

Diseño e implementación de un sistema de control automático para iluminación: Regulación de la iluminancia artificial en función de la iluminación natural

Design and implementation of an automatic control system for lighting: Regulation of artificial illuminance based on natural lighting

Josmani Pacheco-Macas¹, Raúl Chávez-Romero^{1,*}, Sara Chávez-Romero², Juan Chunchu-Morocho¹, Ivan Coronel-Villavicencio¹, Julio Gomez-Peña¹, Cristian Ortega-Reyes¹, Edwin Paccha-Herrera¹, Fernando Ramírez-Cabrera¹ y Carlos Samaniego-Ojeda¹

¹ Universidad Nacional de Loja, Loja, Ecuador

² Universidad Internacional de la Rioja, España

* Autor para correspondencia: raul.a.chavez.romero@gmail.com

Fecha de recepción del manuscrito: 01/12/2023

Fecha de aceptación del manuscrito: 29/12/2023

Fecha de publicación: 31/12/2023

Resumen—El presente trabajo propone un sistema de control analógico para controlar luminarias LED regulables en función de la señal proveniente de un sensor de iluminación, con el objetivo de utilizar solamente la energía necesaria para mantener un nivel de iluminación de 300 lx en el plano de trabajo de un aula universitaria de estudios de 27.54 m². Es decir, la iluminación artificial se adapta al nivel de iluminación natural, lo que representa una reducción en el consumo eléctrico y a su vez un ahorro económico en el servicio de electricidad. Se utilizó medidores de consumo eléctrico inteligentes para recopilar datos del sistema antiguo con tecnología fluorescente que se utilizaba en el aula, para luego comparar con los datos de consumo del nuevo sistema de control automático para iluminación (SCAI), el cual regula la potencia eléctrica utilizada y a la vez el flujo luminoso de las lámparas LED, en función de la iluminación natural.

Palabras clave—Control Analógico, Iluminación, LED, Eficiencia energética.

Abstract—This work proposes an analog control system to control dimmable LED luminaires depending on the signal coming from a lighting sensor, with the aim of using only the energy necessary to maintain a lighting level of 300 lx in the work plane of a 27.54 m² university study classroom. That is, artificial lighting adapts to the level of natural lighting, which represents a reduction in electrical consumption and in turn economic savings in electricity service. Smart electricity consumption meters were used to collect data from the old system with fluorescent technology that was used in the classroom, to then compare with the consumption data of the new automatic lighting control system (ALCS), which regulates the electrical power used and at the same time the luminous flux of the LED lamps, depending on the natural lighting.

Keywords—Analog Control, Lighting, LED, Energy efficiency.

INTRODUCCIÓN

Un sistema de iluminación tiene como objetivo proyectar el flujo luminoso de las lámparas hacia un plano de trabajo y generar un nivel de iluminancia deseado (Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía, 2001), dependiendo de si es un espacio interior o exterior, según la norma vigente. De acuerdo a la Norma europea sobre la iluminación para interiores, UNE 12464.1 (2018), se plantea que la iluminación dentro de los establecimientos educativos es fundamental para el desarrollo de cada una de las actividades que se realicen en los mismos. Las condiciones de iluminación del aula afectan el rendimiento académico de los estudian-

tes debido a la influencia de la luz en el aprendizaje (Castilla *et al.*, 2023). Una deficiencia en el sistema de iluminación puede producir un aumento de la fatiga visual, reducción en el rendimiento del personal que labora en las instalaciones, incremento en los errores y en ocasiones incluso accidentes (INSHT y Alvarez Bayona, 2015). Los estándares indican la cantidad de luz que debe estar presente en los planos de trabajo (lumen/m²=lux), pero no todas las edificaciones cumplen con este requerimiento. Existen accionamientos para los circuitos de iluminación dentro del mercado, que son manuales y no contribuyen en términos de eficiencia energética debido a que no usan un control automático para la regulación de las luminarias, así se usa por lo general toda

