



Diseño y construcción de un prototipo de iluminación LED para espacios interiores monitoreado mediante tecnología inalámbrica LoRa

Design and construction of a prototype of LED
lighting for interior spaces monitored using
LoRa wireless technology



**Rodolfo Pabel Merino-Vivanco¹, Jorge Enrique Carrión-González²,
Jonathan Michael González-Espinosa¹, Christian Hernán Campoverde-Ramírez³,
Andy Fabricio Vega-León³, Alba Elizabeth Vargas-Naula³,
Diego Fernando Pucha-Caraguay⁴**

- ¹ Centro de Investigación, Innovación, Desarrollo de Prototipos Tecnológicos y Pruebas Electroenergéticas – I2TEC, Universidad Nacional de Loja, Loja, Ecuador.
² Carrera de Electricidad, Universidad Nacional de Loja, Loja, Ecuador.
³ Carrera de Telecomunicaciones, Universidad Nacional de Loja, Loja, Ecuador
⁴ Banco de Loja, Loja, Loja, Ecuador

rodolfo.merino@unl.edu.ec

DOI: <https://doi.org/10.26871/killkanatecnica.v7i1.1459>



Resumen

Los sistemas de iluminación para espacios interiores y exteriores se adaptan constantemente a la evolución de la tecnología con el objetivo de lograr una iluminación más eficiente. En esta investigación se dimensiona, construye e implementa un prototipo de luminaria LED inteligente para áreas interiores que consuma poca energía, brinde altas prestaciones, sea amigable con el ambiente, y que, mediante el uso de protocolos de comunicación inalámbrica, se conecte a Internet y transmita información referente a su funcionamiento. Para ello, el modelo propuesto incorpora tecnologías que permiten controlar la intensidad de iluminación, así como su encendido y apagado. La comunicación, control en directo, adquisición y almacenamiento de valores de consumo energético se desarrolla mediante una interfaz de comunicación utilizando el protocolo LoRaWAN (Red de baja potencia y área amplia). Para la estructura de protección del prototipo, se utiliza impresión en 3D. Finalmente, al realizar las pruebas del modelo en un ambiente determinado, se observa que la luminaria cumple con los parámetros establecidos inicialmente, respecto a su capacidad de tomar decisiones frente al ambiente en el que se encuentra; así como, transmitir a través de Internet sus estados de funcionamiento usando tecnología LoRa.

Palabras clave: *Iluminación, LoRaWAN, eficiencia energética, impresión 3D, IoT.*

Abstract

Indoor and outdoor lighting systems are constantly adapting to the evolution of technology to achieve more efficient lighting. The aim of this research is to design, build and implement a prototype of an intelligent LED luminaire for indoor spaces that consumes less energy, has high performance, is environmentally friendly and, through the use of wireless communication protocols, connects to the Internet and is able to transmit information regarding its operation. For this purpose, the proposed model incorporates technologies that allow the control of the intensity of the lighting, as well as its on and off switching. The communication, live control, acquisition and storage of energy consumption values are developed through a communication interface using the LoRaWAN (Low Power Wide Area Network) protocol. 3D printing is employed to create the protective structure of the prototype. Finally, when the model is tested in a specific environment, it is observed that the lamp meets the parameters initially established in terms of its ability to make decisions about the environment in which it is located, and to transmit its operating status over the Internet using LoRa technology.

Keywords: *Lighting, LoRaWAN, Energetic efficiency, 3D printing, IoT.*

Introducción

La contaminación ambiental es uno de los problemas más graves mundialmente, por ello, es necesario tomar conciencia sobre su importancia y aportar con soluciones que permitan reducirla (Palacios Anzules & Moreno Castro, 2022). Uno de los factores contaminantes es la iluminación. La falta de actualización de tecnologías en este campo, provoca que no se utilice de forma eficiente la energía eléctrica, los problemas de contaminación aumenten, y las tarifas de consumo no se reduzcan.

Según el Ministerio de Energía y Minas de Ecuador (Minas, 2020), en el año 2019 el país registró un aumento de energía eléctrica en un 4,50 % con respecto a datos tomados en el 2018. El Balance Nacional de Energía Eléctrica (BNEE) detalla que la electricidad fue la fuente de mayor uso en la industria con 48,60 %; siendo la iluminación uno de los principales causantes de emisiones de Dióxido de Carbono (CO₂). Entre las causas más comunes que limitan el consumo eficiente de energía están: uso de lámparas fluorescentes e incandescentes, descuido de las personas, uso incorrecto de la luz natural, falta de diseño de espacios de iluminación, y utilizar focos dañados que aumentan el consumo energético (Renovables, 2021).

Como parte de las soluciones para gestionar de mejor forma la energía, se ha popularizado el uso de iluminación LED (Diodos Emisores de Luz). Este tipo de iluminación se aplica de forma fija en ambientes interiores, calles, aceras, fachadas de edificios, iglesias, monumentos, etc.; de forma móvil para eventos, para la ejecución de auditorías energéticas y como solución de ahorro económico y energético (RODRIGUEZ MORAN, 2021).

Según (Siverio Valle, Quintero Cabrera, & Fariñas Wong, 2021) los tubos LED poseen un 66 % más de eficiencia que una lámpara fluorescente (20 W vs 58 W), por lo que su uso representaría

un gran ahorro en el consumo eléctrico. Similar análisis se realiza en (Valdiviezo Supo, 2021) en donde se indica que un foco tradicional de 90 W con flujo luminoso de 1250 lm, posee la misma equivalencia luminosa de un foco con tecnología LED de 9 W de potencia, obteniendo un 86 % de ahorro de energía.

Utilizar lámparas y focos LED minimiza la contaminación producida por lámparas tradicionales, ya que consumen menos energía. La vida útil de una lámpara fluorescente está alrededor de 2 000 horas, mientras que las LED duran cerca de 15 000 horas; de esta forma, también se observa que económicamente son más rentables ya que su reemplazo no será muy seguido (lamparayluz.es, 2020).

