**Fuente:** Elaboración propia.

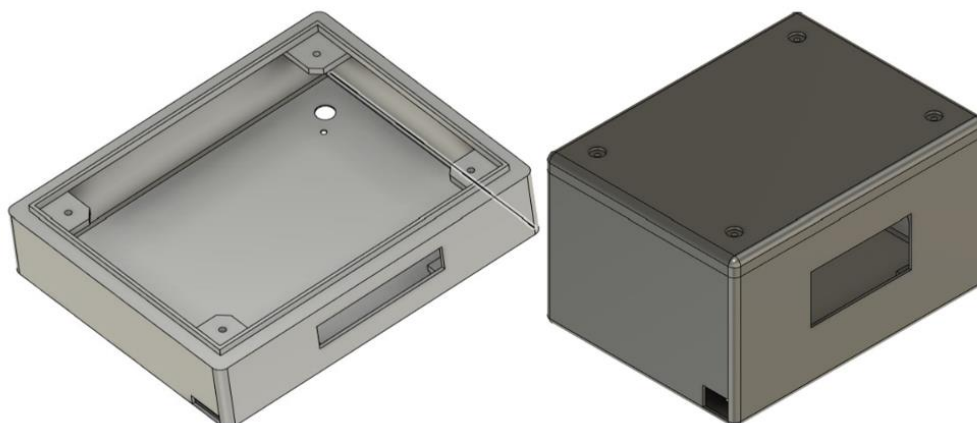


**Figura 27.** PCBs fabricadas para la medición de factor de potencia.

**Fuente:** Elaboración propia.

### **3.3.4 Diseño de la carcasa de soporte y protección del prototipo.**

El diseño de la carcasa para el prototipo de detección de fallas en luminarias LED se realizó en Autodesk Inventor. La caja tiene forma rectangular con bordes redondeados y dimensiones de 20 cm de largo, 15 cm de ancho y 12 cm de alto, proporcionando suficiente espacio para alojar los módulos y componentes. En su interior, se definió un orificio de 2 cm x 1,5 cm en la parte inferior para el paso de cables de alimentación y carga. Además, en una de sus caras laterales se incluye una abertura rectangular de 8 cm x 4 cm para alojar una pantalla, facilitando el acceso a la información en tiempo real. De igual manera la tapa de la caja está asegurada con tornillos en las cuatro esquinas, garantizando un sellado firme y protegiendo los componentes internos, como se muestra en la figura 28.



**Figura 28.** Diseño en Autodesk Inventor de la carcasa de soporte y protección del prototipo.

**Fuente:** Elaboración propia.

### 3.3.5 Pantalla LCD 4x16

Tras integrar los diversos módulos al sistema, se incorporó la pantalla LCD 16x4 mediante I2C, configurada para mostrar en siglas "UCACUE" la identificación de la Universidad Católica de Cuenca y las variables eléctricas en tiempo real: voltaje, corriente, potencia activa, factor de potencia, consumo de energía y horas de funcionamiento como se muestra en la figura 29.



**Figura 29.** Vista de la Pantalla LCD.

**Fuente:** Elaboración propia.

### 3.3.6 Adquisición de datos

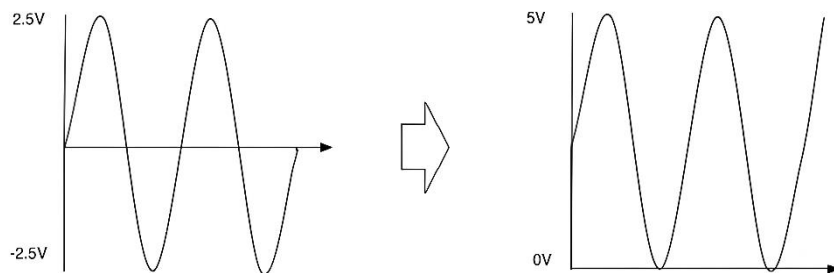
Como ya se explicó anteriormente el sistema desarrollado integra un Arduino Nano y un ESP32, donde independientemente cada uno cumple una función específica en la medición y procesamiento de variables eléctricas. El Arduino Nano mide exclusivamente señales eléctricas para calcular el factor de potencia, mientras que el ESP32 recibe esta información y los combina con otras mediciones como voltaje, corriente, potencia y consumo de energía. Esta división de tareas permite optimizar el procesamiento de información y garantizar mediciones más precisas y confiables.

En el caso de la medición de corriente, se utiliza el sensor SCT-013-000, que permite obtener una señal proporcional a la corriente que circula por el conductor. No obstante, dado que la salida de este sensor es una señal de corriente alterna con forma senoidal, se hace necesario procesarla adecuadamente antes de ser enviada al microcontrolador.

Para ello, el circuito de interfaz electrónica cumple una función clave: rectificar y amplificar la señal generada por el sensor. A través de componente electrónicos, la señal se ajusta conforme a los requerimientos del sistema, proceso conocido como "ajuste fino". Como resultado, se obtiene una señal de salida con un rango de -2.5 V a 2.5 V.

Sin embargo, surge un inconveniente al conectar esta señal a las entradas analógicas del ESP32, ya que este módulo únicamente puede medir voltajes en un rango de 0 V a 5 V. Por lo tanto, es imprescindible realizar un desplazamiento de señal sumando 2.5 V a la salida del sensor, lo que permite adaptar la señal al rango admitido por el ESP32 y garantizar una lectura precisa.

Por otro lado, si la medición se basa en una señal de corriente, es necesario convertir previamente la intensidad en voltaje antes de ingresarla al microcontrolador. En la figura 30 se muestra cómo se lleva a cabo esta conversión.

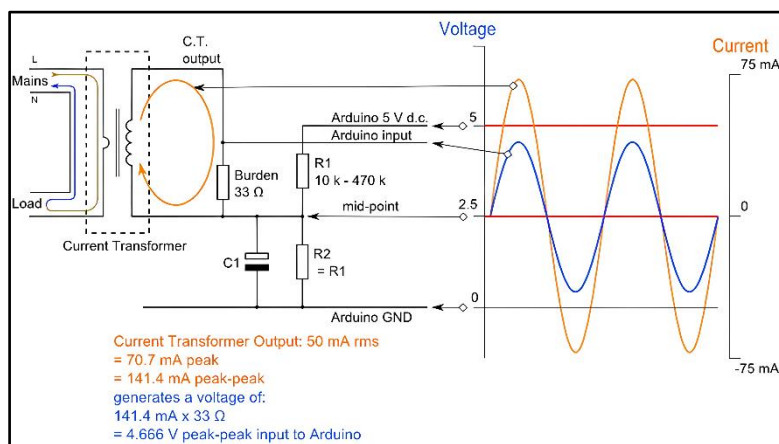


**Figura 30.** Acondicionamiento de la señal para su adaptación al rango de lectura del ESP32.

**Fuente:** (Alonso, 2015).

En este contexto, el sensor SCT-013-000, al ser un dispositivo analógico, genera una señal de corriente como salida. Para que esta señal pueda ser interpretada correctamente por el microcontrolador, es transformarla en una tensión mediante una resistencia de carga (burden).

El uso de esta resistencia es un aspecto fundamental, ya que permite obtener una señal de voltaje proporcional a la corriente medida. Para determinar su valor óptimo, se toma en cuenta el rango máximo de medición del sensor, que en este caso es 100 A. De esta manera, se garantiza que la conversión de corriente a voltaje sea precisa y adecuada para su análisis donde se observa en la figura 31.



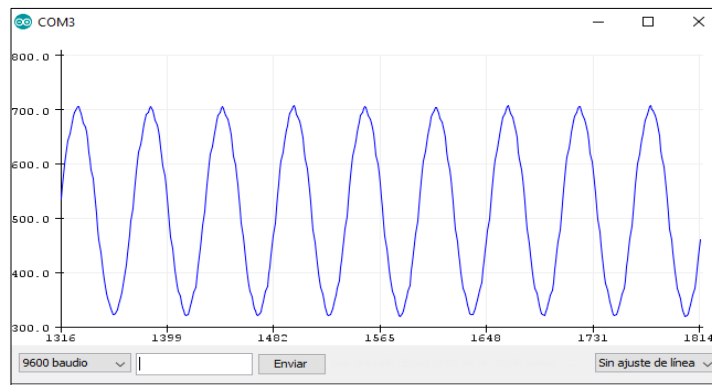
**Figura 31.** Solución para la adquisición de la señal de voltaje obtenida del sensor.

**Fuente:** (Alonso, 2015).

Del mismo modo, Para la medición del voltaje de la red eléctrica se utiliza el sensor ZMPT101B, el cual es un transformador de voltaje de alta precisión diseñado para medir tensión alterna con un adecuado aislamiento eléctrico. Este módulo cuenta con una bornera para la conexión de fase y neutro e incorpora un transformador encargado de reducir la amplitud de la señal alterna de la red. Posteriormente, la señal pasa por una etapa de

acondicionamiento, en la cual se desplaza al rango positivo mediante un amplificador operacional.

Además, el circuito integra un potenciómetro lineal, que permite ajustar la amplitud de la señal de salida, asegurando que los valores obtenidos sean adecuados para su interpretación por el microcontrolador. En la figura 32 se observa la señal de salida del sensor de voltaje leído por el microcontrolador.



**Figura 32.** Serial Plot de la lectura del sensor de voltaje ZMPT101B.

**Fuente:** Elaboración propia.

De igual manera, para poder calcular el factor de potencia, se utilizó un sensor de voltaje y corriente junto con el microcontrolador Nano, cuya finalidad fue obtener las señales de voltaje y corriente para determinar la diferencia de tiempo entre los cruces por cero de ambas señales.

### **3.3.6.1 Procesado de datos con microcontrolador ESP32**

Una vez que los sensores han adquirido los datos, el microcontrolador procesa la información para calcular los valores de voltaje RMS, corriente RMS, potencia activa, factor de potencia y consumo energético en kWh. Para ello, se emplean algoritmos específicos y fórmulas matemáticas que garantizan la precisión en los resultados.

En primer lugar, el cálculo de la corriente se realiza a partir de los valores leídos por el microcontrolador, para lo cual se utilizó la librería *emonlib* ideal para este tipo de aplicaciones, la cual calcula la corriente RMS. Se inicializa proporcionando la entrada analógica y el factor de calibración con la función `emon.current(pin, calibración)`. Dentro de `loop()`, se inicia la medición con la sentencia `emon.calcIrms(muestras)`, con lo que se procederá al cálculo por parte de la librería. Finalmente, para guardar el dato, se utiliza la sentencia `emon.Irms`, obteniendo el valor de corriente RMS de la red.

Por otro lado, El cálculo del voltaje se realiza utilizando la librería ZMPT101B, diseñada para medir el voltaje RMS de la red eléctrica. Se inicializa el sensor configurando el pin de entrada analógica y la sensibilidad con la función `ZMPT101B voltageSensor(pin, sensibilidad)`.

Dentro de loop (), la medición se obtiene con la función `voltageSensor.getRmsVoltage()`, la cual devuelve el valor de voltaje RMS y como ya explico anteriormente para mejorar la precisión, se aplica un factor de calibración definido como `CALIBRATION_FACTOR`, ajustando la lectura con la ecuación, donde el valor de ajuste compensa posibles desviaciones en la medición. Asimismo, el voltaje obtenido se utiliza en el procesamiento de datos y la toma de decisiones del sistema.

Una vez obtenidos los valores de corriente RMS y voltaje RMS se procede a los cálculos matemáticos para determinar el valor de potencia activa en vatios, y también el consumo de energía eléctrica en kilovatio-hora. El cálculo de potencia activa se lo realiza con la multiplicación del voltaje RMS por la corriente RMS y por el factor de potencia. Para el cálculo de kilovatio-hora se lo realiza a partir de la potencia y multiplicado por el tiempo de observación.

### 3.3.6.2 Medición del Factor de Potencia librería *PowerAnalyzer*

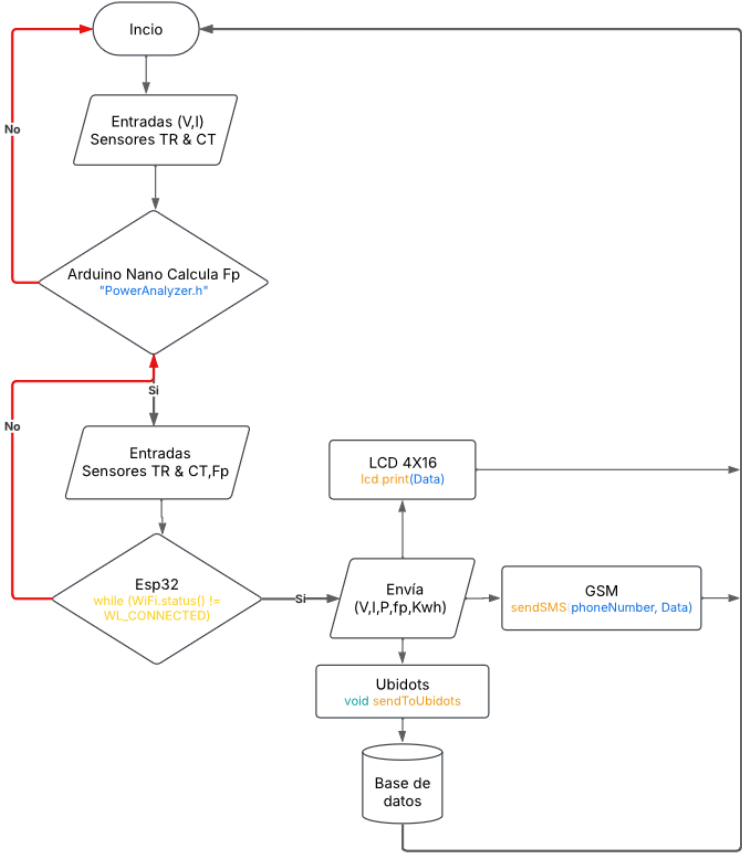
En la Figura 33 se presenta el algoritmo desarrollado en Arduino Nano, el cual utiliza la librería *PowerAnalyzer.h* que permite medir el factor de potencia en el sistema eléctrico. Se basa en la lectura de las señales de voltaje y corriente promediando los valores obtenidos durante 25 ciclos de medición. A partir de estos datos, ajusta una señal PWM en su salida en función del factor de potencia calculado. Además, incorpora un mecanismo de validación para detectar valores no numéricos (NaN) o infinitos. En caso de detectar estas condiciones, el sistema ajusta el valor a 0 para evitar resultados erróneos. Del mismo modo mapea el factor de potencia promedio (que va de 0 a 1) a un valor de señal PWM (entre 0 y 255) y, como resultado, muestra los valores promedio del factor de potencia.

```
#include "PowerAnalyzer.h"
#define VOLT_PIN 0
#define CURRENT_PIN 1
#define PWM_PIN 3
#define volt_transfer_ratio ((100.0 + 10.0) / 10.0)
#define current_transfer_ratio ((10.0 / 10.0) / 4)
Measure measure (VOLT_PIN, CURRENT_PIN);
float V, I, P, pf;
void setup () {Serial.begin(9600); pinMode (PWM_PIN, OUTPUT);}
void loop () {
  float volt = 0, current = 0, power = 0, power_factor = 0;
  for (int i = 0; i < 25; i++) {measure.all (V, I, P, pf); volt += V * volt_transfer_ratio; current += I *
  current_transfer_ratio; power += abs (P * volt_transfer_ratio * current_transfer_ratio); power_factor += abs(pf);}
  volt /= 25; current /= 25; power /= 25; power_factor /= 25;
  if (isnan(power_factor) || isinf(power_factor)) power_factor = 0;
  analogWrite (PWM_PIN, (int) (power_factor * 255));
  Serial.print(volt); Serial.print(" "); Serial.print(current); Serial.print(" "); Serial.print(power);
  Serial.println(power_factor);
}
```

**Figura 33.** Algoritmo para medir el factor de potencia.

**Fuente:** Elaboración propia.

Además, en la figura 34, se observa el diagrama de flujo del programa que comienza con la recolección de variables eléctricas y su envío al servidor Ubidots, el cual es el responsable de almacenar estos datos y generar reportes semanales o mensuales, según sea la necesidad. Por otra parte, las variables eléctricas se observan en una pantalla lcd 16x4 y finalmente se puede recibir notificaciones mediante GSM sobre eventos específicos, como el aumento o disminución de voltaje, corriente, potencia y reportes en la mañana, tarde y noche.



**Figura 34.** Diagrama de flujo del programa del sistema desarrollado.

**Fuente:** Elaboración propia.

**3.4 Fuente de alimentación del sistema**

El sistema desarrollado funciona con 5Vcd (voltaje de corriente directa) y niveles de voltaje en Low Energy. Por tal razón, se ha seleccionado una fuente de alimentación conmutada que convierte la tensión de 120V AC a 5V DC. Esta fuente es la base del sistema y suministra energía a los demás módulos. Desde esta fuente principal, el Arduino Nano se alimenta directamente con 5V DC, permitiéndole operar y gestionar los sensores conectados a él y para el ESP32.

Así mismo se emplean dos reguladores de voltaje LM2596 para reducción de voltaje y adaptar a los niveles requerimientos de los diferentes módulos como 4Vcd para alimentar el módulo GSM y el segundo regulador reduce los 5Vcd a 2.5Vcd para el offset de la etapa de

censado de Vca que permite medir el factor de potencia. Cada componente recibe la tensión y corrientes recomendadas en la tabla 13 y 14 se presentan sus características detalladas de la fuente conmutada y el regulador de voltaje utilizados.

**Tabla 13.** Características de la fuente conmutada.

Modelo	Fuente Conmutada 5V 3A
Voltaje de entrada	110V - 220V AC
Voltaje de salida	5V DC
Corriente de salida	3A
Protección contra cortocircuito	Si
Protección contra sobrecarga	Si
Regulación de voltaje	± 1%

Fuente: Elaboración propia.