la potencia instalada o se puede ajustar mediante reguladores de intensidad (dimmers), pero el accionamiento siempre depende del manejo del usuario. Por otro lado, existen sistemas automáticos que se autorregulan con señales de entrada, salida y un procesador central que analiza las condiciones de programación en cada momento. El uso de sensores que midan la iluminación presente en el ambiente es una tecnología relativamente nueva en nuestro medio, es por ello que unificar estas tecnologías para desarrollar un sistema automático debería ser fundamental en la construcción de nuevos espacios. Bustán-Gaona *et al.* (2023) analizaron la efectividad de la iluminación natural en los espacios interiores de la arquitectura vernácula. Fakhari *et al.* (2021) investigaron el rango de satisfacción para la iluminancia con respecto a la temperatura del aire interior en edificios de oficinas. Ahmed *et al.* (2023) estudiaron un método alternativo para la iluminación de estructuras subterráneas, que utiliza lentes para enfocar la luz solar en un punto y utiliza fibras ópticas para transmitirla en el lugar requerido y se dispersa como una bombilla normal sin ningún consumo de energía eléctrica. Sánchez (2022) evaluó la iluminación de las aulas del mismo bloque A3, a la que pertenece el aula objeto de estudio y proyecta que con la implementación de un sistema automatizado se lograría disminuir el consumo eléctrico en un 40%. Además, al momento de realizar el estudio de iluminación en las aulas, se pudo comprobar que no cumple con la Norma UNE 12464.1 (2018). Por estas razones, es altamente recomendado realizar un rediseño del sistema de iluminación e implementar tecnología LED. En este contexto, se han logrado avances significativos en el diseño de sistemas de iluminación LED, Chacón-Avilés *et al.*, centro sus esfuerzos en las características eléctricas y fotométricas de estos sistemas, su estudio resalta especialmente la implementación de iluminación LED alimentada por paneles fotovoltaicos. Estos avances marcan el punto de partida hacia soluciones sostenibles e innovadoras en el ámbito de la iluminación, este estudio pretende ir más allá, es decir, no solo busca emplear un sistema que cumpla los estándares de iluminación, sino también su eficiencia, aprovechando la iluminación natural lo que reduce la dependencia de la luz artificial. Este trabajo implementa un sistema de control analógico para mantener un nivel adecuado de iluminancia en función de la luz natural del aula A312 de la Facultad de la Energía, las Industrias y los Recursos Naturales no Renovables (FEIRNNR), de la Universidad Nacional de Loja (UNL), donde estudios previos arrojan que no se cumple con los niveles de iluminación media según la norma UNE 12464.1 (2018), que para aulas tiene un valor mínimo de 300 lx. Al implementar el sistema diseñado se podrá generar un ahorro energético y económico, a la vez que se fomentará el uso eficiente de la energía eléctrica. Este tipo de sistemas deberían ser un implemento básico en cualquier espacio a iluminar. En el ámbito educativo, una correcta iluminación permite que tanto estudiantes como profesores mejoren su desempeño, en lo que corresponde al consumo energético, se verá una disminución significativa debido a que se usa únicamente la energía necesaria para mantener el nivel adecuado de iluminación lo que por consiguiente representa una disminución de la demanda energética y beneficios para el medio ambiente por la reducción de emisiones de CO₂. Este trabajo presenta una propuesta para hacer un uso eficiente de la energía eléctrica destinada al sistema de iluminación

en aulas de estudios. De esta manera se obtendrá beneficios medioambientales, energéticos y económicos (Sikora *et al.*, 2023), ya que, al reducir el consumo eléctrico, a su vez esto representa una reducción en las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y una reducción en el consumo eléctrico lo que representa un descenso en los costos de este servicio.

MATERIALES Y MÉTODOS

El procedimiento que se ha seguido de manera general para cumplir con los objetivos de este trabajo es el que se muestra en la Figura 1.

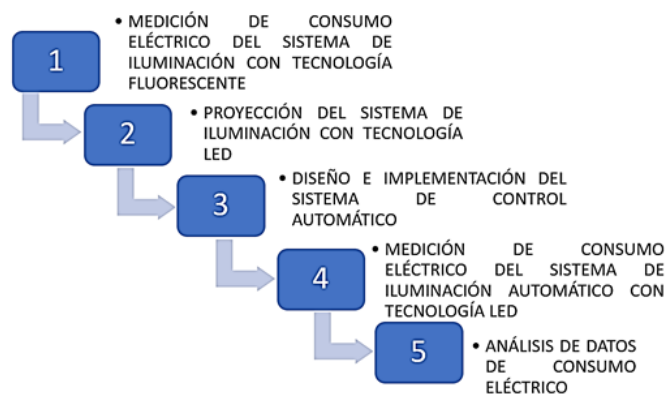


Fig. 1: Procedimiento general.

Los materiales necesarios para implementar el sistema de control de iluminación se detallan a continuación en la Tabla 1.

Tabla 1: Equipos y costos del sistema de control de iluminación.

Equipo	Modelo	Precio Unitario	Cantidad	Total (\$)
Transformador AC-AC 110-24 V	Ring doorbell X003 DSG15F	20	1	20
Convertidor AC-DC 110-12 V	Huawei	5	1	5
Regulador de voltaje	BossXL6009	3.50	2	7
Sensor de iluminación	Multisensor 0-10 V econtrols, MS. 602000-000	142	2	284
Controlador	Arduino Uno R3.	20	1	20
Panel LED dime-rizable 60×60	VLPND-45 W	43	3	130
Medidor inteligente	Emylo, EIA-90	41	1	41
Jumpers	-	0.10	20	2
Interruptores de dos posiciones	-	0.50	20	1
Cable 24 AWG	Jurui 24 AWG×2C	0.30	10	3
Borneras	-	0.50	2	1
Caja termoplástica	Legrand 180×140×86 mm	5	2	10
			Total	539

2.1. Medición del consumo eléctrico del sistema de iluminación con tecnología fluorescente

Para medir el consumo eléctrico del sistema de iluminación del aula objeto de estudio, se utilizó un medidor inteli-

gente Marca: Emylo Modelo: EAI-90 (Figura 2) que monitorea en tiempo real el consumo energético y la información puede ser revisada en la pantalla del medidor o a través de una aplicación para teléfono celular. El mismo se conectó en serie con la fase del interruptor de las luminarias del aula, para recopilar los datos de voltaje, intensidad eléctrica y potencia consumidos (Figura 3).