De acuerdo a (Tecnolite, 2020) la iluminación inteligente se produce cuando una lámpara LED tiene la capacidad de suministrar suficiente cantidad de luz en el momento deseado, sin necesitar que el usuario realice algún tipo de acción. Este tipo de iluminación posee muchas ventajas, como:

- Gran parte de los sistemas de iluminación inteligente se basan en el uso de lámparas LED.
- Se obtiene un adecuado nivel de iluminación, mientras se consume menos energía.
- Las luces se encienden/apagan de forma automática, y según las necesidades del ambiente; provocando así un bajo consumo energético y ahorrando dinero al momento de facturar.
- Esta tecnología permite brindar mayor confort a los usuarios, ya que se puede realizar su monitoreo, cambiar la intensidad de iluminación, analizar datos de consumo energético y programar rutinas para el control de la luminaria desde una aplicación móvil o interfaz web.

Se puede decir que existen muchas razones para incentivar el uso eficiente de la energía, entre las principales están: seguridad de la provisión de energía, eficiencia de la economía nacional, gestión del cambio climático, mejora de las condiciones de vida de las personas, reducción de gastos en facturación de energía eléctrica, y mejoras en el acceso a este recurso (Miranda, 2020).

La eficiencia energética es una herramienta que permite modificar la forma en la que se utiliza la energía, logrando un ahorro significativo en el costo de fabricación y uso de los dispositivos, sin afectar su productividad; esto refiriéndose al uso de dispositivos LED como tecnología de bajo consumo en iluminación (Mera & Velasco, 2021).

Diseñar soluciones de iluminación inteligente que integren dispositivos de bajo consumo eléctrico, servicios tecnológicos como Internet de las Cosas (IoT), y tecnologías de comunicación inalámbrica como LoRa y el protocolo LoRaWAN, permitirá gestionar este recurso de forma más eficiente y satisfacer las necesidades básicas de iluminación: confort y rendimiento visual, y seguridad.

IoT se enfoca en interconectar distintos dispositivos a Internet, para establecer su comunicación y lograr intercambio de información. Esto ha permitido el desarrollo de sistemas de iluminación inteligentes que pueden ajustar automáticamente su intensidad, en función de la luz natural disponible y/o la presencia de personas en un ambiente. De esta forma, no solo se ahorra energía, también se mejora la calidad de iluminación y comodidad de los usuarios (Saravanan, Chandraprabha, Dinesh, & Mohamed Ibrahim, 2021).

LoRaWAN es un protocolo que forma parte de las Comunicaciones Inalámbricas. Es capaz de transferir datos de dispositivos conectados a Internet a través de grandes distancias. Se compone por dispositivos finales que consumen poca energía, y por una puerta de enlace que les permite co-

municarse con un servidor de red centralizado (Buestán, 2019).

Las redes LoRa usualmente se componen por dispositivos finales conectados a sensores o actuadores (Nodos clientes); éstos a su vez, se conectan a puertas de enlace o Gateways, las cuales envían la información recibida a un Servidor central de red que, por medio de una interfaz, entrega dicha información a los usuarios (Ortiz Sosa, 2020). Generalmente, estas redes emplean una topología estrella – estrella para poder retransmitir información desde los dispositivos finales hasta el servidor (Heredia, 2021). En (ALFAIOT, 2021) se describe brevemente cada uno de sus componentes:

- Nodos: son módulos físicos que poseen capacidades de detección y traducción de datos. Existen de tres clases: A, B y C.
- Gateway: es un dispositivo que almacena los mensajes LoRaWAN de los nodos clientes o sensores y los convierte en bits. Hay de dos tipos: para uso interno y uso externo.
- Servidor de red: aquí llegan los mensajes provenientes del Gateway. Entre sus funciones está el enrutamiento de información, la eliminación de datos duplicados y el descifrado y encriptación de información final.

Ya que se trata de una tecnología de comunicación inalámbrica, el tema de seguridad es muy importante. Respecto a ello, posee las siguientes propiedades:

- Autenticación mutua entre un dispositivo final y la red LoRaWAN. De esta forma se asegura que solo dispositivos verificados se conecten a redes auténticas.
- Protección de la integridad durante la transmisión para evitar que la información sea manipulada de manera no autorizada por terceros.
- Cifrado de extremo a extremo para garantizar

que el tráfico de la red sea legítimo, no haya sufrido modificaciones, y sea incomprensible para espías.

Sobre sus ventajas, en (Narváez & Pérez, 2020) se menciona que implementar una red LoRa para el desarrollo de sistemas de monitoreo en ambientes que necesitan de transmisiones a grandes distancias, es muy útil debido a su cobertura, fácil configuración, bajo consumo de energía y reducido costo de operación y mantenimiento.

Implementar soluciones de iluminación inteligente basadas en IoT y LoRaWAN tiene un gran impacto en el ambiente, ya que ayuda a reducir el consumo de energía, disminuir las emisiones de gases contaminantes, y aportar a la batalla contra el cambio climático. Además, al permitir el monitoreo remoto de los sistemas de iluminación, y la recopilación de datos sobre su uso y rendimiento; se puede usar dicha información para optimizar el uso de la energía en hogares y empresas, mejorar el mantenimiento de equipos y prevenir daños; logrando reducir costos operativos y aumentar la eficiencia energética.

Este trabajo se realiza para aportar una solución que permita utilizar eficientemente la energía eléctrica, específicamente en sistemas de iluminación de interiores, mediante la aplicación de tecnologías de comunicación inalámbrica (LoRaWAN) e Internet de las Cosas (IoT). En primer lugar, en base a investigación bibliográfica, se determinan los dispositivos electrónicos que se van a usar para el control de la intensidad de iluminación, así como el encendido/apagado de la misma. Luego, según la regulación de nuestro país, se seleccionan los módulos LoRa necesarios para establecer la comunicación. Seguidamente, se diseña una interfaz que permita que el usuario pueda monitorear en directo la luminaria, analizar los datos de consumo energético adquiridos, y crear escenarios de iluminación, según sus necesidades. Finalmente,

se pretende instalar el prototipo propuesto en una de las oficinas del Centro de Investigación i2TEC de la Universidad Nacional de Loja (UNL) y realizar pruebas con un luxómetro para comprobar su funcionamiento. En resumen, se desea diseñar una luminaria para interiores que tenga autonomía para decidir su operación, según las condiciones del ambiente; que sea de bajo consumo, brinde confort al usuario y que reduzca la emisión de gases contaminantes.