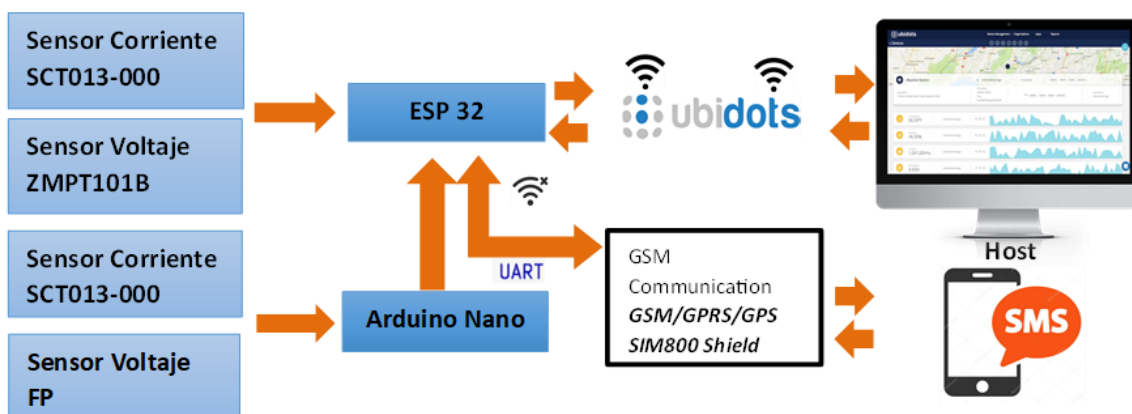
**Tabla 14.** Características del regulador de voltaje.

Modelo	LM2596S
Voltaje de entrada	4V - 40V DC
Voltaje de salida	1.25V - 37V DC (ajustable)
Corriente máxima de salida	3A
Frecuencia de conmutación	150 KHz
Protección térmica	Sí
Protección por sobrecorriente	Sí
Regulación de carga	± 0.5%
Regulación de voltaje	± 2.0%

Fuente: Elaboración propia.

### 3.5 Comunicación del prototipo de detección de fallas.

#### 3.5.1 Diagrama de flujo de comunicación del sistema.



**Figura 35.** Diagrama de flujo de comunicación del sistema.

Fuente: Elaboración propia.

El diagrama comunicación del sistema, representado en la figura 35, demuestra como el microcontrolador ESP32 actúa, recibiendo los parámetros eléctricos medidos por los sensores y el microcontrolador Arduino Nano. A su vez, el ESP32 envía los datos recopilados a la plataforma Ubidots mediante el protocolo de comunicación HTTP, permitiendo la visualización, cuantificación y almacenamiento de la información en los paneles personalizados.

Paralelamente, el módulo de comunicación GSM SIM800L complementa el sistema al enviar notificaciones y alertas mediante SMS a un teléfono móvil, garantizando una comunicación remota eficiente, incluso en ausencia de Internet. Esto permite a los usuarios monitorear el estado del sistema desde dispositivos móviles o hosts configurados, accediendo a información detallada y herramientas que facilitan la toma de decisiones, mejorando la funcionalidad y la experiencia de los usuarios.

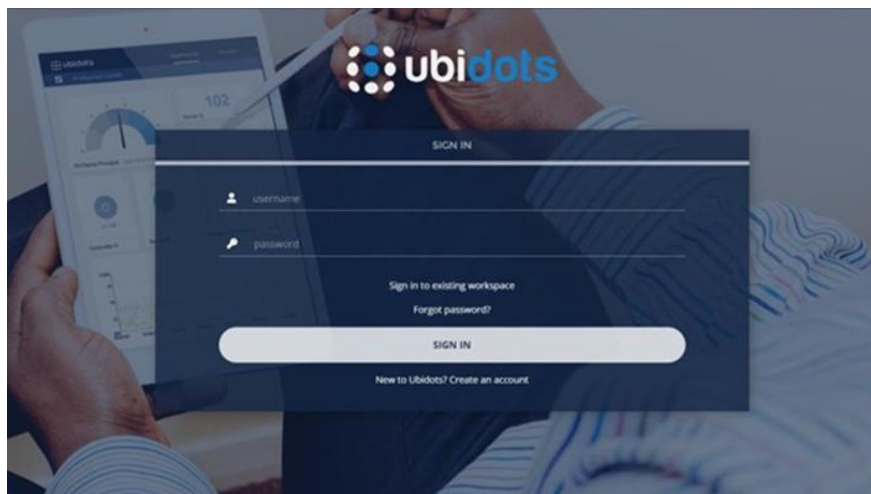
### **3.5.1.1 Comunicación con la plataforma UBIDOTS.**

#### **3.5.1.1.1 Creación de cuenta en Ubidots**

En esta sección, se realizó la creación de una cuenta en la plataforma Ubidots, así como la configuración inicial. Dado que Ubidots es una herramienta robusta para el almacenamiento y la visualización remota de datos provenientes de sensores, su correcta configuración resulta esencial para el monitoreo y análisis de la información recolectada por los dispositivos conectados.

Al acceder al sitio web oficial de Ubidots, se llevó a cabo el registro del usuario. Así mismo, tras completar el registro, fue necesario verificar la cuenta mediante un enlace enviado al correo electrónico proporcionado durante la inscripción. De este modo, se asegura que la cuenta queda correctamente activada y lista para su utilización.

Una vez creado la cuenta se puede acceder a la cuenta Ubidots con el nombre de usuario y contraseña, como se ilustra en la figura 36.



**Figura 36.** Creación de la cuenta en UBIDOTS.

**Fuente:** Elaboración propia.

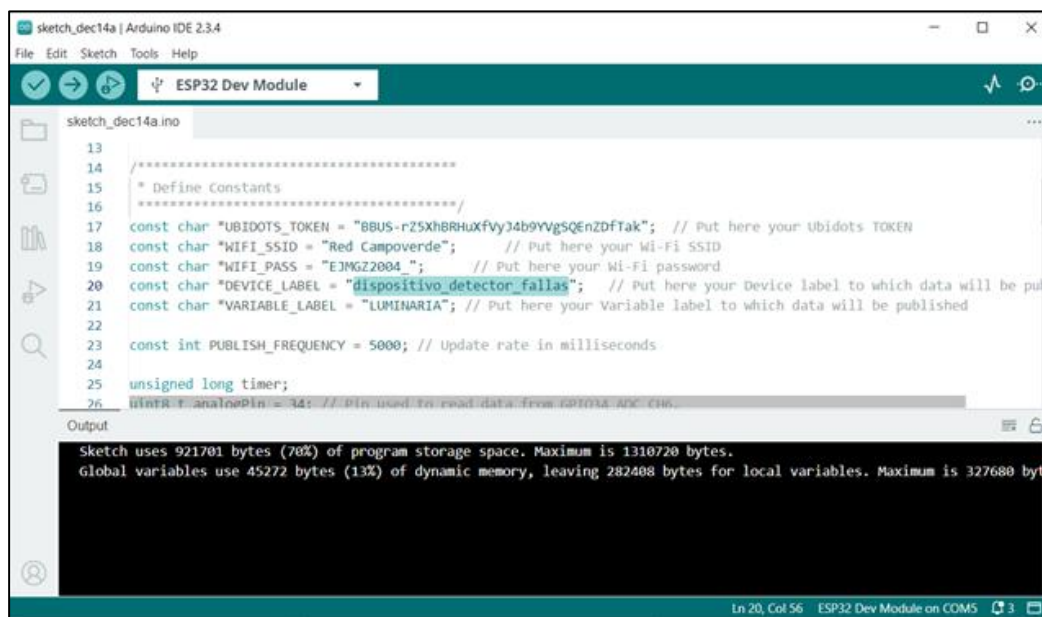
### 3.5.1.1.2 Configuración del entorno de desarrollo para comunicación con la plataforma Ubidots.

Para establecer la conexión del prototipo basado en el ESP32 y la plataforma Ubidots, es fundamental configurar correctamente el entorno de desarrollo, asegurando un intercambio de datos eficiente entre el microcontrolador y la plataforma.

Inicialmente, se debe ingresar el token de autenticación, junto con el nombre y la contraseña de la red WiFi, tal como se muestra en la figura 37. Además, es necesario copiar correctamente las etiquetas utilizadas en la suscripción para garantizar que los datos sean enviados adecuadamente. En este caso, el suscriptor incluirá toda la información obtenida por el sensor, permitiendo así la transmisión de datos a la plataforma de manera efectiva.

Además, en este proceso de comunicación se utilizó el protocolo HTTP, ya que es compatible con la API REST de la plataforma y facilita su implementación. En este contexto, la transmisión de datos se lleva a cabo mediante solicitudes HTTP POST, a través de las cuales la información de los sensores, en formato JSON, se envía a los endpoints de Ubidots.

Por otro lado, a través de solicitudes HTTP GET, se pueden recuperar datos almacenados, lo que permite monitorear el estado de las variables y realizar ajustes en el sistema según sea necesario.



```
sketch_dec14a | Arduino IDE 2.3.4
File Edit Sketch Tools Help
ESP32 Dev Module
sketch_dec14a.ino
13
14
15 *****
16 * Define Constants
17 *****
18 const char "UBIDOTS_TOKEN = "BBUS-r25XhBRHuXFvy34b9VvgSQEnZDFtak"; // Put here your ubidots TOKEN
19 const char "WIFI_SSID = "Red Campoverde"; // Put here your Wi-Fi SSID
20 const char "WIFI_PASS = "EJMGZ2004 "; // Put here your Wi-Fi password
21 const char "DEVICE_LABEL = "dispositivo_detector_fallas"; // Put here your Device label to which data will be pu
22 const char "VARIABLE_LABEL = "LUMINARIA"; // Put here your Variable label to which data will be published
23
24 const int PUBLISH_FREQUENCY = 5000; // Update rate in milliseconds
25
26 unsigned long timer;
27
28 int pinAnalogoPin = 14; // Pin used to read data from GY-014 AQC CH6.
Output
Sketch uses 921701 bytes (70%) of program storage space. Maximum is 1310720 bytes.
Global variables use 45272 bytes (13%) of dynamic memory, leaving 282408 bytes for local variables. Maximum is 327680 bytes.
```

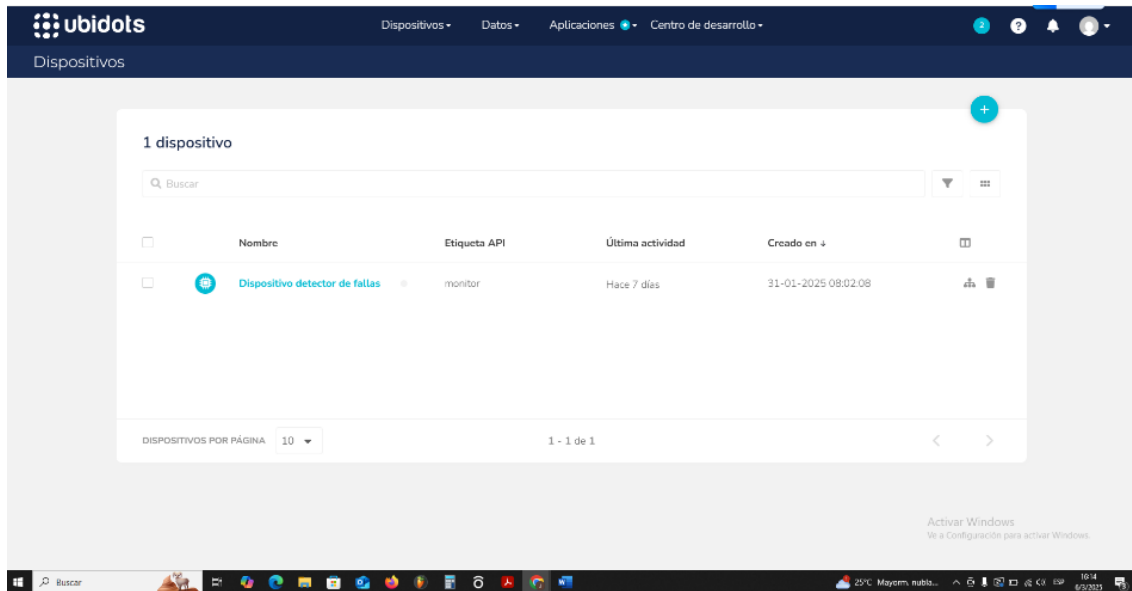
**Figura 37.** Código desarrollo para comunicación con la plataforma Ubidots.

**Fuente:** Elaboración propia.

### 3.5.1.1.3 Configuración y agregación de dispositivos a la plataforma Ubidots.

En la sección de configuración inicial de Ubidots, se preparó la plataforma para la recepción y visualización de datos. Una vez que el usuario ha iniciado sesión, el primer paso

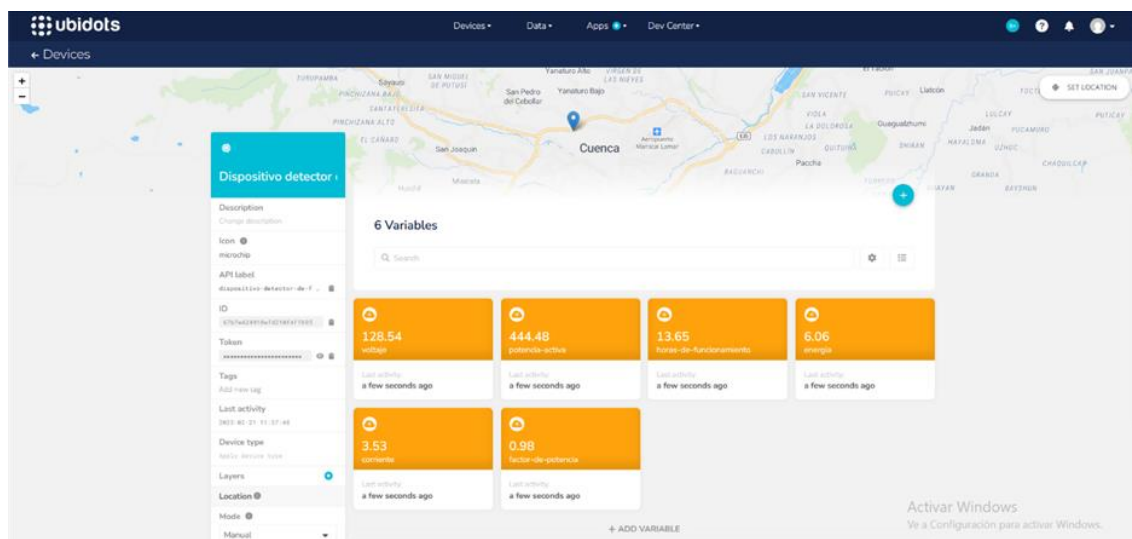
consiste en crear un nuevo dispositivo dentro de la plataforma. En este proceso, se seleccionó un dispositivo personalizado y se asignó el nombre correspondiente al dispositivo desarrollado, lo cual es fundamental para asegurar que la configuración se adapte a las necesidades específicas de los sensores que se van a conectar, ver figura 38.



**Figura 38.** Devices creados en la página de Ubidots.

**Fuente:** Elaboración propia.

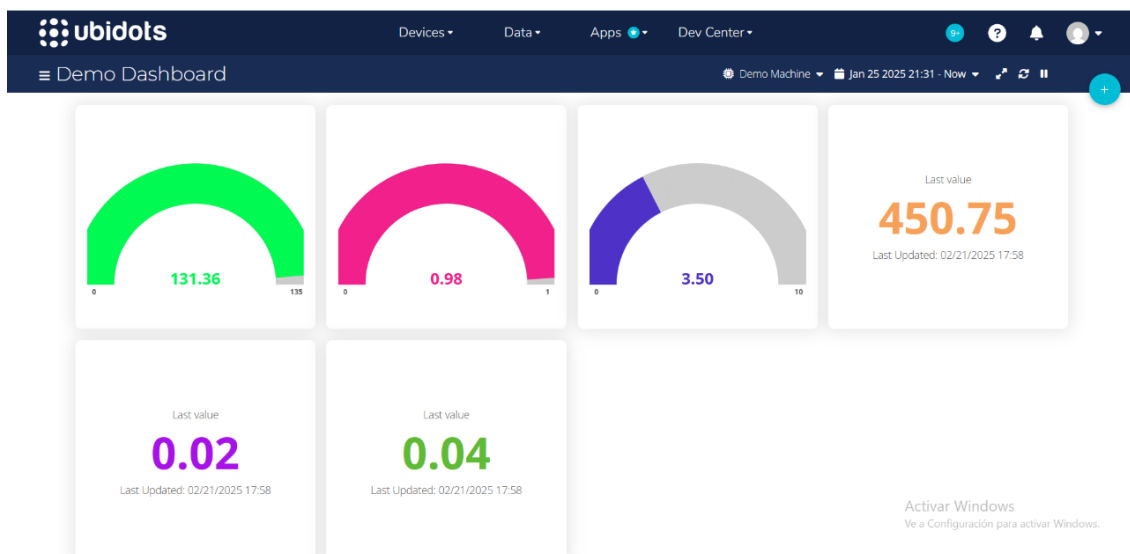
En segundo lugar, al seleccionar el dispositivo creado, podrá acceder a información clave como la API Label, ID y Token, fundamentales para establecer la comunicación con la plataforma durante la programación. Asimismo, es posible añadir múltiples variables según las necesidades del sistema. En este caso, se incluyen las variables de corriente, voltaje, potencia activa, factor de potencia, consumo de energía y horas de funcionamiento, que son esenciales para el monitoreo del prototipo como se puede observar en la figura 39.