Fig. 2: Medidor inteligente Emylo instalado en el aula A312.

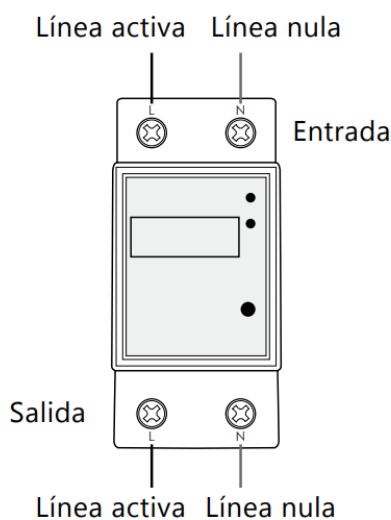


Fig. 3: Esquema de instalación del medidor inteligente Emylo.(Emylo, 2021)

El sistema de iluminación antiguo contaba con las características descritas en la Tabla 2.

Tabla 2: Características del sistema de iluminación fluorescente del aula 312.

Carácterística	Valor
Fluorescente	Marca: Advantage
Luminarias	2×2
Voltaje	120 V 50/60 Hz
Factor de potencia	≥ 0.9
Armónicos (THD)	<30 %
Amperaje	0.60
Protocolo de atenuacion	No
Potencia	40 W×4
Tiempo de uso diario promedio	7 h
Consumo mensual en kWh	27.56
Consumo mensual en \$	2.48

2.2. Proyección del sistema de iluminación con tecnología LED

2.2.1. Método de los lúmenes

El método de los lúmenes o también llamado sistema general, es un procedimiento que permite calcular la iluminación en luxes presente dentro de un área de trabajo, los valores obtenidos de este método poseen un error de ±5% (Castilla-Cabanes *et al.*, 2011). Para emplear esta metodología se deben seguir los siguientes pasos:

a. Datos del área de trabajo del aula

El primer paso para proyectar el sistema de iluminación consiste en tomar las medidas del espacio a iluminar, es decir el plano de trabajo, como se puede apreciar en la Tabla 3 y Figura 4.

Tabla 3: Dimensión de aula A312.

Dimensiones correspondientes al aula A312		
Símbolo	Valor	Unidad
a (ancho)	4.14	m
l (largo)	6.58	m
S (superficie)	27.24	m ²
h (altura del aula)	2.80	m
h_{pt} (altura del plano de trabajo)	0.85	m

En la Figura 4 se muestran los valores de la Tabla 3 para el dimensionamiento en un plano 3D del aula A312.

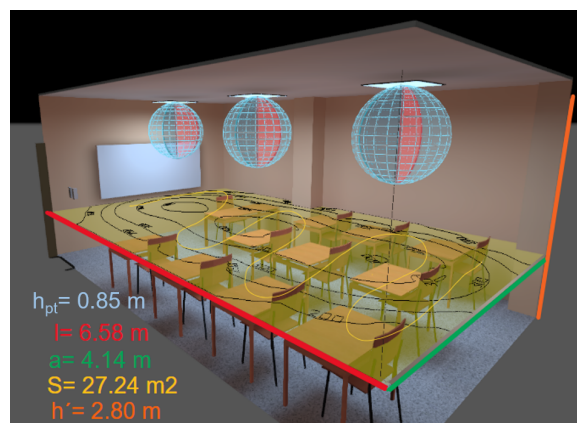


Fig. 4: Dimensiones del aula A312 en 3D, Dialux.

b. Altura de plano de trabajo

La altura del suelo a la superficie de la mesa de trabajo, generalmente establecida en 0.85 m, no solo tiene en cuenta la ergonomía y comodidad de los estudiantes, sino que también se relaciona directamente con la iluminación del aula.

c. Nivel de iluminación dentro del aula

Se estableció el nivel de iluminación de 300 lx el cual se especifica en la norma UNE 12464.1 (2018). Siguiendo este estándar, se puede asegurar que el ambiente de iluminación óptimo cumple con la normativa y brinda las condiciones

visuales necesarias para las tareas y actividades que se realizan en ese espacio.

d. Coeficiente de utilización (C_u)

El coeficiente de utilización es un valor adimensional que relaciona las dimensiones del área a iluminar en función del tipo de iluminación utilizada (directa, indirecta, difusa, etc.) y los coeficientes de reflexión de las superficies de techo, paredes y suelo.

En la ecuación (1), se calcula el valor de K para un tipo de iluminación directa, término que toma en cuenta las dimensiones de la zona a iluminar, y que servirá para encontrar el coeficiente de utilización.

$$K = \frac{(a + b)}{h \times (a + b)} \tag{1}$$

$$K = 1.54$$

Donde a y b son el ancho y largo de la zona a iluminar, respectivamente, h es la distancia comprendida entre el plano donde están instaladas las luminarias y el plano de trabajo que se desea iluminar. Una vez definido el índice K se realizó un análisis tanto visual como investigativo para poder asignar los coeficientes de reflexión correspondientes a techo, pared y suelo. Esto se analizó tomando en cuenta los colores de las superficies mencionadas, como se puede ver en la Tabla 4.