Entre las limitantes del proyecto está la falta de un laboratorio especializado de Luminotecnia en el que se pueda evaluar completamente todos los parámetros de la lámpara, realizar pruebas fotométricas, y determinar sus condiciones de resistencia (Protección IP) frente al polvo, humedad, etc.

Materiales y métodos

Para desarrollar la investigación se aplicó un enfoque cuantitativo, partiendo desde el planteamiento de los temas tratados hasta la documentación de los resultados obtenidos. Para alcanzar el objetivo, se siguió el procedimiento resumido a continuación:

1. Selección de todos los dispositivos electrónicos necesarios para el circuito de control de la luminaria.
2. Recopilación de información sobre los datos que se pueden usar para el control de la misma.
3. Desarrollo de un arreglo electrónico de LEDs dimerizables, ya que solo de esta forma se puede controlar la intensidad lumínica de la lámpara.
4. Obtención de códigos de prueba de los sen-

sores que emiten señales de control.

5. Interconexión de todos los componentes para formar un módulo completo encargado del control de la luminaria.
6. Definición y adquisición de módulos LoRaWAN con frecuencia de operación de 915 MHz.
7. Programación de los dispositivos LoRaWAN para establecer la comunicación.
8. Verificación de la conexión inalámbrica entre los dispositivos.
9. Subida de información a la plataforma de IoT *ThingSpeak* mediante el Gateway.
10. Diseño e impresión 3D de la carcasa para el montaje de los elementos que integran la lámpara.
11. Medición diaria de distintas intensidades lumínicas en diferentes horas.
12. Configuración de la intensidad lumínica de los LEDs en base a la información obtenida en el punto anterior.
13. Ejecución de pruebas de consumo, cálculos de emisiones de CO₂ y cálculos de tarifa anual de pago, según las fórmulas 1, 2 y 3 que se describen a continuación:

$$\text{Consumo anual [kWh]} = W * h * 365 \quad (1)$$

En dónde:

W = Potencia instalada [kW]

h = Tiempo de uso [h]

365 = Días del año

$$\text{Emisión de CO}_2 \text{ anual [kgCO}_2\text{]} = \text{Consumo anual} * 0,3840 \quad (2)$$

En dónde:

Consumo anual = Potencia instalada por tiempo de uso [kWh]

0,3840 = Factor de emisiones de CO₂ emitido por el Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica de Ecuador para el año 2021 [kgCO₂/kWh]

$$\text{Tarifa anual de pago [USD]} = \text{Consumo anual} * 0,96 \quad (3)$$

En dónde:

Consumo anual = Potencia instalada por tiempo de uso [kWh]

0,96 = Tarifa emitida por el Operador Nacional de Electricidad – CENACE [USD/kWh]

14. Medición del rango de distancia en el que los dispositivos LoRa logran una comunicación estable.

Recursos Científicos

Método Analítico:

Se usó este método para identificar y realizar de forma segmentada y organizada el objetivo de la investigación.

Estudio del Estado del Arte:

Este método se enfoca en la investigación de propuestas sobre un fenómeno u objeto específico (Guevara Patiño, 2016). En el desarrollo del proyecto se aplicó esta técnica para buscar y contrastar información en varias fuentes bibliográficas, relacionadas a eficiencia energética, ilu-

minación inteligente, tecnología LED, módulos LoRa y protocolos de comunicación LoRaWAN.

Recursos Técnicos

Herramientas Colaborativas:

Para mantener una comunicación fluida con los involucrados en la investigación, se usó: Correo electrónico, Google Drive, Zoom y WhatsApp.

Entornos de Desarrollo de Software:

Se usó Thingspeak como plataforma para el almacenamiento y observación de los datos provenientes de los módulos LoRa. Los entornos de programación de Arduino (con diversas librerías desarrolladas en GitHub) para controlar los sensores y módulos; y, finalmente, Android Studio para el desarrollo de una aplicación móvil.

Software de Diseño Eléctrico / Electrónico:

Se utilizó los programas CircuitLab, Fritzing y

Proteus Profesional para el diseño y visualización de los diagramas de conexión.

Software de Modelado 3D:

Se empleó el aplicativo Tinkercad ya que posee una interfaz sencilla para el desarrollo de modelos en 3D. Para el desarrollo de partes más complejas de la estructura de protección del prototipo propuesto se usó el software SolidWorks.

Impresión 3D:

Fue utilizada en la etapa de construcción del modelo para la impresión en 3D de la carcasa de protección, así como de ciertas piezas personalizadas y necesarias para el montaje de los componentes.

Resultados

Circuitos electrónicos

El funcionamiento general del modelo de iluminación implementado se muestra en el Gráfico 1.