**Figura 39.** Nuevas variables.

**Fuente:** Elaboración propia.

Como tercer punto, dentro del panel de control (Dashboard) creado, se desarrolló los widgets personalizados como configuración de la pantalla principal, lo que facilita la visualización y el monitoreo en tiempo real de los dispositivos conectados mediante gráficos e indicadores. En este sentido como se observa en la figura 40, tenemos en la primera grafica los valores medidos del voltaje RMS, en la segunda grafica el valor medido del factor de potencia, en la tercera grafica se tiene el valor medido de la corriente RMS y a través de indicadores con valores numéricos se represan el valor de la potencia activa, energía consumida y las horas de funcionamiento.



**Figura 40.** Widget personalizado.

**Fuente:** Elaboración propia.

### **3.5.1.2 Comunicación mediante módulo GSM.**

El módulo GSM (Global System for Mobile Communications) es un dispositivo ampliamente utilizado para la transmisión de datos y mensajes a través de redes celulares. Su integración en sistemas de comunicación permite el envío y recepción de información en tiempo real, facilitando aplicaciones como el monitoreo remoto, el control de dispositivos y la automatización de procesos.

Para establecer comunicación mediante un módulo GSM, es necesario utilizar una tarjeta SIM activa y configurar adecuadamente los parámetros de conexión, tales como el puerto serie y los comandos AT. Estos comandos permiten enviar mensajes de texto (SMS), realizar llamadas y transmitir datos mediante GPR

#### **3.5.1.2.1 Configuración del entorno de desarrollo para el módulo GSM**

Para establecer la comunicación entre el microcontrolador ESP32 y el módulo SIM800L, es necesario configurar correctamente el entorno de desarrollo de IDE de Arduino,



```

Output  Serial Monitor x
Message (Enter to send message to 'ESP32 Dev Module' on 'COM5')
20:59:22.493 ->
20:59:42.345 -> Respuesta: □
21:00:17.348 -> Respuesta: □
21:00:26.565 -> ◆Iniciando...
21:00:26.715 -> Escribe un comando AT y presiona Enter para enviarlo al módulo SIM800L.
21:00:32.367 -> Enviado: AT+CPIN?
21:00:33.422 -> Respuesta: AT+CPIN?
21:00:33.453 -> +CPIN: READY
21:00:33.453 ->
21:00:33.495 -> OK
21:00:33.495 ->
21:02:29.715 -> Enviado: AT+CPIN?
21:02:30.775 -> Respuesta: AT+CPIN?
21:02:30.775 -> +CPIN: READY
21:02:30.821 ->
21:02:30.821 -> OK
21:02:30.821 ->
21:03:02.863 -> Enviado: AT+CREG?
21:03:03.903 -> Respuesta: AT+CREG?
21:03:03.948 -> +CREG: 0,1
21:03:03.948 ->
21:03:03.948 -> OK
21:03:03.948 ->

```

**Figura 42.** Verificación de la conexión y el estado de la red.

**Fuente:** Elaboración propia.

A su vez, en la figura 43 se puede evidenciar la correcta respuesta a los comandos AT+CREG? y AT+COPS?, lo que confirma que el módulo se encuentra registrado en la red y ha detectado el operador disponible.

```

Output  Serial Monitor x
Message (Enter to send message to 'ESP32 Dev Module' on 'COM5')
21:00:33.453 -> Respuesta: □
21:00:33.453 ->
21:00:33.495 -> OK
21:00:33.495 ->
21:02:29.715 -> Enviado: AT+CPIN?
21:02:30.775 -> Respuesta: AT+CPIN?
21:02:30.775 -> +CPIN: READY
21:02:30.821 ->
21:02:30.821 -> OK
21:02:30.821 ->
21:03:02.863 -> Enviado: AT+CREG?
21:03:03.903 -> Respuesta: AT+CREG?
21:03:03.948 -> +CREG: 0,1
21:03:03.948 ->
21:03:03.948 -> OK
21:03:03.948 ->
21:07:19.115 -> Enviado: AT+COPS=?
21:07:20.126 -> Respuesta: AT+COPS=?
21:07:31.016 -> Respuesta:
21:07:31.016 -> +COPS: (2,"Conecel S.A.", "PORTA", "74001"), (1,"74000", "74000", "74000"), (0-4), (0-2)
21:07:31.122 ->
21:07:31.122 -> OK
21:07:31.122 ->

```

**Figura 43.** Respuesta de comandos AT en módulo SIM800.

**Fuente:** Elaboración propia.

### 3.5.1.2.2 Comunicación GSM mediante servicios SMS

Gracias a su capacidad para operar sin conexión a internet, el sistema de mensajería SMS permiten enviar y recibir mensajes en tiempo real. Esta característica los convierte en

una solución confiable para la transmisión de información en entornos donde la cobertura Wifi o de datos móviles es limitada o inexistente.

En el contexto de los sistemas de alumbrado público con luminarias LED, la comunicación GSM mediante SMS permite notificar a los operadores sobre el estado de funcionamiento, la detección de fallas y los requerimientos de mantenimiento de manera eficiente. Como se puede apreciar en la figura 44, se ha recibido correctamente la notificación de prueba, lo que confirma el éxito de la comunicación del prototipo mediante SMS.



**Figura 44.** Notificación de prueba de envió de variables mediante modulo GSM

**Fuente:** Elaboración propia.

### **3.6 Armado del prototipo**

#### **3.6.1 Lugar de estudio**

Con el propósito de lograr una adecuada construcción e implementación del prototipo se optó por ubicar el lugar de estudio en el Laboratorio de luminotecnica perteneciente al CIITT de la Universidad Católica de Cuenca ubicado en la parroquia Ricaurte de la ciudad de Cuenca.

#### **3.6.2 Instalación del prototipo de medición autónoma**

Como se muestra en la figura 45, el prototipo fue integrado en un sistema de luminarias LED de alumbrado público, el cual se simuló en el Laboratorio de Luminotecnica del CIITT. Para evaluar su desempeño, se implementaron interruptores individuales en cada luminaria LED con el fin de simular fallas en el sistema de alumbrado.

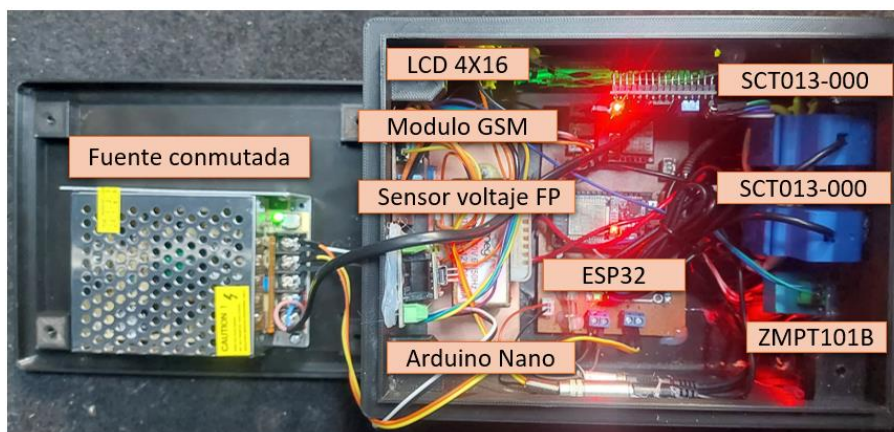
Del mismo modo, esta configuración permite al prototipo detectar fallas simuladas mediante la identificación de variaciones en el voltaje, la corriente y la potencia. Obteniendo como resultado, un sistema que genera alertas y envía notificaciones vía SMS a un teléfono móvil, permitiendo una respuesta rápida y eficiente ante posibles fallos.



**Figura 45.** Adecuación del lugar de estudio.

**Fuente:** Elaboración propia.

Dentro de la carcasa de soporte y protección se realizaron todas las conexiones necesarias para el funcionamiento correcto del prototipo, integrando en su interior todos los componentes eléctricos y electrónicos. De igual manera, con el propósito de prevenir posibles sobrecargas en el sistema, se incorporó un fusible de seguridad en la placa principal, donde está ubicado el microcontrolador ESP32. Sumado a esto, se utilizaron borneras para conectar los distintos módulos PCB, sensores, cables de alimentación y carga. Para complementar, en la figura 46, se presenta una ilustración detallada que permite visualizar en ensamblado de todos los componentes.



**Figura 46.** Ensamblado de todos los componentes del prototipo.

**Fuente:** Elaboración propia.

## CAPÍTULO IV

### 4 PRUEBAS DEL PROTOTIPO

En este capítulo se detallan las pruebas realizadas para evaluar el funcionamiento del prototipo y validar la precisión de sus mediciones. Para ello, se llevaron a cabo mediciones comparativas entre los valores obtenidos, utilizando diversos instrumentos de referencia y estableciendo procedimientos que permitieron contrastar los valores de voltaje, corriente, potencia y factor de potencia.

Así mismo, los registros de las variables eléctricas de una luminaria LED de alumbrado público se tomaron en distintos momentos del día para la validación de las mediciones. Adicionalmente, se realizaron fallas simuladas como pruebas de resistencia y tolerancia del sistema ante variaciones de voltaje, corriente y potencia, consolidando su operatividad en diversos escenarios.

Los valores obtenidos fueron organizados en tablas, lo que facilitó un análisis comparativo entre las mediciones del prototipo y los dispositivos de referencia. Se evidenció que los datos registrados presentaban un margen de error aceptable dentro de los límites establecidos, lo que confirmó la precisión del sistema. De igual manera, se evaluó el desempeño del sistema de comunicación, verificando el correcto envío de reportes de medición a través de WiFi mediante la plataforma Ubidots y GSM. Garantizando así la confiabilidad del sistema de monitoreo remoto y la detección de fallas en luminarias LED de alumbrado público.

#### 4.1 Pruebas del dispositivo final

Las pruebas se llevaron a cabo tras la instalación e implementación tanto del prototipo como de las luminarias, dentro de las primeras pruebas que se realizaron fue tomar las mediciones de voltaje RMS y de corriente RMS con él un multímetro digital Fluke 87V True RMS, y el registro de la potencia real y factor de potencia mediante la fuente de alimentación (AC Power Source) de 3 luminarias LED conectadas en serie, con el objetivo de contrastar los valores obtenidos por el prototipo.

En la figura 47 se presenta, el multímetro digital Fluke 87V True RMS permite medir valores de voltaje RMS en un rango de 600 mV a 1000 V tanto en corriente alterna (AC True RMS) como en corriente continua (DC), con una precisión de  $\pm 0.05\%$  + 1 dígito en DC y  $\pm 0.7\%$  + 2 dígitos en AC. Además, es capaz de medir corriente en un rango de 600  $\mu\text{A}$  a 10 A en DC y AC True RMS, con una precisión de  $\pm 0.2\%$  + 2 dígitos en DC y  $\pm 1.0\%$  + 2 dígitos en AC.



**Figura 47.** Multímetro digital Fluke 87V True RMS.

**Fuente:** Elaboración propia.

En la tabla 15, se muestra los valores de voltaje RMS adquiridos tanto por el prototipo como también por el instrumento de medición tomados en diferentes horas del día del grupo de luminarias LED.

**Tabla 15.** Mediciones de voltaje entre prototipo y multímetro.

PRUEBAS DEL PROTOTIPO – MEDICIÓN VOLTAJE RMS										
Dispositivos	Medición n 1	Medición n 2	Medición n 3	Medición n 4	Medición n 5	Medición n 6	Medición n 7	Medición n 8	Medición n 9	Medición n 10
Prototipo	131.41	132.06	130.04	129.89	130.76	132.08	133.09	132.12	128.74	130.61
Multímetro Digital	131.31	131.72	130.51	130.11	130.21	131.33	132.39	131.71	128.44	130.82

**Fuente:** Elaboración propia.

Así mismo para la medición de corriente RMS, se empleó la pinza amperimétrica incluida con el multímetro Fluke 87V True RMS, así como los valores tomados por el prototipo, obteniendo las siguientes mediciones en diferentes horas del día, como se muestra en la tabla 16.

**Tabla 16.** Mediciones de corriente entre prototipo y multímetro.

PRUEBAS DEL PROTOTIPO – MEDICIÓN CORRIENTE RMS										
Dispositivos	Medición n 1	Medición n 2	Medición n 3	Medición n 4	Medición n 5	Medición n 6	Medición n 7	Medición n 8	Medición n 9	Medición n 10
Prototipo	3.73	3.84	3.72	3.76	3.71	3.85	3.50	3.52	3.69	3.48
Multímetro Digital	3.73	3.85	3.71	3.76	3.70	3.85	3.51	3.52	3.68	3.48

**Fuente:** Elaboración propia.

De igual manera para validar las mediciones realizadas por el prototipo del factor de potencia se utilizó la fuente de alimentación (AC Power Source) donde se tomó el registro de las mediciones en diferentes horas del día, como se muestra en la tabla 17.

**Tabla 17.** Mediciones de factor de potencia entre prototipo y fuente de alimentación.

PRUEBAS DEL PROTOTIPO – MEDICIÓN FACTOR DE POTENCIA										
Dispositivos	Medición n 1	Medición n 2	Medición n 3	Medición n 4	Medición n 5	Medición n 6	Medición n 7	Medición n 8	Medición n 9	Medición n 10
Prototipo	0.99	0.99	0.98	0.98	0.98	0.99	0.98	0.99	0.99	0.99
Fuente (AC Power Source)	0.99	9.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99

**Fuente:** Elaboración propia.

En la figura 48 se muestra la medición en tiempo real realizada por el prototipo donde se registran los valores de voltaje, corriente, potencia activa. En esta prueba, el dispositivo muestra un voltaje de 128.98 V, una corriente de 3.6860 A y una potencia activa de 465.93 W.



**Figura 48.** Variables medidas por el prototipo.

**Fuente:** Elaboración propia.

Mientras que el multímetro digital Fluke 87V True RMS como se muestra en la figura 49, se registra el mismo valor semejante de 128.4 Voltios y 3,68 amperios. Estas mediciones se llevaron a cabo al grupo de luminarias LED y su referencia se encuentra en las tablas 15 y 16, en la medición 9.



**Figura 49.** Variables medidas por el Multímetro digital Fluke 87V True RMS.

**Fuente:** Elaboración propia.

De igual manera, como se presenta en la figura 50 se realizó la medición del factor de potencia con la fuente de alimentación (AC Power Source) del grupo de luminarias LED obteniendo un valor de 0.995 y su referencia se encuentra en la tabla 17, en la medición 9.



**Figura 50.** Variables medidas por la fuente de alimentación (AC Power Source).

**Fuente:** Elaboración propia.

Con base en los datos tabulados de voltaje, corriente y factor de potencia, se llevó a cabo el cálculo del error absoluto y relativo. Para ello, se consideraron las mediciones obtenidas tanto con el multímetro, la fuente de alimentación (AC Power Source) y el prototipo. Además, con el propósito de asegurar la precisión de los resultados, se emplearon las ecuaciones (14) y (15).

$$Error\ Absoluto = medicion\ del\ multímetro - medicion\ del\ prototipo \quad (14)$$

$$Error\ Relativo = \frac{Error\ Absoluto}{Medicion\ multímetro} \times 100 \quad (15)$$

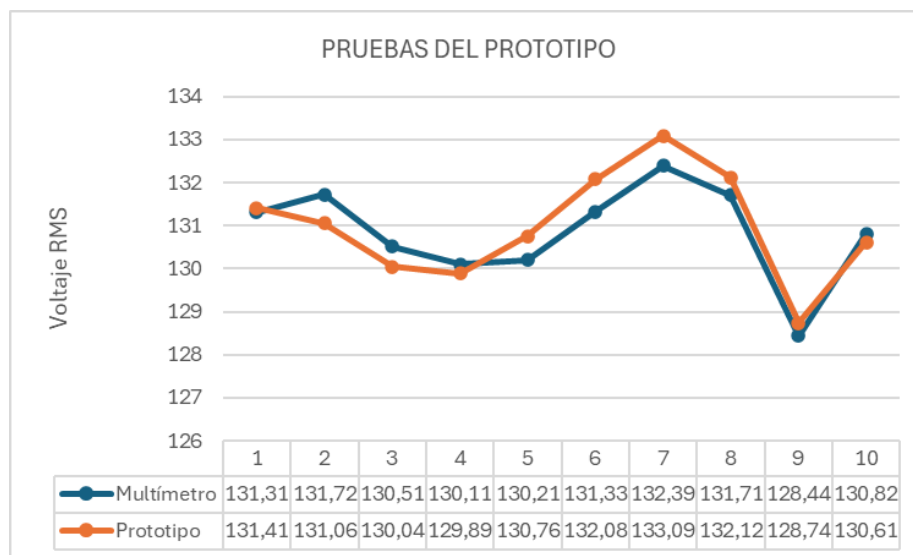
En la Tabla 18 se presenta el cálculo del error absoluto y relativo de los valores de voltaje medidos tanto por el prototipo como por el multímetro digital Fluke 87V True RMS.

Para ello, se tomaron como referencia los valores registrados en la tabla 15, permitiendo así una comparación precisa entre ambas mediciones.

**Tabla 18.** Error en medición de voltaje

N.º	Voltaje (V)		Cálculo de errores	
	Multímetro	Prototipo	Error Absoluto	Error Relativo (%)
1	131.31	131.41	0.10	0.076
2	131.72	131.06	0.66	0.501
3	130.51	130.04	0.47	0.360
4	130.11	129.89	0.22	0.169
5	130.21	130.76	0.55	0.422
6	131.33	132.08	0.75	0.571
7	132.39	133.09	0.70	0.529
8	131.71	132.12	0.41	0.311
9	128.44	128.74	0.30	0.234
10	130.82	130.61	0.21	0.161

**Fuente:** Elaboración propia.



**Figura 51.** Grafica de las mediciones de voltaje por prototipo y multímetro.

**Fuente:** Elaboración propia.

Si bien en teoría se considera que el voltaje de la red eléctrica monofásica se mantiene constante en un valor de 120 Vrms, en la práctica pueden presentarse variaciones de voltaje dentro de una misma instalación eléctrica. Como se presenta en la gráfica de la figura 51, estas fluctuaciones pueden presentarse debido a diversos factores, entre los cuales se incluyen instalaciones eléctricas defectuosas, fallas en los artefactos eléctricos, desgaste en los contactos, conexiones inadecuadas o sobrecargas en el sistema.