Tabla 4: Valores para coeficiente de reflexión.

Coeficiente de reflexión	
Superficie	Valor de coeficiente
Techo (blanco)	0.70-0.85
Paredes (amarillo)	0.50-0.75
Suelo (crema)	0.40-0.50

Una vez establecidos los valores de K y de los coeficientes de reflexión, se procede a corregir y encontrar el valor del coeficiente de utilización, la tabla para la corrección suele estar dada por el fabricante, pero en caso de que no se cuente con esta información se podría utilizar tablas, como la Tabla 5 (Castilla-Cabanes *et al.*, 2011).

Tabla 5: Valores de coeficiente de utilización.

Tabla de corrección					
Techo	0.70	0.70	0.70	0.0	0.70
Pared	0.70	0.50	0.20	0.20	0.0
Suelo	0.50	0.20	0.20	0.10	0.0
K(0.6)	77	58	49	48	45
K(1.0)	100	77	69	67	63
K(1.5)	116	91	84	80	77
K(2.5)	129	100	95	90	86
K(3.0)	133	103	99	93	89

Para tener el valor que corresponde al coeficiente de utilización se debe sumar cada uno de los valores que se intersecan, al relacionar el valor de k con los coeficientes de reflexión de las superficies, para luego dividirlos para el número total de valores, es decir, se debe interpolar entre los valores seleccionados, y luego dividir por 100 ya que el valor del coeficiente de utilización está en forma de porcentaje, en este

caso, el valor que se obtuvo fue el calculado con la ecuación (2):

$$C_u = \frac{C_{u1} + C_{u2} + C_{u3} + C_{u4}}{4 \times 100} \tag{2}$$

$$C_u = \frac{116 + 91 + 129 + 100}{4 \times 100} \tag{3}$$

$$C_u = 1.09$$

e. Coeficiente de mantenimiento (C_m)

El coeficiente de mantenimiento se asocia al nivel de limpieza del ambiente, ya que influye en la limpieza de la luminaria y por consiguiente en su mantenimiento. Un ambiente ideal estaría representado por un valor de 1 y un ambiente con demasiado polvo y suciedad con 0.01. Se utilizó un coeficiente de mantenimiento de 0.8 debido a que corresponde a un establecimiento que permanece limpio y ordenado.

$$C_m = 0.8$$

f. Flujo luminoso (Φ_{total})

Con todos los datos calculados anteriormente, se podrá calcular con la ecuación (4), la cantidad de lúmenes total (sumatoria del flujo luminoso de cada lámpara) que se necesitan para mantener un nivel de iluminación previsto de 300 lx dado por la norma UNE 12464.1 (2018).

$$\Phi_{total} = \frac{E_m \times S}{C_u \times C_m} \tag{4}$$

$$\Phi_{total} = 9371.55 \text{ lm}$$

Donde Φ_{total} es el flujo luminoso total.

g. Luminaria y lámpara

Para obtener la iluminación artificial se seleccionó paneles LED dimerizables de 45 W con una eficiencia luminosa de 100 lm/W.

h. Cálculo de número de luminarias

Aquí se planteó la ecuación (5), teniendo en cuenta los valores de flujo luminoso mínimo total, que resultó del cálculo de nivel de iluminación, para poder calcular el número de luminarias.

$$N_{luminarias} = \frac{\Phi_{total}}{N_{lámparas/luminaria} \times \Phi_{lámpara}} \tag{5}$$

$$N_{luminarias} = \frac{9371.55 \text{ lm}}{1 \times 4500 \text{ lm}} \tag{6}$$

$$N_{luminarias} = 2.08 \text{ luminarias}$$

$$N_{luminarias} = 3 \text{ luminarias}$$

Donde Φ_{total} es el flujo luminoso total, $\Phi_{lámpara}$ es el flujo luminoso de cada lámpara, $N_{luminarias}$ es el número de luminarias (la luminaria es el conjunto de base, pantalla y accesorios que sirven de soporte a las lámparas; las lámparas son los elementos que generan el flujo luminoso) y $N_{lámparas/luminaria}$ es el número de lámparas por cada luminaria.

i. Emplazamiento de luminarias

Teniendo el número de luminarias necesarias para cumplir con la normativa se procedió a ubicarlas de manera que la iluminación llegue a cada espacio de la superficie, para ello se empleó las ecuaciones (7) y (8), cabe destacar que esto es un modelo para la disposición, pero el diseñador podría proponer muchas otras combinaciones. La disposición utilizada para las lámparas se la puede observar en la Figura 6.