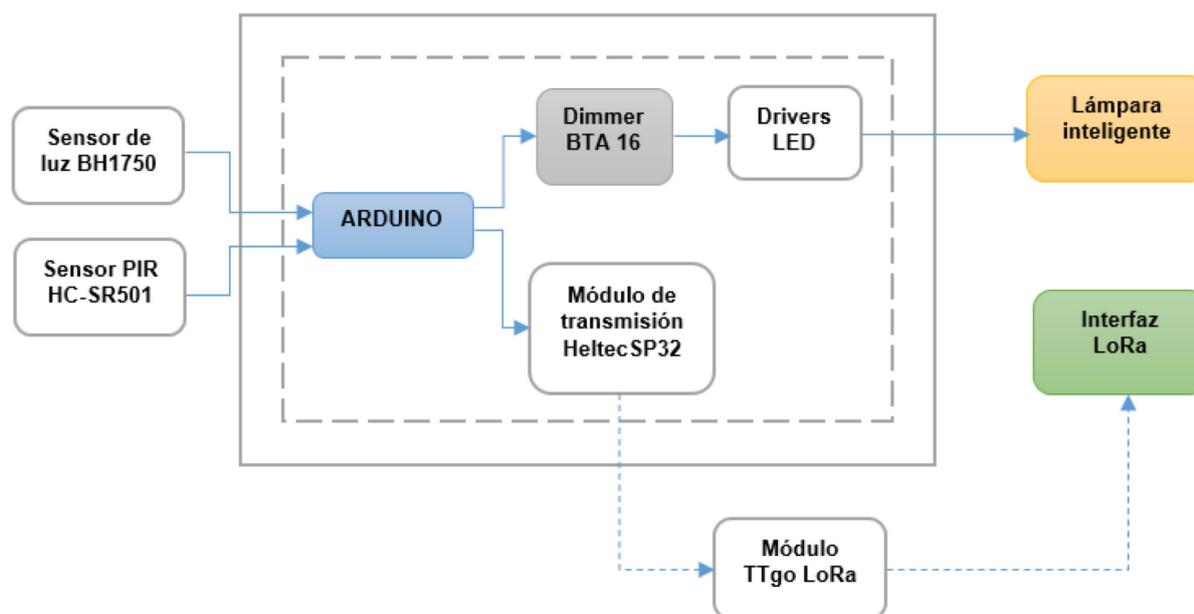


Gráfico 1. Diagrama de bloques del sistema de iluminación.

Fuente: los autores, Ecuador, 2023

A continuación, se describen los elementos usados y su función en el prototipo propuesto.

Elementos controlados:

Para satisfacer las necesidades del proyecto, se propuso la elaboración de una matriz de LEDs. Esta matriz está construida por la unión en paralelo de varios Drivers LED para compartir la fuente de energía principal (110 V). Los drivers convierten 110 V en 18 V para encender los LEDs y se conectan a un Dimmer AC que provee la corriente necesaria para controlar la intensidad lumínica.

Elementos de control:

- a. Microcontrolador Arduino Mega 2560: se encarga de controlar la lámpara. Envía y recibe información necesaria para la toma de decisiones y operación de la luminaria.
- b. Sensor BH1750: mide la cantidad de luz de un entorno específico (intensidad lumínica). Esta información sirve para definir la luz total que brindará la matriz de LEDs. Además, integra un conversor analógico / digital de 26 bits que facilita la comunicación con el Arduino.
- c. Sensor PIR: el Sensor Infrarrojo Pasivo detecta el movimiento de los usuarios y se lo aplica generalmente en iluminación automática. Está configurado en modo de operación de disparos repetitivos; es decir, permite sumar los tiempos de activación para evitar el apagado repentino de la luminaria.
- d. Módulo Dimmer AC: usa la información entregada por el microcontrolador Arduino Mega para activar los drivers LED, en-

cender la luz de la lámpara y controlar su intensidad lumínica.

Módulos de Comunicación

Los elementos usados para establecer la comunicación entre los dispositivos son:

- a. Heltec Esp32 LoRa: es el equipo transmisor del nodo. Mediante comunicación serial UART (Universal Asynchronous Receiver/Transmitter) se transmitió información desde el Arduino Mega al dispositivo Heltec.
- b. TTGO Esp32 LoRa: este dispositivo sirve como Gateway ya que posee un módulo Wi-Fi y un transmisor LoRa bidireccional.

Para establecer la comunicación entre el nodo de control de la luminaria y el módulo transmisor Heltec Esp32 LoRa, fue necesaria la activación de los pines de comunicación serial o UART mediante comandos en la librería de Arduino. Cuando se conecta módulos mediante comunicación serial, se recomienda conectar uno de los pines de tierra del Arduino con uno de los terminales de tierra del Heltec Esp32 LoRa para que exista una correcta sincronización de los relojes de ambos dispositivos.

Diseño de la Interfaz LoRa

Para realizar la interfaz de comunicación LoRa dentro de la plataforma ThingSpeak, en primer lugar, es necesario conocer el proceso de transmisión de información de los módulos:

1. El Arduino recibe los datos de los sensores y decide el momento en el que debe encender / apagar la luminaria. Esta información es transmitida mediante el puerto serial hacia el módulo Heltec Esp32 LoRa.
2. El módulo Heltec Esp32 LoRa recibe la información proveniente del Arduino y la envía usando comunicación LoRa en la frecuencia de 912 MHz.
3. El Gateway TTGO Esp32 Lora capta la información transmitida desde el módulo Heltec Esp32 LoRa y la carga a la plataforma ThingSpeak.
4. Debido a que cuando se crea un nuevo canal, ThingSpeak crea automáticamente las Claves de Interfaz de Programación de Aplicaciones (API Keys), se debe seleccionar dicha clave para luego colocarla en el módulo Gateway.
5. Verificar la comunicación entre el Gateway y la interfaz creada, personalizando los widgets seleccionados por el usuario (Gráfico 2).