Además, es importante destacar que estas variaciones no solo pueden originarse dentro de la instalación interna de una vivienda, sino que también pueden ser consecuencia

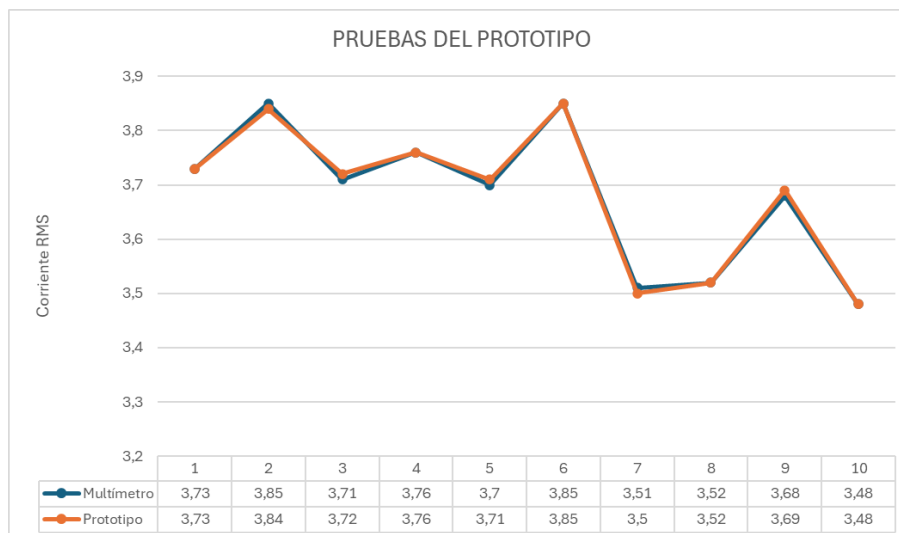
de factores externos. Entre estos se encuentran fluctuaciones en la demanda de energía, fallos en la red de distribución, interrupciones momentáneas por conmutación de circuitos, y fenómenos atmosféricos. No obstante, al contrastar las mediciones de voltaje obtenidas mediante el multímetro y el prototipo, se puede deducir que el margen de error registrado se encuentra dentro de un rango aceptable, lo que valida la confiabilidad del dispositivo desarrollado.

Por otro lado, en la tabla 19 se presentan los cálculos de error correspondientes a los valores de corriente medidos tanto por el prototipo como por el multímetro. Para este análisis, se tomaron como referencia los valores registrados en la tabla 16.

**Tabla 19.** Error en medición de corriente.

N.º	Corriente (V)		Cálculo de errores	
	Multímetro	Prototipo	Error Absoluto	Error Relativo (%)
1	3.73	3.73	0.00	0.000
2	3.85	3.84	0.01	0.260
3	3.71	3.72	0.01	0.270
4	3.76	3.76	0.00	0.000
5	3.70	3.71	0.01	0.270
6	3.85	3.85	0.00	0.000
7	3.51	3.50	0.01	0.285
8	3.52	3.52	0.00	0.000
9	3.68	3.69	0.01	0.272
10	3.48	3.48	0.00	0.000

**Fuente:** Elaboración propia.



**Figura 52.** Grafica de las mediciones de corriente por prototipo y multímetro.

**Fuente:** Elaboración propia.

Como se muestra en la tabla 19 y la figura 52, las mediciones de corriente obtenidas son bastante similares. Sin embargo, es importante considerar que pueden presentarse ligeros valores muy cercanos registrados tanto por el multímetro como por el sensor del prototipo, esto se debe a que ambos dispositivos utilizan un mecanismo de pinza que rodea el cable conductor de energía eléctrica, lo que hace que la medición pueda verse influenciada por el ángulo en el que se colocan estos dispositivos.

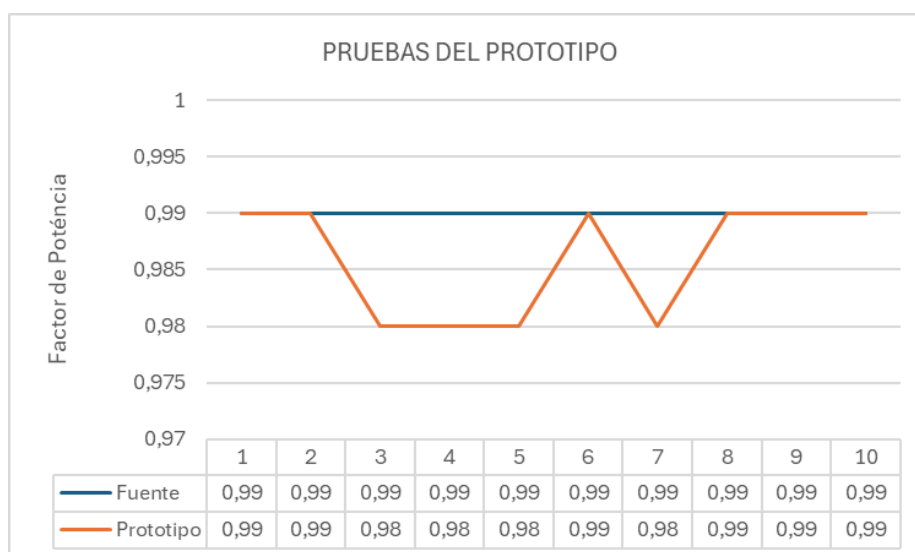
Por esta razón, se recomienda que el multímetro o el sensor SCT013-100 sean posicionados de manera perpendicular al cable, ya que esto contribuye a minimizar los errores en las mediciones y mejorar la precisión de los datos obtenidos de la corriente RMS.

Además, para el análisis del error en la medición del factor de potencia, se tomaron los valores obtenidos tanto de la fuente de alimentación como del prototipo, cuyos resultados se presentan en la tabla 20.

**Tabla 20.** Error en medición de factor de potencia.

N.º	Factor de Potencia (V)		Cálculo de errores	
	Fuente	Prototipo	Error Absoluto	Error Relativo (%)
1	0.99	0.99	0.00	0.000
2	0.99	0.99	0.00	0.000
3	0.99	0.98	0.01	1.010
4	0.99	0.98	0.01	1.010
5	0.99	0.98	0.01	1.010
6	0.99	0.99	0.00	0.000
7	0.99	0.98	0.01	1.010
8	0.99	0.99	0.00	0.000
9	0.99	0.99	0.00	0.000
10	0.99	0.99	0.00	0.000

**Fuente:** Elaboración propia.



**Figura 53.** Grafica de las mediciones de factor de potencia por prototipo y fuente de alimentación.

**Fuente:** Elaboración propia.

Las mediciones del factor de potencia en luminarias LED muestran una estabilidad significativa, manteniéndose en un valor cercano a 0.99, como se muestra en la Tabla 20 y la figura 53. Este resultado indica que las luminarias presentan un comportamiento altamente eficiente en cuanto al uso de la energía reactiva.

Asimismo, al comparar los valores obtenidos con el instrumento de medición y el prototipo, se observa que el margen de error en las mediciones es mínimo. En la mayoría de los casos, el error absoluto es de 0.00, mientras que en algunas mediciones puntuales se presenta una ligera diferencia de 0.01, lo que equivale a un error relativo del 1.01%.

Luego de realizar las pruebas de medición de los parámetros eléctricos, cuyos resultados fueron favorables, se procedió a analizar la conectividad del prototipo con la plataforma Ubidots y se verificó el correcto envío de reportes diarios del sistema de iluminación, así como la generación de alertas en caso de presentar fallos en el sistema de iluminación LED.

## 4.2 Prueba de conectividad del prototipo con la plataforma Ubidots.

### 4.2.1 Prueba de datos enviados en un día.

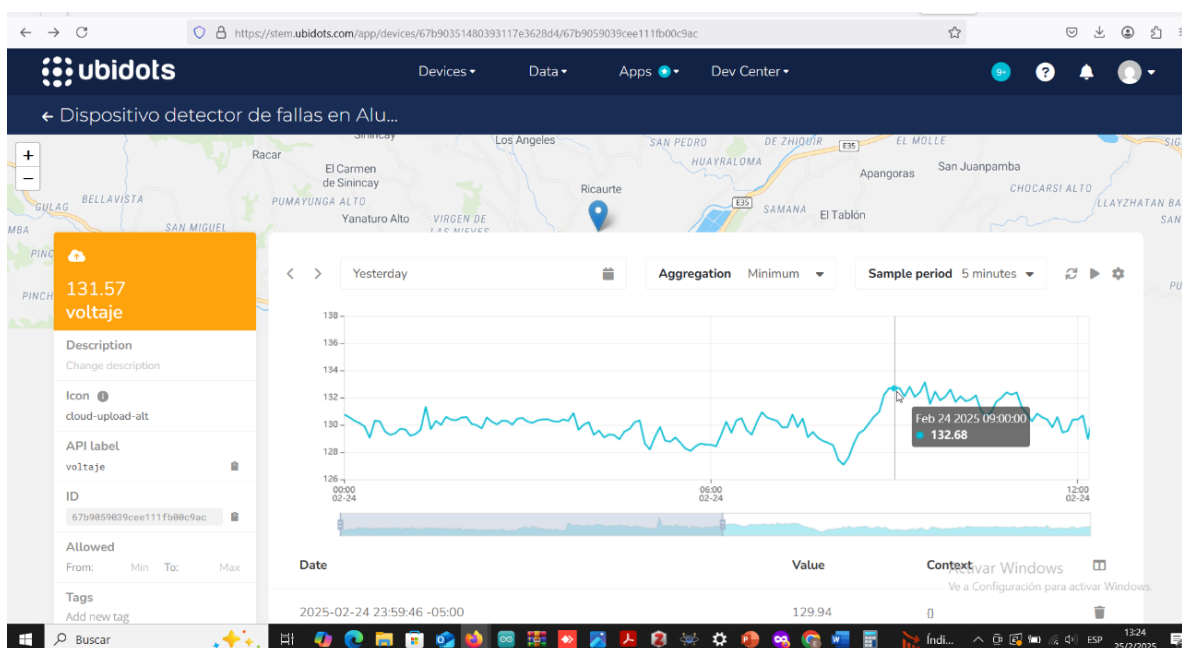


Figura 54. Medición diaria del voltaje.

Fuente: Elaboración propia.

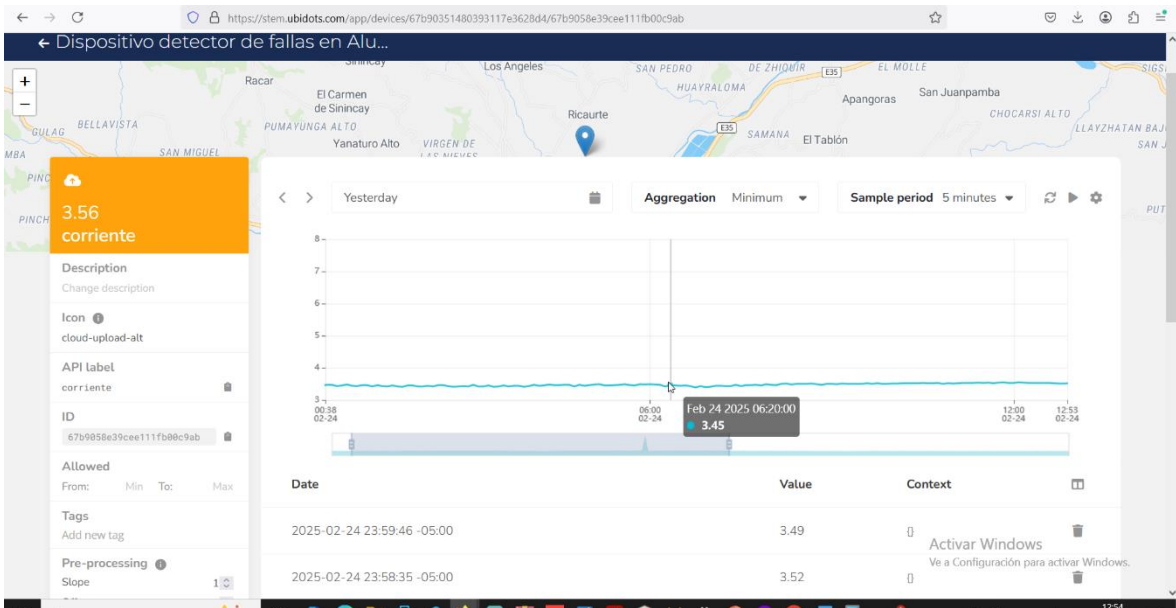


Figura 55. Medición diaria de la corriente.

Fuente: Elaboración propia.

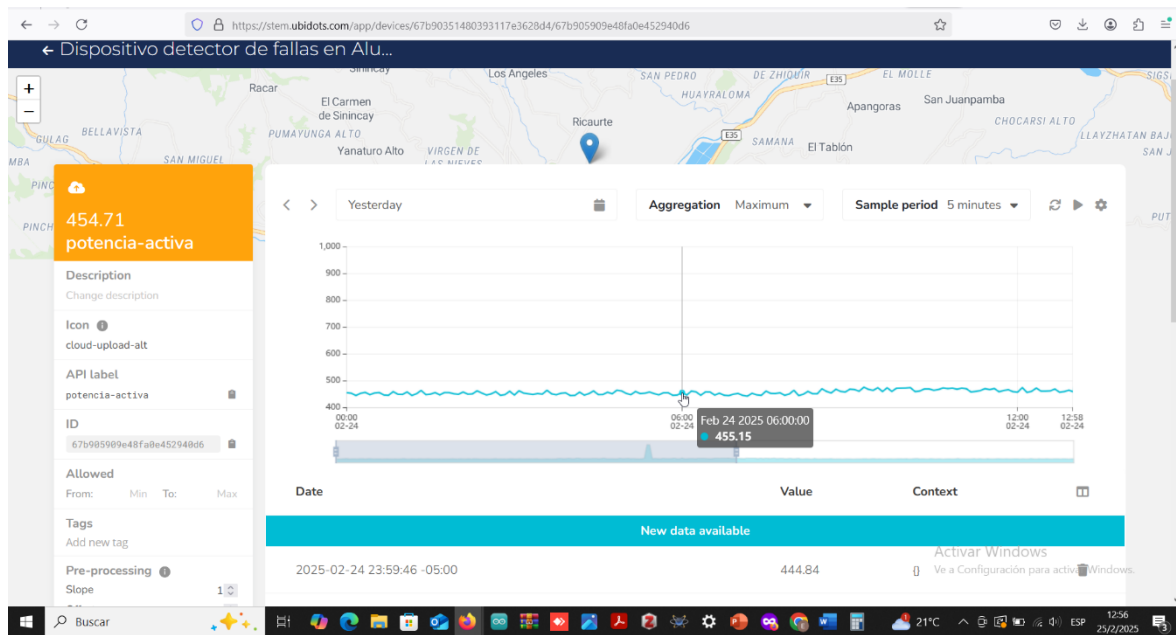
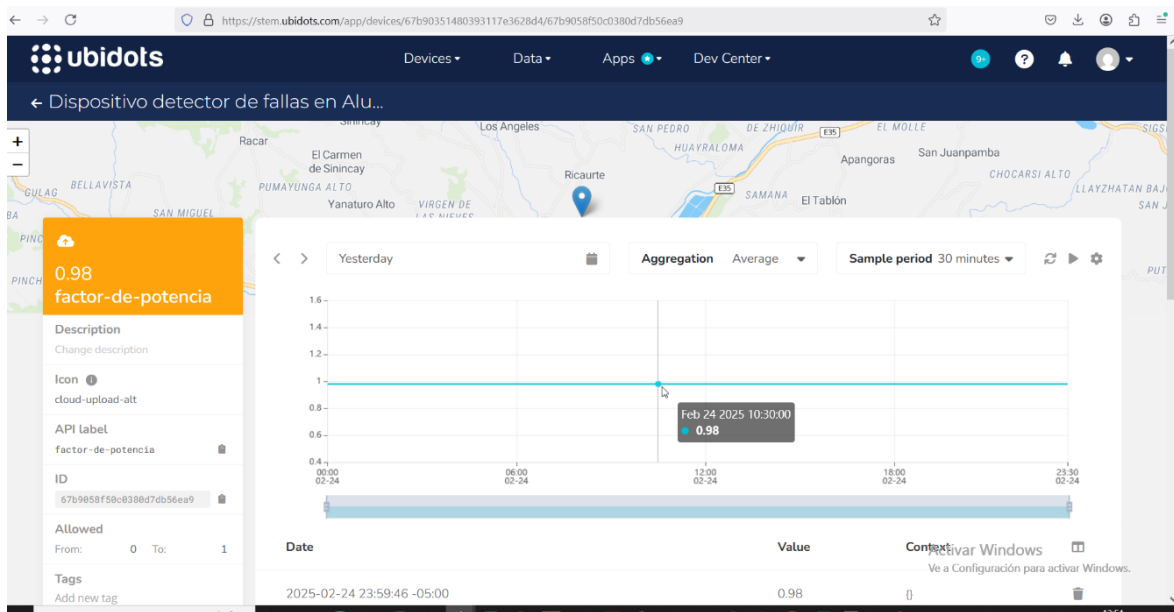


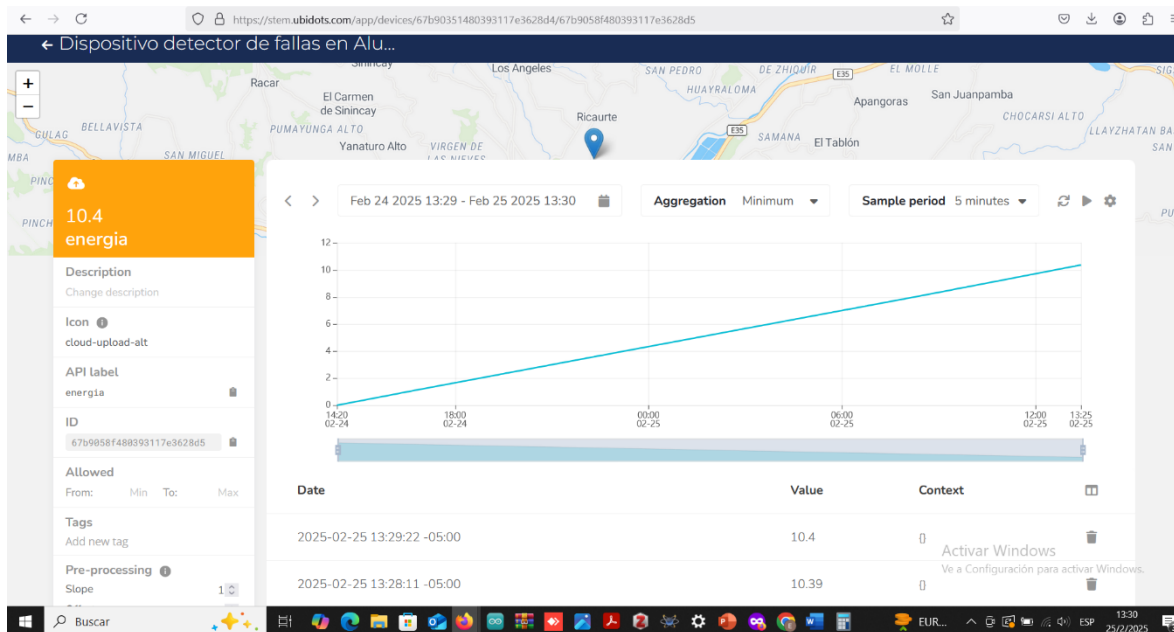
Figura 56. Medición diaria de la potencia activa.