- Luminarias por ancho del aula (columnas).

$$N_{\text{ancho}} = \sqrt{\frac{N_{\text{luminarias}}}{l}} \times a \quad (7)$$

$$N_{\text{ancho}} = 1.33 = 2 \text{ columnas}$$

- Luminarias por largo del aula (filas).

$$N_{\text{largo}} = N_{\text{ancho}} \times \frac{1}{a} \quad (8)$$

$$N_{\text{largo}} = 2.11 = 2 \text{ filas}$$

j. Configuración final

Se analizaron algunas posibles configuraciones para instalar el sistema de iluminación, pero solo se muestra la disposición final en la Figura 6. Para comprobar que con la disposición de las luminarias y con el flujo luminoso de las lámparas se mantiene el nivel de iluminación requerido de 300 lx, se simuló el diseño utilizando el software Dialux, como se puede apreciar en la Figura 5.



Fig. 5: Configuración de luminarias en el software Dialux.

k. Comprobación del cálculo de luminarias

Luego de realizar el emplazamiento, se procedió a comprobar que las luminarias seleccionadas cumplen con el mínimo requerido para iluminar el área de trabajo. Se debe comparar que el valor calculado sea mayor o igual que 300 lx, como se puede verificar en el resultado de la ecuación (10).

$$E_m = \frac{N_{\text{luminarias}} \times N_{\text{lámparas/luminaria}} \times \Phi_{\text{lámpara}} \times C_u \times C_m}{S} \quad (9)$$

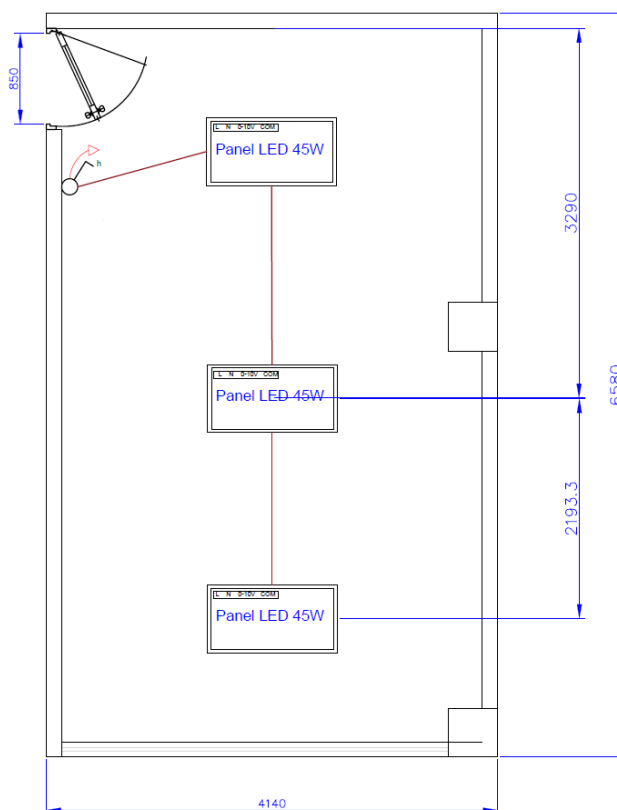


Fig. 6: Plano de posición de luminarias para el aula 312.

$$E_m = \frac{3 \times 1 \times 4500 \text{ lm} \times 1.09 \times 0.8}{27.24 \text{ m}^2} \quad (10)$$

$$E_m = 432.15 \text{ lx} \geq 300 \text{ lx}$$

2.3. Diseño e implementación del sistema de control automático de iluminación

Para el diseño del Sistema de Control Automático de Iluminación que en adelante se denominará SCAI, se utilizaron los materiales que se describen en la Tabla 6 y Tabla 7:

Tabla 6: Lista de materiales.

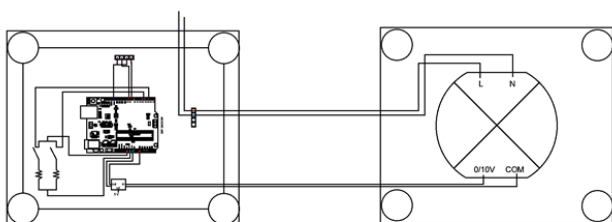
Equipo	Modelo
Transformador 110/24 V	AC/AC Ring doorbell X003DSG15F
Convertidor 110/12 V	AC/DC Huawei
Regulador de voltaje	LM2596
Sensor de iluminación	Multisensor 0-10 V Econtrols, MS.602000-000
Controlador	Arduino Uno R3
Panel LED dimerizable	VELPND 45 W 60×60
Medidor inteligente	Emylo/EAI-90
Jumpers	-
Interruptores	-
Cable 24 AWG	Jurui 24 AWG×2C
Borneras	-
Caja termoplástica	Legrand 180×140×86 mm

Tabla 7: Características del panel LED dimerizable.

Característica	Valor
LED SMD	Modelo: Honglitrionic 2835
Número de luminarias	3x1
Voltaje	100-277 V AC 50/60 Hz
Factor de potencia	$\geq 0,9$
Armónicos (THD)	$<20\%$
Protocolo de atenuación	0-10 V
Potencia	$3 \times 45\text{ W}$
Eficacia	100 lm/W

Diagrama de instalación.