Establecida la comunicación entre los dispositivos, se describe el procedimiento para crear la interfaz de conexión con el usuario:

1. Acceder al sitio web: <https://thingspeak.com/> y crear una cuenta.

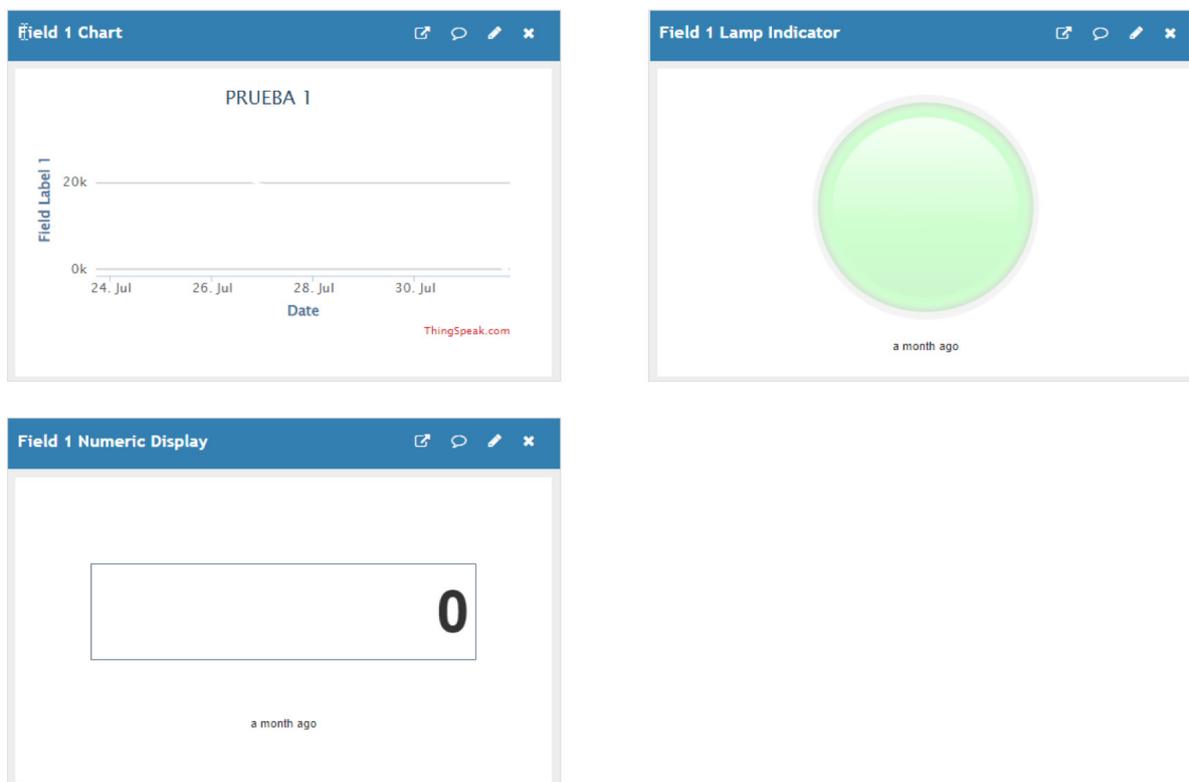


Gráfico 2. Interfaz para la comunicación y monitoreo de la luminaria inteligente.

Fuente: los autores, Ecuador, 2023

Estructura de protección de la luminaria

Para diseñar y construir la carcasa de la luminaria, primero se realizó el diseño de una placa base que aloje y conecte los sensores del nodo central, y luego se definió el lugar en el que se iba a ubicar cada dispositivo en la lámpara. Las matrices de LEDs y sus respectivos drivers LED se ubicaron de forma estratégica para incrementar la eficiencia lumínica y reducir el calor producido entre ellos. El sensor BH1750 se colocó fuera del rango de iluminación de la propia lámpara para evitar errores en la lectura de datos por parte del sensor, y asegurar que la lectura de intensidad de iluminación que muestra es la del ambiente. El sensor PIR necesita obtener información confiable sobre el movimiento de las personas, por ello se lo ubicó en la parte frontal de la luminaria. A un costado de la misma, se colocó la antena para la comunicación LoRa. En el Gráfico 3 se puede observar el armado de la carcasa de la lámpara y sus componentes.

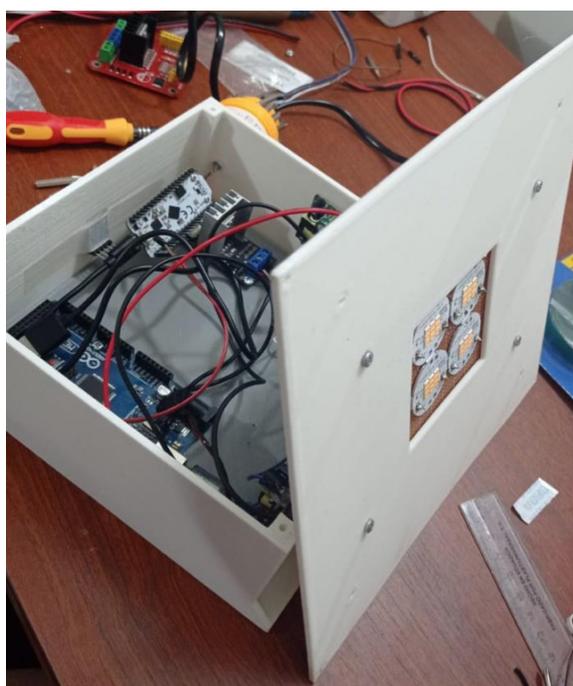


Gráfico 3. Armado de luminaria inteligente.
Fuente: los autores, Ecuador, 2023.

Para el diseño de la estructura se utilizó el programa SolidWorks. En el Gráfico 4 se observa el modelo impreso en 3D. Además, como placa difusora de la luminaria, se colocó una lámina de acrílico que permita proyectar la luz de manera uniforme.



Gráfico 4. Carcasa impresa en 3D de luminaria inteligente
Fuente: los autores, Ecuador, 2023.

Pruebas de funcionamiento del prototipo

Para ejecutar las pruebas de funcionamiento de la luminaria se deben considerar los siguientes criterios:

1. El sensor de luz BH1750 mide la intensidad lumínica en luxes (lx) y da inicio a las etapas de funcionamiento de la luminaria. Puede tener dos estados de operación: cuando mide luxes o cuando no obtiene valores de intensidad de luz.
2. Si la lectura del sensor es mayor a 3 lx, la intensidad de iluminación de la lámpara estará determinada por la intensidad de la iluminación del ambiente. Es decir, en el caso de que haya más luz en el ambiente, la intensidad de brillo de los LEDs de la lámpara será menor.