Fuente: Elaboración propia.



**Figura 57.** Medición diaria del factor de potencia.

**Fuente:** Elaboración propia.



**Figura 58.** Medición diaria de la energía consumida.

**Fuente:** Elaboración propia.

En las figuras presentadas, se puede evidenciar las gráficas y los valores de voltaje, corriente, potencia activa, factor de potencia y energía medidos por los sensores. Asimismo, en el código de Arduino se programó para registrar las mediciones y enviarlas a la plataforma Ubidots en intervalos de un minuto durante un día, con el objetivo de realizar las pruebas iniciales del prototipo. Posteriormente, estos datos se almacenan en variables definidas, lo

que permite su monitoreo en tiempo real a través del panel de control (dashboard) de Ubidots. Además, la información es mostrada simultáneamente en la pantalla LCD del prototipo, lo que facilita un seguimiento preciso de las mediciones.

#### 4.2.2 Prueba de datos enviados, totales.

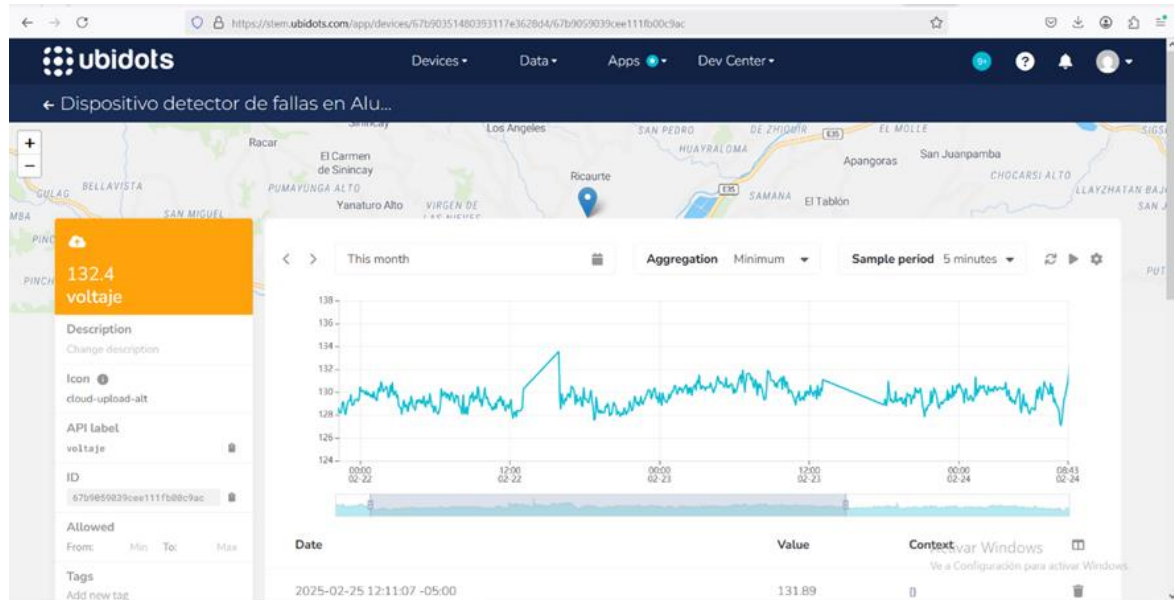


Figura 59. Medición total de datos enviados de voltaje.

Fuente: Elaboración propia.

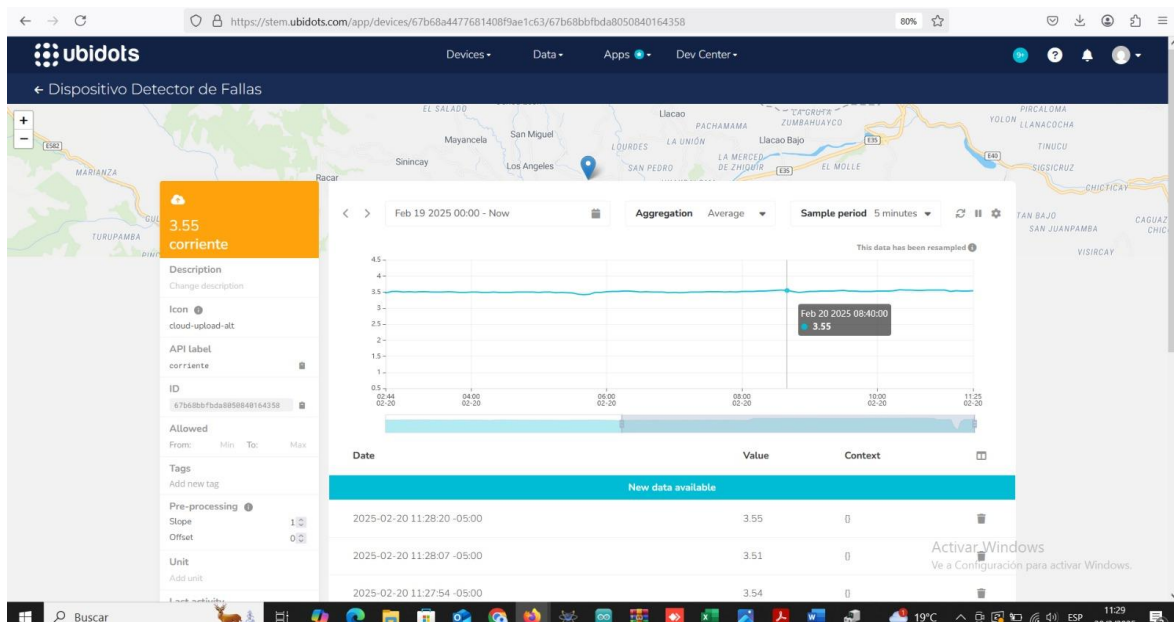
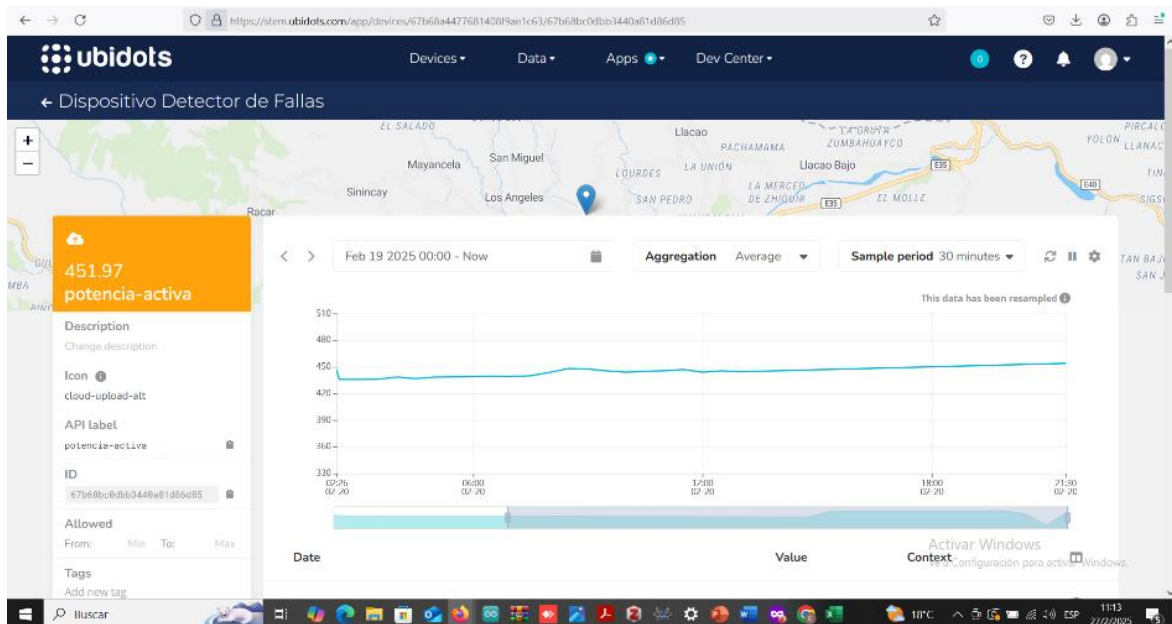
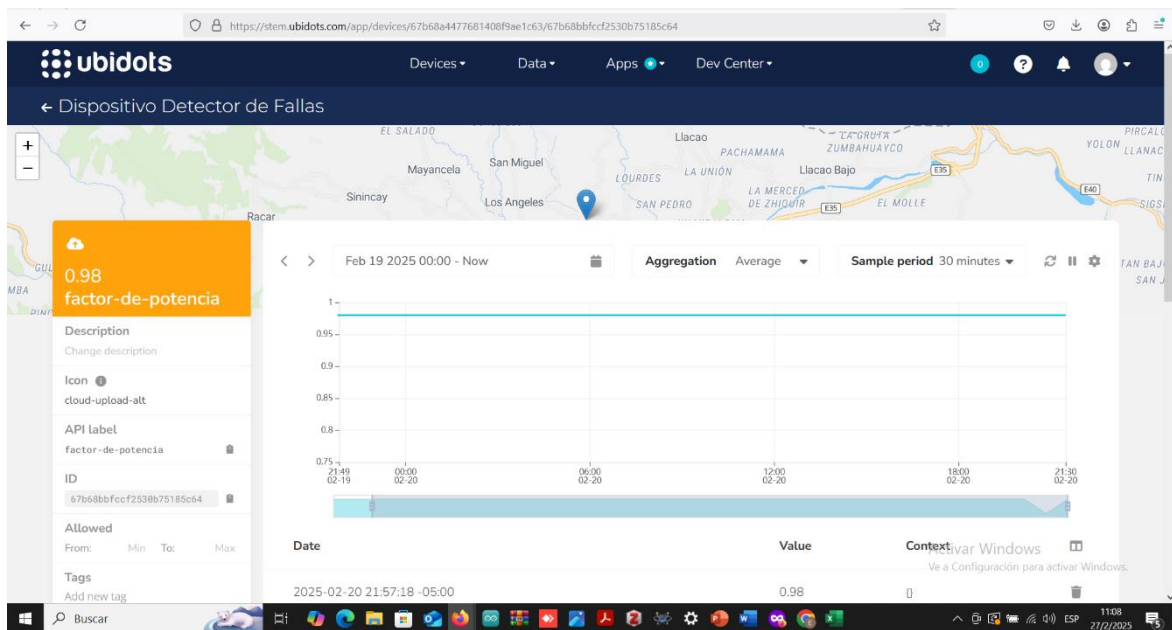


Figura 60. Medición total de datos enviados de corriente.

Fuente: Elaboración propia.



**Figura 61.** Medición total de datos enviados de la potencia activa.  
**Fuente:** Elaboración propia.



**Figura 62.** Medición total de datos enviados del factor de potencia.  
**Fuente:** Elaboración propia.

Tal como se mencionó anteriormente, las figuras presentadas ilustran la simulación del envío de datos en tiempo real a la plataforma Ubidots. Durante un período de 15 días, se logró recopilar datos de manera eficiente. En este sentido, los parámetros registrados evidencian una ligera variabilidad en el consumo de la energía eléctrica de las luminarias LED de alumbrado público, así como en la red de suministro eléctrico.

#### 4.3 Prueba de envío de reportes diarios y alertas del prototipo mediante SMS.

Para evaluar la capacidad del prototipo en la transmisión de información en tiempo real mediante la comunicación GSM, se realizaron pruebas de envío de reportes diarios y alertas mediante SMS. Estas pruebas permitieron validar la eficacia del sistema en la detección de fallas en el sistema de alumbrado, asegurando que los datos recopilados fueran transmitidos de manera oportuna y precisa a un dispositivo móvil.

Como parte de la evaluación, se simularon diferentes tipos de fallas en el sistema de alumbrado LED de prueba, efectuado en el laboratorio de luminotecnia, con el objetivo de verificar la respuesta del prototipo ante distintas anomalías en el sistema. Durante las pruebas, el sistema detectó y reportó las siguientes fallas:

- **Cortes de energía:** Interrupciones programadas totales del suministro eléctrico, registradas como eventos críticos en el sistema.
- **Bajas de voltaje:** Disminuciones reguladas en el voltaje de alimentación de las luminarias LED mediante la utilización de la fuente de alimentación (AC Power Source).
- **Sobrevoltajes:** Incrementos regulados del voltaje por encima de los valores nominales de red eléctrica monofásica, los cuales pueden generar daños en los componentes electrónicos de las luminarias.
- **Caídas de corriente:** Disminución de corriente ocasionada por el apagado individual de cada luminaria, para evaluar la capacidad del prototipo en la detección de variaciones de corriente. Este procedimiento simula la posible falla de una luminaria, como en el caso de que se queme, permitiendo al prototipo identificar y alertar sobre la anomalía de manera eficiente.
- **Consumo anómalo de energía:** Fluctuaciones inesperadas en la potencia consumida por las luminarias, como el caso particular de una luminaria LED que presento fallos en el driver, generando el indicativo de fallas en el sistema, así como su deterioro de los equipos.

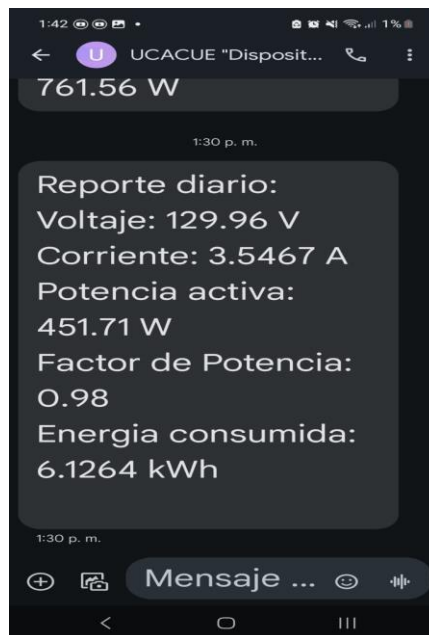
Cada una de estas fallas fue detectada por el prototipo y generó automáticamente alertas, las cuales fueron enviadas por SMS a un número de contacto móvil preconfigurado. A su vez, se verificó correctamente la recepción de estos mensajes, asegurando que la información transmitida de los parámetros eléctricos fuera clara y detallada para facilitar la interpretación por parte del usuario.

### 4.3.1 Reportes diarios generados por el prototipo.



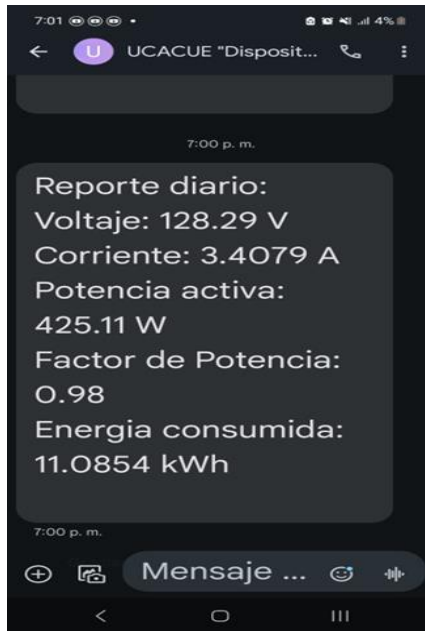
**Figura 63.** Reporte enviado en horas de la mañana.