Se analizó cada una de las entradas y salidas necesarias para trabajar con los equipos, en cuanto a su tensión en DC y compatibilidad entre dispositivos de entrada, salida y la unidad de control. Los sensores de iluminación presentan una señal analógica de tensión DC en función de la iluminación medida, que varía entre 0 y 10 V. El driver que regula las lámparas LED necesita una señal analógica de 0 a 10 V DC. El controlador Arduino Uno, se alimenta con 12 V DC, y trabaja con señales analógicas y digitales en un rango de 0 a 5 V DC, por lo que para trabajar con el sensor se utilizó un convertidor DC-DC de voltaje LM2596, para reducir la tensión eléctrica de la señal del sensor de iluminación de 0-10 V a 0-5 V (Figura 18). La imagen de la Figura 7 se la puede ver con más claridad en la Figura 18 de los anexos.

**Fig. 7:** Diagrama eléctrico simplificado del SCAI.

El diagrama de alimentación y fuerza se lo puede observar más detalladamente en el anexo 2.

Algoritmo para control de iluminación.

Se analizó la placa de programación seleccionada para realizar el control y se elaboró el código que permitió cumplir con las condiciones deseadas como se puede ver en el anexo 1. A continuación en la Tabla 8 se puede observar las entradas y salidas del controlador, y su función en el sistema. En la Figura 8 se puede observar la vista esquemática del panel de control del SCAI.

El interruptor 1 activa el modo automático y el interruptor 2 el modo proyección.

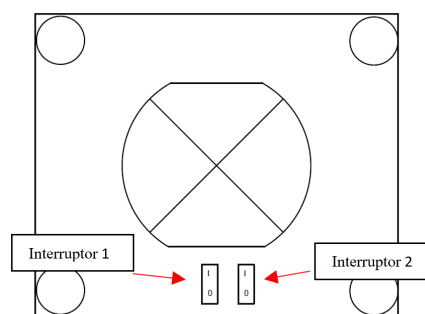
Modos de funcionamiento: Dependiendo de la combinación de los estados de los interruptores 1 y 2 se pueden establecer 4 modos de funcionamiento:

- Modo 1

Cuando el interruptor 1 está en posición ON y el interruptor 2 este en posición ON entonces la salida de voltaje será igual a 5 V, lo que significa que se utilizará la potencia necesaria

Tabla 8: Tabla de entradas/salidas del controlador.

Variable	Función
salidaPWM/ salidaPWM2	Variables donde se almacenan la cantidad de voltaje de salida que tendrá el pin físico de la salida
botonPin/ botónPin2	Variables donde se establecen el pin del Arduino donde se conectará los interruptores de función y se estableció como variable de entrada. Se establecieron como variables de entrada y tienen un valor inicial de 0, indica que inicialmente los interruptores estarán apagados o en posición 0.
estadoBoton/ estadoBoton2	Son variables de entrada para almacenar los datos recopilados por el sensor.

**Fig. 8:** Panel de control del SCAI.

para mantener los 300 lx en el plano de trabajo, de manera continua, es decir no se adapta a la iluminación natural.

- Modo 2

Cuando el interruptor 1 está en posición OFF y el interruptor 2 este en posición OFF entonces la salida de voltaje será igual a 0 V, es decir el sistema de iluminación esta apagado.

- Modo 3 (Modo Automático)

Cuando el interruptor 1 está en posición ON y el interruptor 2 este en posición OFF, la salida de voltaje que controla al driver de la luminaria, se ajustará en función del voltaje proveniente del sensor de iluminación el cual envía esta señal al controlador. Así entre menor sea el voltaje de entrada medido por el sensor de iluminación (menor iluminación natural) mayor será el voltaje de salida que va hacia el driver (mayor iluminación artificial) y viceversa, de esta manera se autorregula la iluminación artificial en función de la iluminación natural para mantener la consigna de 300 lx en el plano de trabajo.

- Modo 4 (Modo proyección)

Cuando el interruptor 1 está en posición OFF y el interruptor 2 este en posición ON entonces la salida de voltaje será de 1 voltio en los paneles posteriores del aula y de 0 V en el panel delantero (cerca a la pizarra), es decir cerca del proyector la lámpara se apaga y las luminarias que iluminan los pupitres se autorregulan a 100 lx aproximadamente para permitir el uso de proyector de diapositivas.

■ Activación con movimiento

Todo el sistema se activa con un sensor de movimiento incorporado en el sensor de iluminación, por lo que el sistema no necesita ser activado o desactivado manualmente.

En la Figura 9, Figura 10 y Figura 11 se muestran respectivamente:

- El valor de iluminación artificial que se tiene en función del valor de tensión en las salidas analógicas.
- Los valores de tensión en las entradas analógicas en función de la iluminación medida en los sensores.
- La relación inversa que existe entre la tensión en las salidas para generar la iluminación artificial, y la tensión en función de la iluminación medida en el sensor.

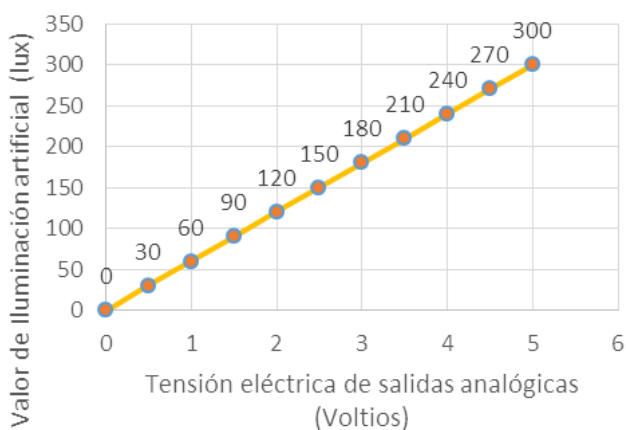


Fig. 9: Iluminación artificial en función del voltaje aplicado.