3. Si la lectura del sensor es menor a 3 lx, entra en funcionamiento el sensor PIR. La lámpara se encenderá al cumplirse dos circunstancias: la iluminación del ambiente es menor a 3 lx y se detecta movimiento.
4. El módulo Heltec lee datos cada 15 segundos, sin importar el estado de la luminaria. Con esto se asegura una comunicación LoRa sin pérdida de información.
5. Cuando se envían datos desde el módulo transmisor, el Gateway recibe esta información (1 o 0), la procesa y transmite mediante Wi-Fi. Los widgets incorporados en la interfaz de comunicación se activan según el valor de dato que hayan recibido. Si se recibe un 1, el widget entra en operación; mientras que, al recibir un valor de 0, se apaga. Además, se muestra en un contador la cantidad de minutos que la lámpara se ha encontrado encendida durante el transcurso del día.

La lámpara se instaló en una de las oficinas del Centro de Investigación I2TEC, ubicado en el Piso 3 del Bloque 2 de la Facultad de Energía de la Universidad Nacional de Loja, tal como se observa en el Gráfico 5.



Gráfico 5. Luminaria inteligente instalada.
Fuente: los autores, Ecuador, 2023.

Las primeras pruebas se realizaron para verificar el modo de operación de encendido y apagado automático de la luminaria, según las condiciones del ambiente; en donde se obtuvo el resultado esperado. Luego, se empleó un luxómetro para realizar la comparativa entre el uso de una lámpara fluorescente que ya se encontraba instalada en el Centro, y el prototipo de lámpara inteligente instalado de forma reciente. Los resultados se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Comparación de mediciones de una lámpara fluorescente vs lámpara inteligente.

Descripción	Lámpara	Lámpara
	Halógena [lx]	Inteligente [lx]
Intensidad lumínica a 4 m	40,80	80,20
Intensidad lumínica a 2 m	60,70	122,30
Intensidad lumínica a 4 m con 45° de inclinación	36,40	75,70
Intensidad lumínica a 2 m con 45° de inclinación	57,30	116,40

Fuente: los autores, Ecuador, 2023.

A continuación, se muestran los cálculos de consumo anual de una de las lámparas fluorescentes instaladas en la oficina del Centro de Investigación y el consumo del prototipo propuesto, así como las emisiones de CO₂ y tarifa anual.

Consumo de lámpara fluorescente

Usando la fórmula 1, se obtuvo el cálculo del consumo anual de una lámpara previamente instalada. Según la tabla de características técnicas de la lámpara, su potencia es de 96 W.

$$\text{Consumo anual} = W \cdot h \cdot 365 = 96W \cdot 8h \cdot 365 = 280,32 \text{ kWh} \quad (4)$$

Consumo del prototipo de luminaria inteligente

Igual que en el caso anterior, se utilizó la fórmula 1 con el valor de potencia de la lámpara de 28 W, consiguiendo el siguiente resultado:

$$\text{Consumo anual} = W \cdot h \cdot 365 = 28 \text{ W} \cdot 8 \text{ h} \cdot 365 = 81,76 \text{ kWh} \quad (5)$$

Emisión de CO₂ de lámpara fluorescente

Utilizando la fórmula 2 y el factor de emisiones definido por el Ministerio del Ambiente, se obtiene el valor de emisión de CO₂ anual.

$$\begin{aligned} \text{Emisión CO}_2 \text{ anual} &= \text{Consumo} \\ \text{anual} \cdot 0,3840 &= 280,32 \text{ kWh} \cdot 0,3840 \frac{\text{kgCO}_2}{\text{kWh}} \\ &= 107,64 \text{ kgCO}_2 \quad (6) \end{aligned}$$

Emisión de CO₂ del prototipo de luminaria inteligente

Al repetir el proceso con el consumo estimado de la lámpara inteligente se obtiene:

$$\begin{aligned} \text{Emisión CO}_2 \text{ anual} &= \text{Consumo} \\ \text{anual} \cdot 0,3840 &= 81,76 \text{ kWh} \cdot 0,3840 \frac{\text{kgCO}_2}{\text{kWh}} \\ &= 31,40 \text{ kgCO}_2 \end{aligned}$$

Tarifa anual de lámpara fluorescente

Según los datos obtenidos en párrafos anteriores y aplicando la fórmula 3, se obtiene el siguiente valor de tarifa anual teórico.

$$\begin{aligned} \text{Tarifa anual de pago} &= \text{Consumo} \\ \text{anual} \cdot 0,96 &= 280,32 \text{ kWh} \cdot 0,96 \text{ USD/} \\ \text{kWh} &= 269,11 \text{ USD} \quad (8) \end{aligned}$$

Tarifa anual de luminaria inteligente

Aplicando los valores teóricos para el prototipo propuesto, se obtiene el siguiente valor:

$$\begin{aligned} \text{Tarifa anual de pago} &= \text{Consumo} \\ \text{anual} \cdot 0,96 &= 81,76 \text{ kWh} \cdot 0,96 \text{ USD/} \\ \text{kWh} &= 78,49 \text{ USD} \quad (9) \end{aligned}$$

Cálculo del consumo total de iluminación del edificio

Se realizó el levantamiento de información de las lámparas instaladas en el Bloque 2 (lugar en donde se encuentra el Centro de Investigación), obteniendo un total de 226 luminarias fluorescentes. Con este valor, y usando las fórmulas descritas en secciones anteriores, en la Tabla 2 se muestran los valores teóricos calculados sobre el consumo total de iluminación con lámparas fluorescentes versus una solución con lámparas inteligentes.

Tabla 2. Comparativa de resultados de iluminación con lámparas fluorescentes vs lámparas inteligentes.

Consumo total [kWh]		Emisiones de CO ₂ total [kgCO ₂]		Tarifa anual [USD]	
Iluminación tradicional	Lámpara inteligente	Iluminación tradicional	Lámpara inteligente	Iluminación tradicional	Lámpara inteligente
63 352,32	18 477,76	24 326,64	7 096,40	60 818,86	17 738,74

Fuente: los autores, Ecuador, 2023.