**Fuente:** Elaboración propia.



**Figura 64.** Reporte enviado en horas de la tarde.

**Fuente:** Elaboración propia.

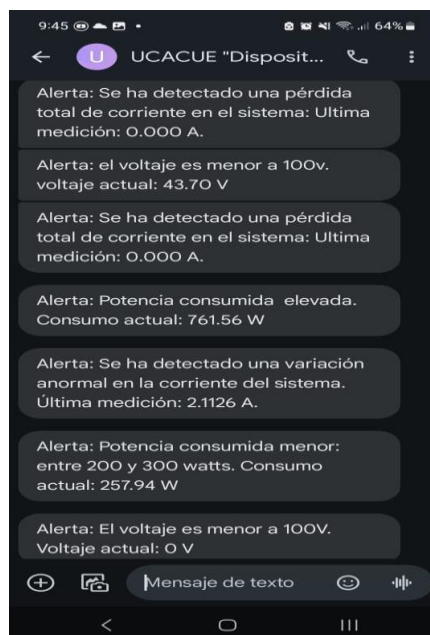


**Figura 65.** Reporte enviado en horas de la noche.

**Fuente:** Elaboración propia.

En las figuras 63, 64 y 65 se puede ver que el usuario recibió los diferentes datos de las variables medidas por el prototipo en 3 diferentes horas del día. Esto resulta fundamental, ya que permitiría al personal de mantenimiento conocer el estado operativo del sistema de alumbrado público y detectar posibles anomalías, asegurando así su correcto funcionamiento.

#### **4.3.2 Notificaciones de alertas enviadas por el prototipo de variaciones de voltaje, corriente y potencia consumida.**



**Figura 66.** Notificación de alerta de variaciones de corriente, voltaje y potencia consumida.

Fuente: Elaboración propia.



Figura 67. Notificación de alerta de variaciones de corriente, voltaje y potencia consumida.

Fuente: Elaboración propia.

El sistema de alertas desempeña un papel fundamental al proporcionar diversas funciones, como se muestra en las figuras 66 y 67. En este sentido, permite al operador saber el estado del sistema de iluminación ante cualquier fallo ocurrido en el sistema de alumbrado público, facilitando así una respuesta oportuna y eficiente.

#### 4.4 Exportación de los datos de la plataforma.

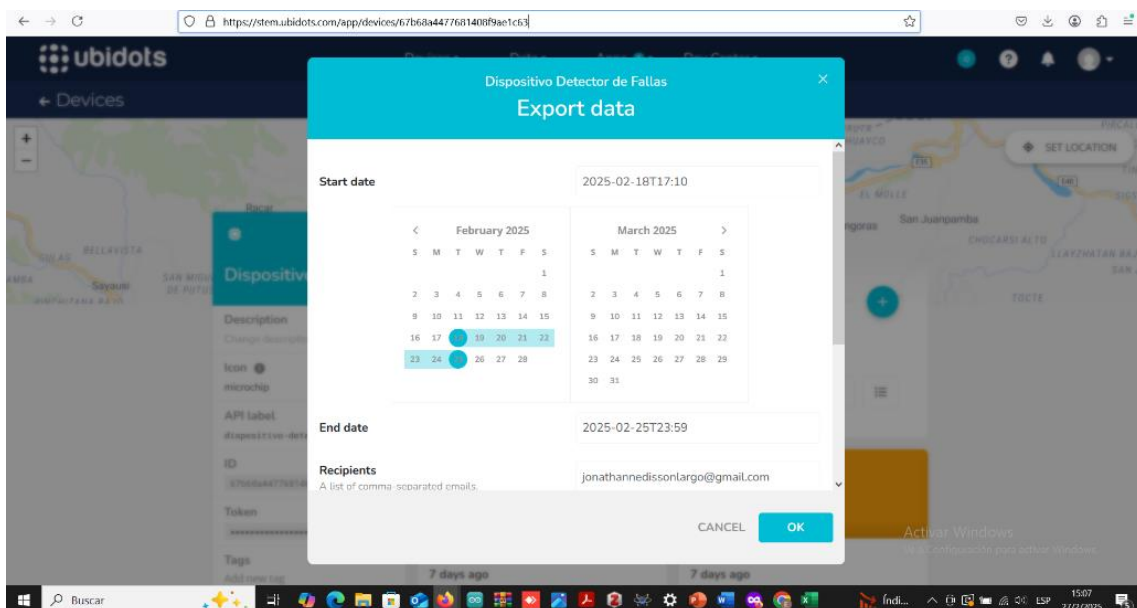


Figura 68. Rango de exportación de datos.

Fuente: Elaboración propia.

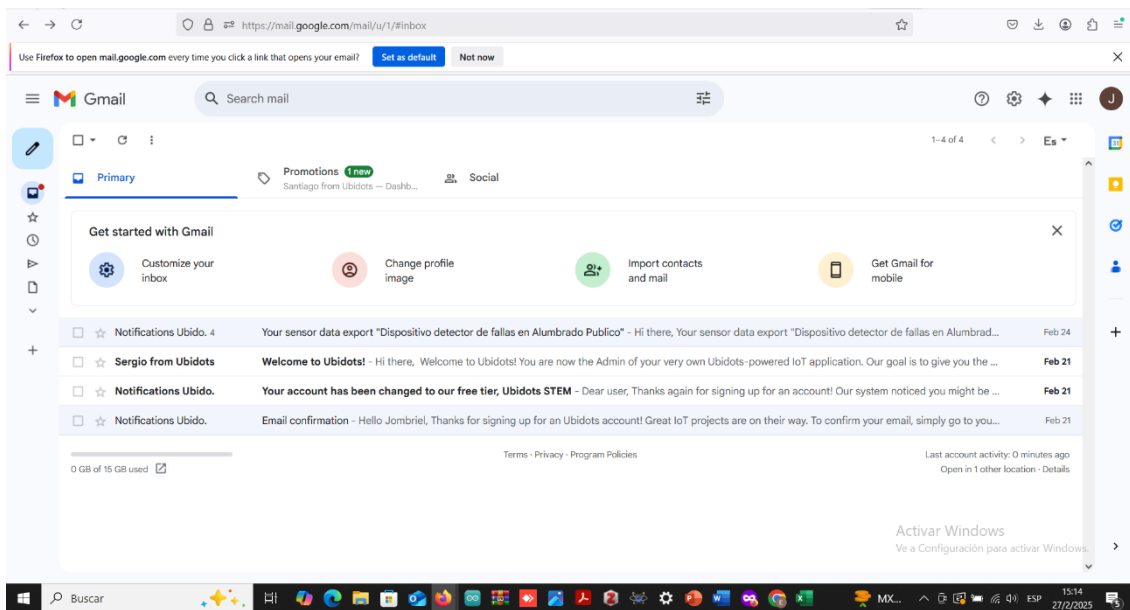


Figura 69. Correo electrónico recibido de la plataforma para la descarga de los datos.

Fuente: Elaboración propia.

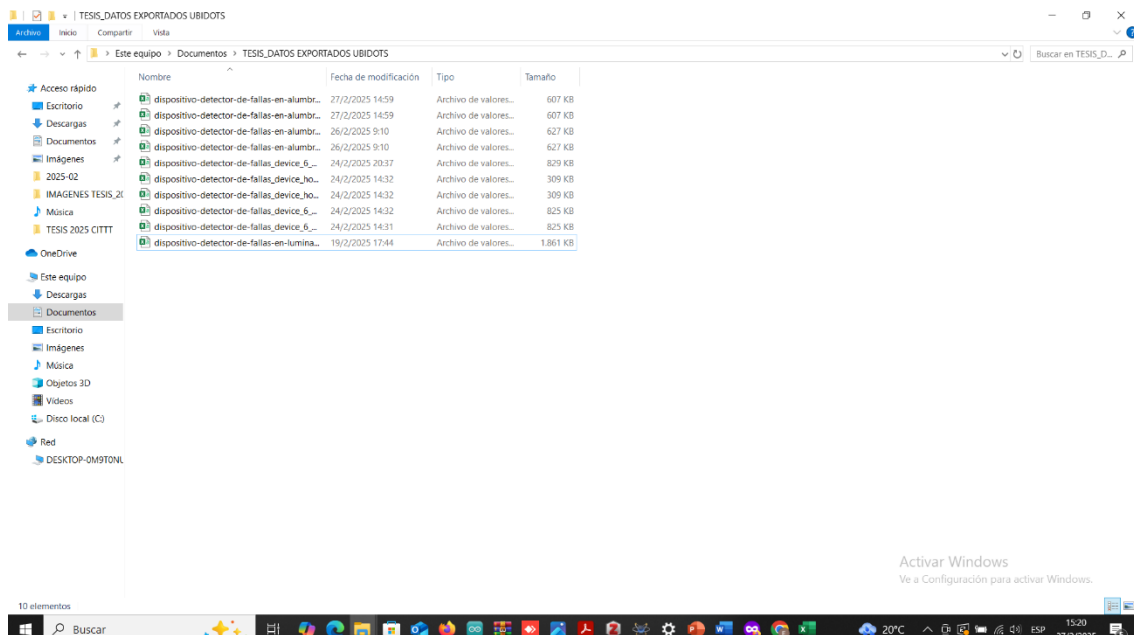


Figura 70. Archivos en formato Excel del total de datos descargados

Fuente: Elaboración propia.

El proceso de exportación de datos sigue el orden presentado en las Figuras 68, 69 y 70. La plataforma permite seleccionar un rango de tiempo específico para la exportación de los datos del cliente, lo cual es aplicable a cada una de las variables creadas en el sistema. Una vez definido el intervalo deseado, se genera un enlace de descarga que es enviado por correo electrónico. Al hacer clic en dicho enlace, la descarga del archivo en formato Excel se

inicia automáticamente. Al abrir el archivo, se presentan las variables medidas en intervalos de un minuto, permitiendo un análisis detallado del comportamiento del sistema, como se presenta en la figura 71.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R
1	timestamp	created_at	context_col	corriente	created_at	context_en	energia	created_at	context_fic	factor-de-p	created_at	context_ho	horas-de-h	created_at	context_po	potencia-a	created_at	context_vol
2	1.74045E+12	1.74045E+12	()	3.483	1.74045E+12	()	29.494	1.74045E+12	()	0.98	1.74045E+12	()	6.54	1.74045E+12	()	442.49	1.74045E+12	()
3	1.74045E+12	1.74045E+12	()	3.499	1.74045E+12	()	29.407	1.74045E+12	()	0.96	1.74045E+12	()	6.52	1.74045E+12	()	451.04	1.74045E+12	()
4	1.74045E+12	1.74045E+12	()	3.508	1.74045E+12	()	29.318	1.74045E+12	()	0.98	1.74045E+12	()	6.5	1.74045E+12	()	444.04	1.74045E+12	()
5	1.74045E+12	1.74045E+12	()	3.507	1.74045E+12	()	29.231	1.74045E+12	()	0.99	1.74045E+12	()	6.48	1.74045E+12	()	451.63	1.74045E+12	()
6	1.74045E+12	1.74045E+12	()	3.496	1.74045E+12	()	29.142	1.74045E+12	()	0.98	1.74045E+12	()	6.46	1.74045E+12	()	443.88	1.74045E+12	()
7	1.74045E+12	1.74045E+12	()	3.489	1.74045E+12	()	2.905	1.74045E+12	()	0.98	1.74045E+12	()	6.44	1.74045E+12	()	442.24	1.74045E+12	()
8	1.74045E+12	1.74045E+12	()	3.506	1.74045E+12	()	28.963	1.74045E+12	()	0.99	1.74045E+12	()	6.42	1.74045E+12	()	450.97	1.74045E+12	()
9	1.74045E+12	1.74045E+12	()	3.498	1.74045E+12	()	28.874	1.74045E+12	()	0.98	1.74045E+12	()	6.4	1.74045E+12	()	445.84	1.74045E+12	()
10	1.74045E+12	1.74045E+12	()	3.502	1.74045E+12	()	28.786	1.74045E+12	()	0.99	1.74045E+12	()	6.38	1.74045E+12	()	447.52	1.74045E+12	()
11	1.74045E+12	1.74045E+12	()	3.514	1.74045E+12	()	28.698	1.74045E+12	()	0.98	1.74045E+12	()	6.36	1.74045E+12	()	445.3	1.74045E+12	()
12	1.74045E+12	1.74045E+12	()	3.503	1.74045E+12	()	28.611	1.74045E+12	()	0.98	1.74045E+12	()	6.34	1.74045E+12	()	444.74	1.74045E+12	()
13	1.74045E+12	1.74045E+12	()	3.499	1.74045E+12	()	28.523	1.74045E+12	()	0.98	1.74045E+12	()	6.32	1.74045E+12	()	444.12	1.74045E+12	()
14	1.74045E+12	1.74045E+12	()	3.518	1.74045E+12	()	28.436	1.74045E+12	()	0.98	1.74045E+12	()	6.3	1.74045E+12	()	445.37	1.74045E+12	()
15	1.74045E+12	1.74045E+12	()	3.504	1.74045E+12	()	28.348	1.74045E+12	()	0.98	1.74045E+12	()	6.28	1.74045E+12	()	441.96	1.74045E+12	()
16	1.74045E+12	1.74045E+12	()	3.501	1.74045E+12	()	28.262	1.74045E+12	()	0.98	1.74045E+12	()	6.26	1.74045E+12	()	449.65	1.74045E+12	()
17	1.74045E+12	1.74045E+12	()	3.497	1.74045E+12	()	28.173	1.74045E+12	()	0.98	1.74045E+12	()	6.24	1.74045E+12	()	443.11	1.74045E+12	()
18	1.74045E+12	1.74045E+12	()	3.503	1.74045E+12	()	28.086	1.74045E+12	()	0.98	1.74045E+12	()	6.22	1.74045E+12	()	452.06	1.74045E+12	()
19	1.74045E+12	1.74045E+12	()	3.501	1.74045E+12	()	27.997	1.74045E+12	()	0.98	1.74045E+12	()	6.2	1.74045E+12	()	446.95	1.74045E+12	()
20	1.74045E+12	1.74045E+12	()	3.509	1.74045E+12	()	27.904	1.74045E+12	()	0.98	1.74045E+12	()	6.18	1.74045E+12	()	444.71	1.74045E+12	()
21	1.74045E+12	1.74045E+12	()	3.503	1.74045E+12	()	27.817	1.74045E+12	()	0.98	1.74045E+12	()	6.16	1.74045E+12	()	444.01	1.74045E+12	()
22	1.74045E+12	1.74045E+12	()	3.524	1.74045E+12	()	27.729	1.74045E+12	()	0.98	1.74045E+12	()	6.14	1.74045E+12	()	447.6	1.74045E+12	()
23	1.74045E+12	1.74045E+12	()	3.511	1.74045E+12	()	27.641	1.74045E+12	()	0.98	1.74045E+12	()	6.12	1.74045E+12	()	441.9	1.74045E+12	()
24	1.74045E+12	1.74045E+12	()	3.521	1.74045E+12	()	27.555	1.74045E+12	()	0.98	1.74045E+12	()	6.1	1.74045E+12	()	448.27	1.74045E+12	()
25	1.74045E+12	1.74045E+12	()	3.508	1.74045E+12	()	27.466	1.74045E+12	()	0.98	1.74045E+12	()	6.08	1.74045E+12	()	442.69	1.74045E+12	()
26	1.74045E+12	1.74045E+12	()	3.534	1.74045E+12	()	27.379	1.74045E+12	()	0.98	1.74045E+12	()	6.06	1.74045E+12	()	447.65	1.74045E+12	()
27	1.74045E+12	1.74045E+12	()	3.512	1.74045E+12	()	27.291	1.74045E+12	()	0.98	1.74045E+12	()	6.04	1.74045E+12	()	448.82	1.74045E+12	()
28	1.74045E+12	1.74045E+12	()	3.533	1.74045E+12	()	27.203	1.74045E+12	()	0.97	1.74045E+12	()	6.02	1.74045E+12	()	443.36	1.74045E+12	()

Figura 71. Libros totales exportados a Excel de las variables eléctricas.

Fuente: Elaboración propia.

#### 4.5 Costo del prototipo de detección de fallas en luminarias LED de alumbrado Público.

Como se muestra en la tabla 21, se presenta el presupuesto preliminar de los materiales utilizados para la construcción e implementación del prototipo de detección de fallas en luminarias LED de alumbrado público. En esta tabla, se estima que la inversión requerida asciende a \$265.45, considerando un IVA del 15%.

Además, cabe destacar que este presupuesto ha sido elaborado según los precios que se encontraron en las tiendas de venta de componentes electrónicos en la ciudad de Cuenca. Sin embargo, es importante considerar que el costo final puede variar en función de diversos factores, como el lugar de instalación, las condiciones del sistema eléctrico y las modificaciones o cambios que se pueden presentar en el momento de realizar las pruebas del prototipo.

Asimismo, este análisis, además de permitir evaluar la viabilidad económica del proyecto desarrollado, sirve como base para futuras mejoras, optimizando costos y maximizando la eficiencia de este sistema.