Fig. 10: Tensión eléctrica en función de la iluminación medida.

El algoritmo con las condiciones y modos de funcionamiento del SCAI se pueden entender de mejor manera analizando la Figura 12.

Construcción de SCAI.

Una vez que se realizaron algunas pruebas de funcionamiento del sistema, y mediciones con un luxómetro para verificar que se obtengan los valores de iluminación deseados, se colocó el procesador, regulador y convertidores de tensión en el interior de un tablero termoplástico con protección IP40, luego se insertaron en la cubierta el sensor de iluminación, interruptores, y demás elementos del sistema de control. A

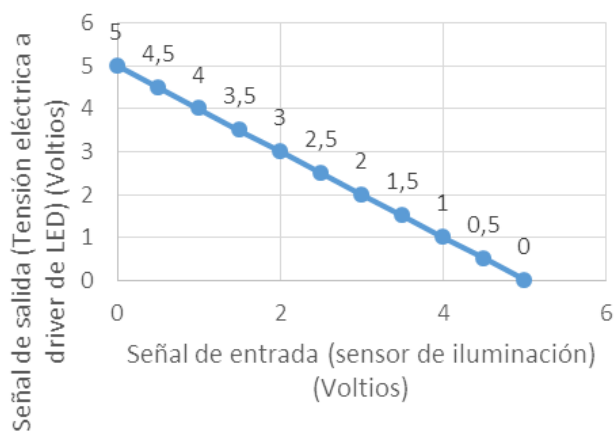


Fig. 11: Señal de salida en función de la señal de entrada.

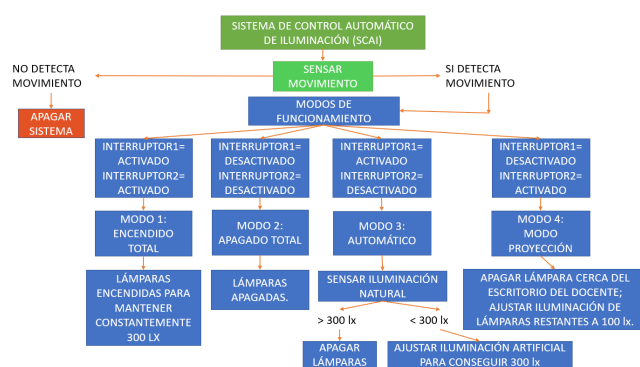


Fig. 12: Diagrama de flujo del algoritmo utilizado.

continuación, se procedió a cargar el programa final en la placa de programación y colocar el cableado de fuerza y control tomando en cuenta el diagrama de instalación. Por último, se realizó el mismo procedimiento para alojar el segundo sensor. La ubicación de los elementos en los tableros se puede observar en la Figura 13 y Figura 14. En las figuras, Figura 15 y Figura 16 se pueden observar la disposición final del sistema.

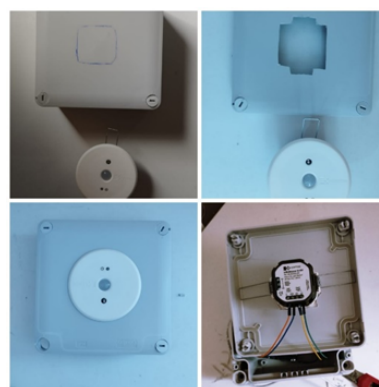


Fig. 13: Ubicación del sensor de iluminación.

2.4. Medición del consumo eléctrico del sistema de iluminación automático con tecnología LED

Para el monitoreo del consumo eléctrico del SCAI, Se usaron dos tipos de medidores, el dispositivo básico Emylo y los sistemas de monitoreo inteligente Emporia (Figura 17), instalados en función del Proyecto 19-DI-FEIRNNR-2023 del



Fig. 14: Conexiones eléctricas del sistema de control.

Centro de Investigaciones Tecnológicas y Energéticas (CITE) de la Universidad Nacional de Loja. La interfaz de los medidores Emporia permite revisar datos de consumo eléctrico cada hora, día, mes y año, como se puede apreciar en la Figura 18.



Fig. 17: Monitor inteligente Emporia.



Fig. 15: Disposición de las luminarias LED dimerizables.