Discusión

En (Agency, 2020) se indica que, debido a la pandemia producida por el SARS-CoV-2, el consumo de energía durante el período 2020 - 2021 se redujo en relación a otros años, especialmente en edificaciones; no obstante, se prevé que el volver a las actividades normales producirá un incremento significativo en el consumo energético, el cual puede ser mayor que antes del periodo de confinamiento.

Diversas investigaciones manifiestan que, una gestión ineficiente de iluminación se produce por la falta de criterios técnicos, actualización de tecnologías o por el uso de dispositivos (luminarias) obsoletos. Este problema se refleja en altos valores de consumo energético; y, por lo tanto, facturas con valores significativos.

Otro factor a considerar es que el confort de las personas se ve afectado por la falta o mala aplicación de criterios en el diseño de la iluminación. Por ejemplo, en instituciones educativas es fundamental contar con ambientes que tengan un adecuado nivel de luz para que los estudiantes puedan desarrollar sus actividades de forma correcta, y sin sufrir daños en su salud, como por ejemplo fatiga visual. En el ámbito laboral, como oficinas, también se ha visto la importancia que tiene la iluminación, ya que una escasa o inadecuada intensidad, afecta a la productividad de los trabajadores, así como les puede causar enfermedades visuales.

Muchas veces se cree que mantener todas las luminarias encendidas en un espacio, asegura una correcta iluminación; sin embargo, además del gasto innecesario de electricidad, no se considera que existen zonas en las que no se necesita la misma cantidad de luz que en otras. Otro caso es el de los pasillos en donde usualmente las luminarias permanecen encendidas de forma con-

tinua, sin considerar si existe presencia de personas o no; de esta forma se aumenta el consumo energético y se reduce el tiempo de vida útil de dichas lámparas.

Considerando los motivos previamente expuestos, y analizando la situación actual de la iluminación en el Centro de Investigación I2TEC, se propuso la creación de un modelo de luminaria inteligente que permita gestionar de forma eficiente la energía, sea de bajo consumo, integre tecnologías de vanguardia y brinde mayor confort a los usuarios para que disfruten de una buena calidad de iluminación, y tomen conciencia sobre las ventajas que implementar sistemas con este tipo de lámparas pueden brindarles.

El que se considere a una lámpara como “inteligente” implica que dispone de autonomía para decidir si se enciende / apaga, o aumenta / reduce su nivel de intensidad lumínica, según las condiciones del ambiente en donde se encuentre instalada; además, que su operación se puede controlar y supervisar en tiempo real y de forma remota para analizar datos y crear escenarios de iluminación, conforme sea requerido.

Los cálculos realizados en la sección anterior demuestran que, teóricamente, el modelo de luminaria propuesto consume menos energía (cerca del 30 %), en relación a otros tipos de lámparas, y brinda igual o mayor calidad de iluminación. De esta forma, el nivel de emisiones de CO₂ va a ser menor, afectando positivamente al ambiente; así como, los costos de facturación también van a disminuir. Es decir, una solución de iluminación basada en luminarias inteligentes aporta al desarrollo sostenible de forma significativa.

Además del desarrollo de la luminaria inteligente, otra de las fortalezas del proyecto es la integración de tecnologías de IoT, Comunicaciones Inalámbricas y la plataforma Thinspeak para la adquisición y visualización de datos. Así, el

usuario aprovecha todas las ventajas de este tipo de iluminación ya que tiene control total sobre la operación de la lámpara, mientras analiza de forma fácil sus datos de consumo energético.

Respecto al tema de las tecnologías de comunicación inalámbrica, es importante indicar que la frecuencia recomendada para establecer la comunicación LoRa era de 915 MHz; sin embargo, ya que al momento de establecer la conexión se detectó que dicho canal se encontraba saturado, se decidió trabajar en 912 MHz. Es vital que, antes de adquirir los equipos de comunicación, se verifique que la frecuencia de operación esté acorde a la regulación del país en donde se va a implementar el sistema y que los dispositivos sean compatibles entre sí.

Al tratarse de un prototipo, la ejecución de pruebas de funcionamiento es vital para la detección de fallos y garantía de datos reales. Por ejemplo, en esa etapa se determinó de forma definitiva el punto exacto para la ubicación de los sensores y que éstos no se vean afectados por la propia luz de la lámpara, se verificó que el uso de un Dimmer AC para el control de la intensidad de iluminación era la mejor opción, y se dedujo que para tener una correcta comunicación serial, los relojes de los dispositivos usados deben estar sincronizados mediante un punto de tierra común.

Finalmente, es necesario mencionar que, a pesar de que las lámparas fluorescentes aún se usen y sean atractivas por su menor valor económico en relación a una lámpara LED, a largo plazo no se considera una buena inversión ya que la tarifa anual de consumo será mayor, y, por las horas de vida de este tipo de lámparas, así como la falta de eficiencia que se observa en la gestión de la iluminación de los edificios, requerirán cambios de forma más seguida, convirtiéndose en una solución más costosa.

Conclusiones

Se realizó el diseño, construcción e instalación de un modelo de luminaria inteligente que integra distintos tipos de sensores y módulos de comunicación para obtener autonomía y decidir aumentar o reducir la intensidad de iluminación, según el ambiente en el que se encuentre operando; así como, encenderse o apagarse al detectar presencia o ausencia de usuarios; y, transmitir los valores de consumo energético a la nube mediante el protocolo LoRaWAN.

Se comprobó que el uso de tecnología LoRa, en específico del protocolo LoRaWAN, permite obtener un prototipo de iluminación más eficiente, ya que mediante los módulos de comunicación se logra la adquisición, control y supervisión del funcionamiento de la lámpara en directo; además, el registro de los valores de consumo para posteriores análisis.

La plataforma ThingSpeak es un recurso muy importante para la conexión y análisis de dispositivos IoT debido a que presenta una interfaz de manejo sencilla e intuitiva; y, según la cantidad de canales a utilizar o el tipo de proyecto que se desarrolle, se puede utilizar de forma gratuita.