**Tabla 21.** Costo del prototipo desarrollado.

<b>PRESUPUESTO DE MATERIALES PARA EL PROTOTIPO</b>				
<b>ITEM</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Descripción</b>	<b>P. Unitario (USD)</b>	<b>Total (USD)</b>
1	1	Sensor de voltaje ZMPT101B	12	12
2	1	Enchufe	1	1
3	1	Fuente conmutada	12	12
4	2	Sensor de corriente SCT013-000 100	12	24
5	1	Transformador con toma central a 24V	7	7
6	1	Esp32 38 pines	12	12
7	25	Cables de conexión macho hembra	0,1	2,5
8	1	Arduino Nano	5,5	5,5
9	1	Pantalla LCD 4x16	8	8
10	1	Caja impresa	60	60
11	1	Shield para Arduino	4,8	4,8
12	1	I2C para LCD	3	3
13	1	Módulo GSM	11,5	11,5
14	2	Reguladores LM2596S	6	12
15	1	Estaño (3 metros)	2,1	2,1
16	1	Reloj+pila	8	8
17	18	Borneras PCB	0,2	3,6
18	2	Jack sensor de corriente	1,5	3
19	1	Cable de voltaje VAC	4	4
20	11	Resistencias	0,03	0,33
21	2	Condensadores 10uf	0,25	0,5
22	2	Placas PCB para imprimir circuito	7	14
23	1	Cable USB para Arduino Nano	5	5
24	1	Cable USB para Esp32	5	5
25	1	Cable v8	10	10
26	15	Cable flexible #12	0.70	10,5
			Subtotal	230,83
		<b>Total parcial</b>	<b>IVA</b>	<b>15%</b>
			<b>Total</b>	<b>265,4545</b>

**Fuente:** Elaboración propia.

## CAPÍTULO V

### 5 Conclusiones y recomendaciones.

#### 5.1 Conclusiones.

En el presente estudio, las pruebas del prototipo no se pudieron llevar a cabo en el sistema de iluminación LED del parque La Libertad como se tenía planificado al inicio del trabajo de investigación debido a la demora en la respuesta y aprobación de procedimientos internos por parte de la Empresa Eléctrica Regional Centro Sur C.A. Como alternativa, se optó por realizar las pruebas en el laboratorio de luminotecnia del CIITT, utilizando luminarias de alumbrado público disponibles. No obstante, a pesar de esta limitación, la evaluación en un entorno controlado permitió comprobar el correcto funcionamiento del sistema y validar su desempeño de manera eficiente y accesible.

Así mismo la implementación del prototipo para el monitoreo y detección de fallas en un grupo de luminarias LED de alumbrado público ha demostrado ser una solución eficiente y de bajo costo en comparación con los sistemas de detección individual por luminaria presentados en otras investigaciones. Esto se debe a que los sensores empleados ofrecen una alta capacidad de medición, lo que permite supervisar de manera integral todo un sistema de iluminación. En particular, el sensor de corriente utilizado es capaz de medir hasta 100 amperios, lo que amplía su rango de aplicación.

El uso de Arduino IDE, es una herramienta ampliamente utilizada en proyectos a pequeña escala, que permitió la programación estructurada de los microcontroladores ESP32 y Arduino Nano, asegurando su compatibilidad con las librerías necesarias para la captura, procesamiento y transmisión de datos. En consecuencia, el uso de estas librerías optimizó los cálculos de las variables eléctricas, lo que permitió mejorar la precisión y reducir el margen de error en las mediciones obtenidas.

Una vez implementado el prototipo desarrollado demostró tener una alta precisión en la medición de voltaje, corriente, potencia y factor de potencia, con errores relativos generalmente inferiores al 1%. Si bien las mediciones de corriente y factor de potencia presentan mínimas variaciones respecto a los dispositivos de medición utilizados para validar las pruebas realizadas. Así mismo en la medición del voltaje se identifican algunos valores con mayor error, lo que se sugiere la necesidad de una calibración más precisa de los sensores en ciertos casos. En general, el prototipo es una alternativa viable y confiable para el monitoreo de parámetros eléctricos, con un desempeño aceptable dentro de los márgenes de error permitidos.

Durante la fase de pruebas en laboratorio, se comprobó que el prototipo es capaz de detectar y reportar de manera eficiente distintas fallas simuladas en el sistema de alumbrado de prueba, como cortes de energía, caídas de voltaje, sobretensiones, caídas de corriente y consumos anómalos de energía. Gracias a sus sensores, el sistema identificó con precisión

estas variaciones y generó alertas automáticas enviadas por SMS, asegurando una respuesta oportuna ante posibles fallos. Además, el desarrollo del sistema posibilitó el almacenamiento de datos en la nube y la visualización grafica en tiempo real de las variables eléctricas a través de la plataforma Ubidots, lo que facilitaría una gestión optimizada del mantenimiento y reducción en los tiempos de corrección de fallas en los sistemas de iluminación LED de alumbrado público.

Con este sistema implementado en entornos operativos reales, se contribuiría significativamente al uso más eficiente de la energía eléctrica y a la optimización de la calidad de iluminación en espacios públicos. A su vez, estos mecanismos impulsarían el desarrollo de infraestructuras inteligentes y sostenibles en la ciudad de Cuenca.

## **5.2 Recomendaciones.**

Para el funcionamiento óptimo del prototipo, se recomienda utilizar librerías oficiales y compatibles con Arduino IDE, lo que garantizará precisión en la medición de parámetros eléctricos y una comunicación eficiente entre los sensores y el microcontrolador. De igual manera, es fundamental contar con una plataforma de almacenamiento de datos sin restricciones, lo que permitirá una supervisión continua del sistema de iluminación, facilitando el análisis de eventos en tiempo real y evitando así la pérdida de información.

Asimismo, se sugiere la implementación de fuentes de energía renovable, como paneles solares, para proporcionar autonomía al sistema desarrollado, reduciendo la dependencia de la red eléctrica asegurando un funcionamiento continuo en zonas con acceso limitado a la infraestructura eléctrica, aumentando la eficiencia y confiabilidad del sistema.

Además, se recomienda utilizar módulos de comunicación GSM que ofrezcan un mayor alcance y estabilidad en la red móvil, asegurando una comunicación más confiable y reduciendo la pérdida de datos en zonas con señal inestable. Además, en caso de replicar este tipo de proyectos a una escala mayor, resulta esencial evaluar la contratación de un plan de datos con operadoras nacionales, ya que el envío frecuente de mensajes SMS a los dispositivos móviles puede generar altos costos operativos.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agencia de Regulación y Control de Electricidad. (2019, diciembre). *Resolución N° 051/18*.  
[https://www.cnelep.gob.ec/wp-content/uploads/2019/02/pliego\\_tarifario\\_servicio\\_alumbrado\\_publico\\_general\\_2019.pdf](https://www.cnelep.gob.ec/wp-content/uploads/2019/02/pliego_tarifario_servicio_alumbrado_publico_general_2019.pdf)
- Almeida, H. A. V. (2019). Análisis de los Beneficios Económicos y Sociales para la Implementación de Iluminación LED en el Alumbrado Público. *INSTA MAGAZINE*, 2(1), 5–7.
- Alcívar Centeno, J. R., Loor Chalar, W. R., Vargas-Quiñonez, H. J., Quiñónez-Guagua, E. F., & Gresely-Santi, F. A. (2023). Análisis del sistema de alumbrado público de tipo sodio, mercurio y led con paneles fotovoltaicos. *Ibero-American Journal of Engineering & Technology Studies*, 3(1), Article 1. <https://doi.org/10.56183/iberotecs.v3i1.606>
- Álvarez, J. A. (2017). *Implementación de un sistema de monitoreo para personas con discapacidad moderada utilizando hardware y software libre*. Escuela Politécnica Nacional.
- Alonso, G. G. (2015). Medidor de consumo con Arduino. Recuperado 5 de enero de 2025, de <http://www.gonzalogalvan.es/medidor-de-consumo-con-arduino-un-poco-de-teoria/>
- Arquiled. (2022, abril 26). Alumbrado público LED inteligente: Una oportunidad en tiempos de crisis. *Arquiled*. <https://www.arquiled.com/es/alumbrado-publico-led-inteligente-una-oportunidad-en-tiempos-de-crisis/>
- Aulla, A. A. Y. (2014). *“Diseño e implementación de un prototipo para el bloqueo y localización de vehículos a través de tecnologías GPS Y GSM-SMS”*.
- Barbara. (2024, mayo). *Protocolos de comunicación IoT que debes conocer*. <https://www.barbara.tech/es/blog/protocolos-iot-que-deberias-conocer>
- Barros, M., Brion, M., & Caporalletti, A. (2013, mayo). *Estructura de redes 2G GSM - Speaker Deck*. <https://speakerdeck.com/manuca/estructura-de-redes-2g-gsm>
- Borges, L. A., da Silva, R. S., & Gayathri, P. (2020). Smart Lighting System using IoT. *International Journal of Advanced Research in Computer Science and Software Engineering*, 10(5), 29-35
- Boke, A. K., Nakhate, S., & Rajawat, A. (2021). Efficient Key Generation Techniques for Securing IoT Communication Protocols. *IETE Technical Review*, 38(3), 282-293. <https://doi.org/10.1080/02564602.2020.1726216>
- Camaravalencia. (s. f.). Infraestructuras: Redes Inalámbricas: Capítulo 11 | Guía de Industria 4.0. *Tecnología para los negocios*. Recuperado 28 de enero de 2025, de <https://ticnegocios.camaravalencia.com/servicios/tendencias/caminar-con-exito-hacia-la-industria-4-0-capitulo-11-infraestructuras-i-redes-inalambricas/>

- Campisi, D., Gitto, S., & Morea, D. (2018). Economic feasibility of energy efficiency improvements in street lighting systems in Rome. *Journal of Cleaner Production*, 175, 190-198. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.12.063>
- CENTROSUR. (2024, marzo). Autoridades recorren obras de sustitución de luminarias en centro histórico de Cuenca—Centrosur. <https://www.centrosur.gob.ec/autoridades-recorren-obras-de-sustitucion-de-luminarias-en-centro-historico-de-cuenca/>
- Chabla, L., & Córdova, D. (2015). *Eficiencia energética en el alumbrado público del centro histórico de cuenca: Telegestión y sustitución de luminarias*. Universidad de Cuenca.
- Chantera, P. F., & Tobar, D. R. (2013). *Estudio de lámparas led para alumbrado público y diseño de un sistema Scada con control automático on/off*. Universidad Politécnica Salesiana Sede Quito.
- Chen, J., Zhang, Y., & Sun, Q. (2021). Real-time Monitoring and Control System for Smart Street Lighting Based on ZigBee Network. *Journal of Electrical and Computer Engineering*, 2021, 1-9.
- Chucas, J. F. (2022). *Protocolos de comunicación de internet de las cosas para la transferencia de datos aplicados a un sensor de color*.
- Consejo Nacional de Electricidad. (2011, Noviembre). *REGULACIÓN No. CONELEC 008/11*.
- Cortés, A. (2022, septiembre 17). *Tutorial ESP32*. Acortes Software. <https://acortes.co/tutorial-esp32/>
- Domínguez, F. R., Municio, E. P., & Pérez, L. J. L. (2009). *Microcontrolador PIC16F84. Desarrollo de proyectos. 3ª edición*. Ra-Ma Editorial.
- Dorremocha, C. H., Martorell, J. M. O., & Sora, F. J. (2011). La iluminación con LED y el problema de la contaminación lumínica. *Cel Fosc*, 144, 36-42.
- Dumalux. (2023, agosto). *Alumbrado Público LED: Todo lo que Debes Saber*. <https://dumalux.com/blog/alumbrado-publico-led-todo-lo-que-debes-saber>
- Dusuniot. (2022, octubre 25). *Descripción general de los protocolos de red IoT inalámbricos y cómo elegir*. <https://www.dusuniot.com/es/blog/best-wireless-protocol-for-your-iot-project/>
- Espressif Systems. (2020). ESP32 Series Datasheet. Recuperado de [https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32\\_datasheet\\_en.pdf](https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_datasheet_en.pdf)
- Farnell. (s. f.). *IoT Wireless Network Protocols*. Farnell. Recuperado 28 de enero de 2025, de <https://es.farnell.com/iot-wireless-network-protocols>
- Fillipo, V., Cano, H., & Chaves, J. (2010, agosto). *Aplicaciones de iluminación con LEDs*. <https://www.cell.com/action/showPdf?pii=S2405-8440%2824%2907340-7>
- Franco, C., & Israel, L. (2017). *Gestión de mantenimiento para el alumbrado público del centro urbano de la ciudad de Cuenca*.

- Guerrero, U., & Remigio, C. (2010). *Monitoreo y control mediante mensajes de texto (GSM) para un sistema automatizado de propagación vegetativa de plantas de ornato*.
- Güngör, V. C., Sahin, D., Kocak, T., & Ergüt, S. (2017). Smart Grid Technologies: Communication Technologies and Standards. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 7(4), 529-539.
- Hayt, W., Kemmerly, J., & Durbin, S. (2007). *Análisis de circuitos en ingeniería* (7ma edición). McGRAW-Hill.
- Herrador, R. E. (2009, Noviembre). *Guía de Usuario de Arduino*.
- Iglesias, K. J., & Varas, R. H. (2020). *Diseño de un prototipo analizador de energía para monitoreo de parámetros tensión, corriente y temperatura con registro de eventos en sistemas de distribución monofásicos en 240vac de hasta 2KVA de potencia, mediante la plataforma Arduino y la aplicación SCADA monitoriza, dirigido a los clientes de Amper Ecuador S.A.* Universidad Politécnica Salesiana sede Guayaquil.
- Ingeniería SDL. (2011, marzo). *Alumbrado público*. <https://www.edeq.com.co/Portals/0/Proveedores-y-contratistas/Documentos/manual-de-normas-tecnicas/5-alumbrado-publico.pdf>
- Johnson, K., & Miller, P. (2023). Enhancing Urban Safety with Smart Lighting Systems. *Journal of Urban Technology*, 30(2), 120-138.
- Malagón, B., & Sánchez, H. (2021). *Diseño de un sistema de iluminación para el estadio Valeriano Gavini de la Universidad Politécnica Salesiana sede Cuenca utilizando tecnología LED y sistemas fotovoltaicos*. Universidad Politécnica Salesiana.
- Ministerio de Energía y Minas. (2019, abril). *Tarifa de alumbrado público para 2019 se fijó de acuerdo con 14 rangos de consumo*. <https://www.rekursyenergia.gob.ec/tarifa-de-alumbrado-publico-para-2019-se-fijo-de-acuerdo-a-14-rangos-de-consumo/>
- Ministerio de Minas Y Energía. (2024, mayo). *Reglamento Técnico de Iluminación y Alumbrado Público*. [https://www.minenergia.gov.co/documents/11687/03\\_Libro\\_3\\_RETILAP\\_2024\\_Rev\\_Final\\_WEB.pdf](https://www.minenergia.gov.co/documents/11687/03_Libro_3_RETILAP_2024_Rev_Final_WEB.pdf)
- Monroy, M. (2006). *Manual de la iluminación: Vol. Volumen I* (Ayuntamineto de Las Palmas de Gran Canaria).
- Nejad, M. F., Saberian, A., Hizam, H., Mohd Radzi, M. A., & Ab Kadir, M. Z. A. (2017). Application of smart power grid in developing countries. *2013 IEEE 7th International Power Engineering and Optimization Conference (PEOCO)*, 427-431. <https://doi.org/10.1109/PEOCO.2013.6564586>
- Orlando, F. L. R. (2018). *Ahorro energético en alumbrado público con el desarrollo de un prototipo de sistema de telegestión remoto para lámparas tipo led de la empresa eléctrica EMELNORTE S.A.*

- Ponce, E. W. (2023). *Regulación* Nro. ARCERNNR-007/23. [https://www.controlrecursosyenergia.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2023/07/27.-Regulacion-Nro.-ARCERNNR-007\\_23.pdf](https://www.controlrecursosyenergia.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2023/07/27.-Regulacion-Nro.-ARCERNNR-007_23.pdf)
- Pulla, G. (2013). *Evaluación energética del alumbrado público en la ciudad de Cuenca* [Universidad de Cuenca]. <file:///C:/Users/ASUS/Videos/TESIS%202025%20CITTT/TESIS%20PULLA.pdf>
- Raza, S., Wallgren, L., & Voigt, T. (2018). Security Considerations for the IoT in Smart Cities. *Computer*, 51(6), 56-65.
- Rojas, A. (2020, junio). *Tipos De Redes Inalámbricas: WPAN, WLAN, WMAN Y WWAN - Mundielectro*. <https://mundielectro.com/tipos-de-redes-inalambricas-wpan-wlan-wman-y-wwan/>
- Sáenz, C., Hernández, B., Sanz-Carrillo, D., Pellejero, I., & Gandía, L. M. (2024). High power illumination system for uniform, isotropic and time-controlled irradiance in photoactivated processes research. *Heliyon*, 10(10), e31309. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e31309>
- Salazar, J. (2017). *Wireless communications and networks* (2nd ed). Pearson Prentice Hall.
- Saleem, Y., Crespi, N., Rehmani, M. H., & Copeland, R. (2019). Internet of Things-Aided Smart Grid: Technologies, Architectures, Applications, Prototypes, and Future Research Directions. *IEEE Access*, 7, 62962-63003. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2913984>
- Sandoya, B. A. (2021). *Sistema de monitoreo inteligente de consumo de energía eléctrica (smart metering) con tecnología lora para hogares en la ciudad de Ambato*. Universidad técnica de Ambato.
- Shahinzadeh, H., Moradi, J., Gharehpetian, G. B., Nafisi, H., & Abedi, M. (2019). IoT Architecture for Smart Grids. *2019 International Conference on Protection and Automation of Power System (IPAPS)*, 22-30. <https://doi.org/10.1109/IPAPS.2019.8641944>
- Suyadhi, T. (2019, mayo). *Internet of Things | Monitoring Sensor and Controlling LED on Ubidots Dashboard Using MQTT Protocol | Robotics University*. <https://www.robotics-university.com/2019/05/internet-of-things-monitoring-sensor-and-controlling-led-on-ubidots-dashboard-using-mqtt-protocol.html>