En base a los valores obtenidos mediante los cálculos de consumo, emisión de gases contaminantes y tarifa anual de una luminaria fluorescente y el prototipo inteligente, se concluye que el modelo propuesto consume menos energía (casi 30 %) brindando una adecuada calidad de intensidad de iluminación; por lo tanto, el valor por facturación también se reducirá; y, además, se emitirá menos gases contaminantes que las luminarias tradicionales.

Un sistema de iluminación basado en lámparas inteligentes es una opción viable para gestionar eficientemente la energía de lugares en los que

las luminarias suelen estar encendidas de forma permanente, como: edificios, instituciones públicas, universidades, colegios, etc. Dicha eficiencia se reflejará en los valores de consumo y facturación, sin reducir la calidad de iluminación.

Para brindar mayor comodidad a los usuarios se plantea el diseño de un aplicativo móvil que les permita controlar de forma remota y en tiempo real el funcionamiento de la lámpara: encender, apagar, crear escenarios y horarios de iluminación, analizar datos de consumo, etc.

El uso eficiente de la energía, mediante la implementación de lámparas inteligentes, permitirá aportar a la reducción de la emisión de gases contaminantes, a la toma de conciencia por parte de las personas sobre el uso que se le da a este recurso, y al desarrollo de soluciones de iluminación que sean amigables con el ambiente.

Referencias

- [1] Agency, I. -I. (2020). COVID-19 *Intensifies the Urgency to Expand Sustainable Energy Solutions Worldwide*. Retrieved from <https://www.irena.org/news/press-releases/2020/May/COVID-19-Intensifies-the-Urgency-to--Expand-Sustainable-Energy-Solutions-Worldwide>
- [2] ALFAIOT. (2021). ALFAIOT. Retrieved from *LoRaWAN: ¿Qué es y para qué sirve?*: <https://alfaiot.com/page/que-es-lo-rawan>
- [3] Buestán, J. C. (2019, Febrero). *Desarrollo de una red IOT con tecnología LORA para detección de automóviles*. Quito, Ecuador. Retrieved from <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/16897/1/UPS-ST003910.pdf>
- [4] Guevara Patiño, R. (2016, Diciembre 18). *El estado del arte en la investigación: ¿análisis de los conocimientos acumulados o indagación por nuevos sentidos? Folios*, 165–179. Retrieved from <https://www.gestiopolis.com/tipos-estudio-metodos-investigacion/>
- [5] Heredia, M. (2021). *Estudio de una red ciudadana LoRaWAN*.
- [6] lamparayluz.es. (2020). *Todo sobre iluminación*. Retrieved from *Las ventajas de la iluminación LED*: <https://www.lamparayluz.es/todo-sobre-iluminacion/las-ventajas-de-la-iluminacion-led>
- [7] Mera, Á. Q., & Velasco, M. T. (2021). *Análisis Económico de la eficiencia energética por la utilización de tecnología LED en el consumo eléctrico residencial*. *RES NON VERBA REVISTA CIENTÍFICA*, 73-91.

- [8] Minas, M. d. (2020, Enero 09). *En Ecuador, el consumo de energía eléctrica se incrementó en un 4,5% en 2019*. Retrieved from <https://www.rekursosyenergia.gob.ec/en-ecuador-el-consumo-de-energia-electrica-se-incremento-en-un-45-en-2019/>
- [9] Miranda, A. C. (2020). Análisis del Plan Nacional de Eficiencia Energética en el Ecuador. *Revista de Investigaciones en Energía, Medio Ambiente y Tecnología: RIEMAT*, 28-34.
- [10] Narváez, K. S., & Pérez, V. A. (2020). *Diseño y desarrollo de un prototipo de red de sensores IOT utilizando Tecnología Lorawan para el monitoreo de parámetros ambientales en interiores y exteriores*. Guayaquil, Ecuador. Retrieved from <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/19439/1/UPS-GT003019.pdf>
- [11] Ortiz Sosa, M. G. (2020). *Desarrollo de una red de sensores inalámbricos utilizando tecnología LoRa para el monitoreo de un sistema*.
- [12] Palacios Anzules, Í. d., & Moreno Castro, D. W. (2022). *Contaminación ambiental. RECIMUNDO*, 6(2), 93-103. Retrieved from [https://doi.org/10.26820/recimundo/6.\(2\).abr.2022.93-103](https://doi.org/10.26820/recimundo/6.(2).abr.2022.93-103)
- [13] Renovables, A. d. (2021). *Balance Nacional de Energía Eléctrica*. Retrieved from <https://www.controlrecursosyenergia.gob.ec/balance-nacional-de-energia-electrica/>
- [13] RODRIGUEZ MORAN, G. L. (2021). *Análisis de Dispositivos Electrónicos Programables para sistemas de iluminación led con energía renovable*.
- [14] Saravanan, G., Chandraprabha, S., Dinesh, C., & Mohamed Ibrahim, A. (2021). IoT materials enabled indoor light illumination monitoring system. *Materials Today: Proceedings*, 45(7), 6277-6281. Retrieved from <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785320383280>
- [15] Siverio Valle, L., Quintero Cabrera, D. A., & Fariñas Wong, E. Y. (2021). *Eficiencia energética en edificios de oficinas mediante tecnología de iluminación LED y parque solar FV. Ingeniería Energética*, 42(2), 69-80. Retrieved from http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1815-59012021000200069&lng=es&tlng=es
- [16] Tecnolite. (2020, Agosto 13). *Tecnolite*. Retrieved from Iluminación inteligente, todo lo que debemos saber: <https://tecnolite.lat/blog/por-que-iluminacion-inteligente/>
- [17] Valdiviezo Supo, K. R. (2021). *Diseño de sistema LED, basado en energía solar, para iluminar ambientes en la Universidad de Piura*.

Recibido: 01 de marzo de 2023

Aceptado: 01 de abril de 2023