## ANEXOS (Programaciones y pruebas de funcionamiento).

**Anexo 1.** Algoritmo de programación principal utilizado para el monitoreo, detección y reporte de fallas para un grupo de luminarias LED.

```
// Importación de librerías necesarias
#include "EmonLib.h" // Librería para medición de corriente
#include <Wire.h>
#include <ZMPT101B.h> // Librería para medición de voltaje
#include <LiquidCrystal_I2C.h> // Librería para la pantalla LCD
#include <RTCLib.h> // Librería para el RTC Tiny RTC I2C
#include <WiFi.h>
#include <HTTPClient.h>
#include <HardwareSerial.h>

// Definición de calibración del sensor de corriente
#define currCalibration 1.449 // Factor de calibración del sensor de corriente
unsigned long lastUbidotsSendTime = 0; // Nueva variable para control de envío
EnergyMonitor emon; // Objeto para medir corriente
float kWh = 0; // Variable para el consumo energético en kilovatios-hora
unsigned long lastmillis = millis(); // Tiempo de referencia para el cálculo de energía
// Configuración del sensor de voltaje
#define SENSITIVITY 600.0f // Sensibilidad del sensor de voltaje
#define CALIBRATION_FACTOR 1.147 // Factor de calibración del sensor de voltaje
#define NUM_SAMPLES 200 // Número de muestras para promediar medición de voltaje
ZMPT101B voltageSensor(35, 60.0); // sensor de voltaje
// Configuración de la pantalla LCD I2C
#define I2C_ADDR 0x27
LiquidCrystal_I2C lcd(I2C_ADDR, 16, 4); // Configuración de pantalla de 16x4 caracteres
RTC_DS1307 rtc; // Configuración del módulo RTC
int segundo, minuto, hora, día, mes;
long año; //variable año
DateTime HoraFecha; // Variable para almacenar la fecha y hora actual
float consumptionHours = 0;
```

```

// Definición de umbrales
#define VOLTAGE_THRESHOLD 40.0
#define CURRENT_THRESHOLD 0.08
// Configuración de la red WiFi
const char* ssid = "LUMEN_LAB";
const char* password = "Lumenlab2024";
// Configuración Ubidots (plataforma IoT para enviar datos)
const char* UBIDOTS_TOKEN = "BBUS-OkQ28YjpMVQ4agQIMiNgU4pcCTLCVt";
const char* DEVICE_LABEL = "dispositivo-detector-de-fallas";
const char* UBIDOTS_URL = "http://industrial.api.ubidots.com/api/v1.6/devices/";
// Configuración del módulo GSM para enviar SMS
HardwareSerial mySerial(1); // Usamos el puerto serial 1 del ESP32
const char* APN = "internet"; // APN del operador móvil
const char* phoneNumber = "0967344976"; // Número de teléfono destino
const int baudRate = 9600; // Velocidad de comunicación del módulo GSM
// Variables para control de envío de mensajes
unsigned long lastMessageTime = 0;
const unsigned long messageInterval = 15 * 60 * 1000; // Intervalo de 15 minutos
bool powerInRange = false;
// Función para conectar el ESP32 a la red WiFi
void connectToWiFi() {
    WiFi.begin(ssid, password);
    while (WiFi.status() != WL_CONNECTED) {
        delay(500);
    }
}
// Función para enviar datos a Ubidots
void sendToUbidots(float voltage, float current, float realPower, float powerFactor, float kWh, float consumptionHours) {
    if (WiFi.status() == WL_CONNECTED) {
        HTTPClient http;
        String url = String(UBIDOTS_URL) + String(DEVICE_LABEL);

```

```

http.begin(url);
http.addHeader("Content-Type", "application/json");
http.addHeader("X-Auth-Token", UBIDOTS_TOKEN);
String payload = "{";
payload += "\"Voltaje\":" + String (voltage, 2) + ",";
payload += "\"Corriente\":" + String (current, 4) + ",";
payload += "\"Potencia Activa\":" + String (realPower, 2) + ",";
payload += "\"Factor de Potencia\":" + String (powerFactor, 2) + ",";
payload += "\"Energia\":" + String (kWh, 4) + ",";
payload += "\"Horas de Funcionamiento\":" + String (consumptionHours, 2);
payload += "}";
http.POST(payload);
http.end();
}
}
// Función para inicializar el sistema
void setup() {
  Serial.begin(115200);
  connectToWiFi();
// Configuración del sensor de corriente
  emon.current(34, currCalibration);
  voltageSensor.setSensitivity(SENSITIVITY);
  Wire.begin(21, 22); // Configuración de la comunicación I2C
  lcd.init();
  lcd.backlight();
// Inicialización del RTC
  rtc.begin();
  if (!rtc.begin() || !rtc.isrunning()) {
    rtc.adjust(DateTime(F(__DATE__), F(__TIME__))); // Ajustar fecha y hora
  }
}

```

```

// // Configuración del módulo GSM

mySerial.begin(baudRate, SERIAL_8N1, 16, 17); // Configura SIM800L en los pines RX
(16) y TX (17) del ESP32

delay (1000);

Serial.println("Configurando SIM800L...");

sendATCommand("AT", "OK");

sendATCommand("AT+CGDCONT=1, \"IP\", \"\" + String (APN) + \"\", \"OK\");

sendATCommand("AT+CMGF=1", "OK");

Serial.println("SIM800L listo para interactuar.");

}

////////////////////////////////////VOLTAJE////////////////////////////////////

// Función para calcular el voltaje promedio basado en múltiples muestras

float getAverageVoltage() {

float sum = 0;

for (int i = 0; i < NUM_SAMPLES; i++) {

sum += voltageSensor.getRmsVoltage() * CALIBRATION_FACTOR + 0.5; // ajuste de
corriente "0"

delay (17);

}

return sum / NUM_SAMPLES;

}

////////////////////////////////////FACTOR DE POTENCIA////////////////////////////////////

// Función para obtener el factor de potencia dinámico

float getDynamicPowerFactor() {

int valorAnalogico = analogRead(33); // medidor de factor de potencia

return valorAnalogico / 4095.0;

}

////////////////////////////////////CORRIENTE////////////////////////////////////

void measureElectricalParameters(bool toggleScreen) {

emon.calcIrms(1480); // Cálculo de corriente efectiva

float current = emon.Irms ;// Lectura de la corriente

```

```

float voltage = getAverageVoltage(); // Obtener voltaje promedio
float powerFactor = getDynamicPowerFactor()+0.38; // Ajuste del factor de potencia
// Corrección de valores extremos en el factor de potencia
if (powerFactor < 0.35) {
    powerFactor = 0.0;
}
if (powerFactor > 0.99) {
    powerFactor = 0.99;
}
//Cálculo de la potencia aparente y potencia activa
float apparentPower = voltage * current; // Potencia aparente
float realPower = apparentPower * powerFactor; // Potencia activa
// Corrección de umbrales mínimos
if (current < 0.150) {
    current = 0.0;
}
if (voltage < 12) {
    voltage = 0.0;
}
// Cálculo de consumo de energía
if (voltage > 0 && current > 0) {
    static bool counting = false;
    static DateTime previousTime;
    DateTime now = rtc.now();
    if (!counting) {
        HoraFecha = now;
        counting = true;
    }
    TimeSpan elapsedTime = now - HoraFecha;
    consumptionHours = elapsedTime.totalseconds() / 3600.0;
}

```

```

kWh += realPower * (millis() - lastmillis) / 3600000000.0;

lastmillis = millis();

////////////////////////////////// IMPRESIÓN EN PUERTO SERIAL //////////////////////////////////

Serial.print("Voltaje: "); Serial.print(voltage, 2); Serial.println(" V");
Serial.print("Corriente: "); Serial.print(current, 4); Serial.println(" A");
Serial.print("Potencia Activa: "); Serial.print(realPower, 2); Serial.println(" W");
Serial.print("FP: "); Serial.print(powerFactor, 2); Serial.println("");
Serial.print("Consumo de energia: "); Serial.print(kWh, 4); Serial.println(" kWh");
Serial.print("Horas consumidas: "); Serial.print(consumptionHours, 2); Serial.println(" h");
Serial.println("-----");

////////////////////////////////// IMPRESIÓN EN PANTALLA LCD //////////////////////////////////

lcd.setCursor(0, 0);
if (!toggleScreen) {
  lcd.setCursor(0, 0);
  lcd.print(" UCACUE ");
  lcd.setCursor(0, 1);
  lcd.print("V: "); lcd.print(voltage, 2); lcd.print(" V ");
  lcd.setCursor(0, 2);
  lcd.print("I: "); lcd.print(current, 4); lcd.print(" A ");
  lcd.setCursor(0, 3);
  lcd.print("P: "); lcd.print(realPower, 2); lcd.print(" W ");
} else {
  lcd.setCursor(0, 0);
  lcd.print(" UCACUE ");
  lcd.setCursor(0, 1);
  lcd.print("FP: "); lcd.print(powerFactor, 2); lcd.print(" ");
  lcd.setCursor(0, 2);
  lcd.print("E: "); lcd.print(kWh, 4); lcd.print(" kWh ");
  lcd.setCursor(0, 3);
  lcd.print("H: "); lcd.print(consumptionHours, 2); lcd.print(" hrs ");
}

```

```

// Enviar datos a Ubidots cada 60 segundos sin interrupciones
    if (millis() - lastUbidotsSendTime >= 60000) { // 60 segundos
        sendToUbidots(voltage, current, realPower, powerFactor, kWh, consumptionHours);
        lastUbidotsSendTime = millis();
    }

// Lógica para enviar mensajes SMS de fallas en luminarias LED
////////////////////////////////////ENVÍO DE ALERTAS POR SMS //////////////////////////////////////

// Alerta de potencia consumida en diferentes rangos
    if (realPower >= 200 && realPower <= 300) {
        if (!powerInRange) {
            sendSMS(phoneNumber, "Alerta: Potencia consumida menor entre 300 y 400
watts. Consumo actual: " + String (realPower, 2) + " W");
            powerInRange = true;
            lastMessageTime = millis();
        } else if (millis() - lastMessageTime >= messageInterval) {
            sendSMS(phoneNumber, "Alerta: Potencia consumida menor entre 300 y 400
watts. Consumo actual: " + String (realPower, 2) + " W");
            lastMessageTime = millis();
        }
    }
}
else
    if (realPower >= 300 && realPower <= 400) {
        if (!powerInRange) {
            sendSMS(phoneNumber, "Alerta: Potencia consumida menor entre 200 y 300
watts. Consumo actual: " + String (realPower, 2) + " W");
            powerInRange = true;
            lastMessageTime = millis();
        } else if (millis() - lastMessageTime >= messageInterval) {
            sendSMS(phoneNumber, "Alerta: Potencia consumida menor entre 200 y 300
watts. Consumo actual: " + String (realPower, 2) + " W");
            lastMessageTime = millis(); }
    }
}

```

```

else {
    powerInRange = false;
}
// Alerta de potencia consumida elevada
if (realPower > 700) {
    sendSMS(phoneNumber, "Alerta: Potencia consumida elevada. Consumo actual: " +
String(realPower, 2) + " W");
}
// Alerta de caída de tensión menor a 100V
if (voltage > 0 && voltage < 100) {
    sendSMS(phoneNumber, "Alerta: El voltaje es menor a 100V. Voltaje actual: " + String
(voltage, 2) + " V");
}
// Alerta de sobretensión en red monofásica
if (voltage > 240) {
    sendSMS(phoneNumber, "Alerta: Sobretensión detectada. Voltaje actual: " +
String(voltage, 2) + " V");

// Alerta de caída de corriente en diferentes rangos
if (current >= 0 && current <= 1) {
    sendSMS(phoneNumber, "Se ha detectado una perdida total de corriente en el sistema.
Última medición: " + String(current, 2) + " I");
}
else if (current > 1 && current <= 2) {
    sendSMS(phoneNumber, "Alerta: Variación anormal en la corriente del sistema. Última
medición: " + String(current, 3) + " A");
}
else if (current > 2 && current <= 3.5) {
    sendSMS(phoneNumber, "Alerta: Corriente fuera de rango. Última medición: " +
String(current, 3) + " A");
}

```

```
////////////////////////////////// REGISTRO DE FECHA Y HORA //////////////////////////////////
```

```
HoraFecha = rtc.now(); //obtenemos la hora y fecha actual
```

```
segundo=HoraFecha.second();
```

```
minuto=HoraFecha.minute();
```

```
hora=HoraFecha.hour();
```

```
dia=HoraFecha.day();
```

```
mes=HoraFecha.month();
```

```
anio=HoraFecha.year();
```

```
Serial.print("hora = ");
```

```
Serial.print(hora);
```

```
Serial.print(":");
```

```
Serial.print(minuto);
```

```
Serial.print(":");
```

```
Serial.print(segundo);
```

```
Serial.print(" Fecha = ");
```

```
Serial.print(dia);
```

```
Serial.print("/");
```

```
Serial.print(mes);
```

```
Serial.print("/");
```

```
Serial.print(anio);
```

```
Serial.println();
```

```
////////////////////////////////// ENVÍO DE REPORTE DIARIO //////////////////////////////////
```

```
if ((hora == 7 && minuto== 00) ||
```

```
    (hora == 13 && minuto == 00) ||
```

```
    (hora == 19 && minuto == 00)) {
```

```
    sendSMS(phoneNumber, "Reporte diario: Voltaje: " + String (voltage, 2) + " V, Corriente:  
" + String (current, 4) + " A, Potencia activa: " + String (realPower, 2) + "w, Factor de  
Potencia" + String (powerFactor, 2) + " , Energía consumida: " + String (kWh, 4) + " kWh");
```

```
    delay(60000); // Evitar múltiples envíos en el mismo minuto
```

```
    }
```

```
}
```

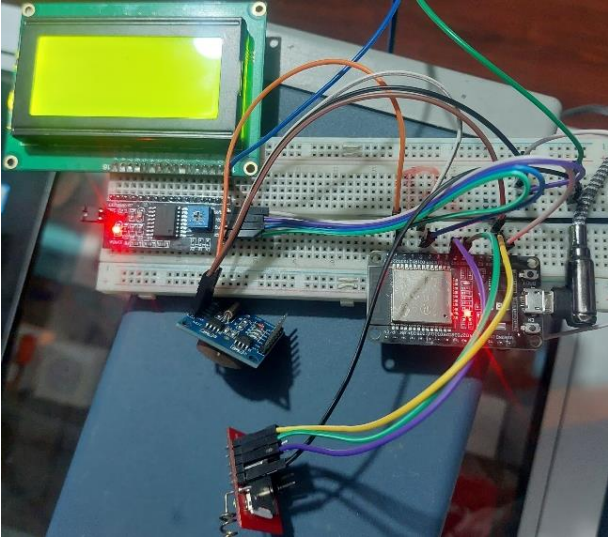
```

//////////////////////////////////// Función principal de ejecución en bucle //////////////////////////////////////
void loop() {
  static bool screenToggle = false;
  measureElectricalParameters(screenToggle); // Medir parámetros eléctricos
  screenToggle = !screenToggle; // Alternar pantalla LCD
  //delay (50);
}
// Función para enviar comandos AT al módulo GSM
void sendATCommand(String command, String expectedResponse) {
  Serial.print("Enviando comando AT: ");
  Serial.println(command);
  mySerial.println(command);
  delay (1000);
  String response = "";
  while (mySerial.available()) {
    response += (char)mySerial.read();
  }
  if (response.indexOf(expectedResponse) != -1) {
    Serial.println("Respuesta OK: " + response);
  } else {
    Serial.println("Error o respuesta inesperada: " + response);
  }
}
void sendSMS(String number, String message) {
  mySerial.print("AT+CMGS=\"" + number + "\"\r");
  delay (1000);
  mySerial.print(message);
  mySerial.write(26);
  delay (1000);
  Serial.println("Mensaje enviado a " + number);
}

```

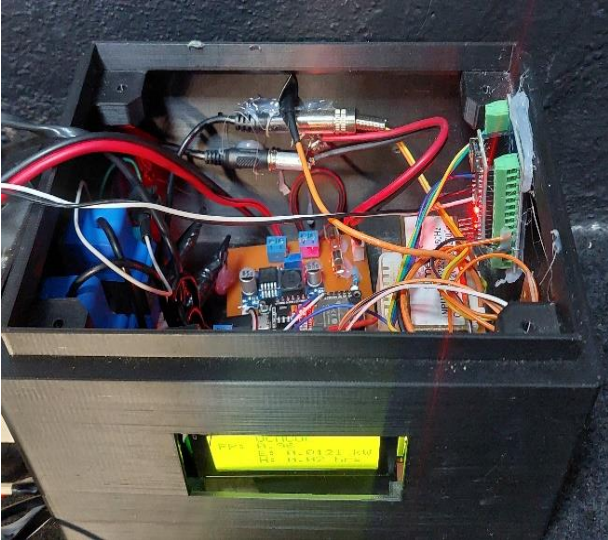
**Fuente:** Elaboración propia.

**Anexo 2.** Primeras pruebas de funcionamiento del sistema electrónico del prototipo.



**Fuente:** Elaboración propia.

**Anexo 3.** Armado del prototipo.



**Fuente:** Elaboración propia.

**Anexo 4.** Vista del prototipo final.



**Fuente:** Elaboración propia.

**Anexo 5.** Conexión del prototipo en serie con el sistema de luminarias LED.



**Fuente:** Elaboración propia.

## AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL

Yo, Edison Jonathan Guanuche Largo portador de la cédula de ciudadanía N.º 0705714012. En calidad de autor/a y titular de los derechos patrimoniales del trabajo de titulación “Prototipo para determinar fallas de funcionamiento en luminarias LED de alumbrado público” de conformidad a lo establecido en el artículo 114 Código Orgánico de la Economía Social de los Conocimientos, Creatividad e Innovación, reconozco a favor de la Universidad Católica de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos, Así mismo; autorizo a la Universidad para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el Repositorio Institucional de conformidad a lo dispuesto en el artículo 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, 7 de abril de 2025

A handwritten signature in blue ink that reads "Jonathan". The signature is stylized with loops and a horizontal line through the middle.

F: .....

EDISON JONATHAN GUANUCHE LARGO

0705714012