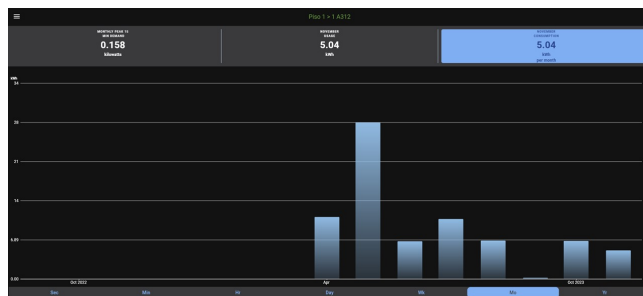


Fig. 18: Interfaz del monitor Emporia.

dividió el consumo eléctrico del sistema con lámparas fluorescentes para la potencia instalada de las mismas, es decir se calculó el tiempo de uso. El tiempo de uso multiplicado por la potencia de los paneles LED da como resultado el consumo aproximado que se tendría bajo las mismas condiciones con lámparas LED, como se puede apreciar en la ecuación (11):

$$Consumo_{LED} = \frac{Consumo_{Aula_{Fluorescente}} \times Potencia_{LED}}{Potencia_{Fluorescente}} \quad (11)$$

2.6. Análisis de datos de consumo eléctrico

Con los datos recopilados mediante los medidores inteligentes instalados en cada una de las aulas del bloque A3 se decidió realizar una proyección de consumo energético de un sistema de iluminación convencional con tecnología LED y el SCAI, esto con la finalidad de conocer el nivel de ahorro energético que se lograría al implementar estos sistemas. Se clasificó los datos en tablas, para luego representar en un gráfico de barras y exponer el consumo de estos tres sistemas. Como se aprecia en la Tabla 11 y la Figura 18.



Fig. 16: Ubicación de los elementos del SCAI en el aula.

2.5. Proyección del consumo con iluminación convencional con tecnología LED

Para proyectar el consumo de un sistema de iluminación convencional, es decir sin control, con tecnología LED, se

2.7. Análisis de radiación y luz solar en la ciudad de Loja

Con los datos recopilados mediante los medidores inteligentes instalados en cada una de las aulas del bloque A3 se realizó una proyección de consumo energético de un sistema de iluminación convencional con tecnología LED y el SCAI, esto con la finalidad de conocer el nivel de ahorro energético que se lograría al implementar estos sistemas. Se clasificó los datos en tablas, para luego representar en un gráfico de barras y exponer el consumo de estos tres sistemas. Como se aprecia en la Tabla 12 y la Figura 19.

RESULTADOS

Análisis comparativo de sistemas

Se analizaron las diferencias clave entre el sistema antiguo de iluminación con tecnología fluorescente, el sistema proyectado convencional con tecnología LED y el sistema de control automático de iluminación con tecnología LED dimerizable. Se consideraron aspectos cruciales como eficiencia energética, durabilidad, calidad de luz, vida útil y costos operativos. Con ello, se pretende demostrar las ventajas significativas que ofrecen los sistemas LED, consolidándose como una opción valiosa y sostenible en el campo de la iluminación moderna.

En la Tabla 9 se muestra una comparación entre el sistema antiguo y el SCAI, donde resaltan las ventajas de éste último sobre los sistemas de iluminación tradicionales en varios aspectos. Su eficiencia energética, larga vida útil y mejor calidad de luz es una opción más atractiva y sostenible para iluminar diversos entornos.

Tabla 9: Análisis comparativo entre sistema antiguo de iluminación y sistema de iluminación LED Dimerizable en el aula objeto de estudio.

	Sistema anti-guo	Sistema de control automático de iluminación(SCAI)
Luminarias	2×2	3×1
Tipo de luminaria	Fluorescente	LED
Potencia por luminaria	40 W ×2	45 W ×1
Selección de escenas	No	Si(Modo automático- Modo proyección)
Vida útil	5000 h	50000 h
Panel difusor de luminosidad	No	Si
Impacto ambiental	Mayor huella de carbono	Menor huella de carbono
Consumo mensual	27.56 kWh	10.55 kWh
Costo mensual del servicio	2.48 USD	0.95 USD
Porcentaje de ahorro		61.7%
Consumo energético por área	1.0008 kWh/m ²	0.3834 kWh/m ²

La Tabla 10 indica los valores de las áreas de las aulas del Bloque 3, que se utilizaron para calcular el consumo eléctrico por unidad de área.

Tabla 10: Áreas de cada una de las aulas del bloque 3 de la FEIRNNR.

Aula	Área(m ²)
A333	44.92
A332	44.92
A334	67.63
A322	44.92
A323	44.92
A324	67.36
A312	27.54
A313	45.61
A314	32.41
A315	27.53

En la Tabla 11, se presentan los consumos promedio actuales del sistema de iluminación del Bloque A3 de la FEIRNNR, junto con los consumos proyectados de un sistema convencional LED y un SCAI para cada aula. Esta comparativa se llevó a cabo con el objetivo de analizar de manera más efectiva los beneficios potenciales de la implementación de esta tecnología en las aulas.

Los valores fueron tomados de los medidores inteligentes instalados en el Bloque A3, donde se realizó un cálculo promedio de los consumos que se obtendrían al implementar un cambio de luminarias por una tecnología LED, de igual manera se encuentran las proyecciones del sistema SCAI. Además, es posible observar el consumo mensual por unidad de área de cada una de las aulas del Bloque A3, esto ofrece una visión del beneficio de instalar un SCAI o reemplazar el sistema de luminarias por paneles LED.

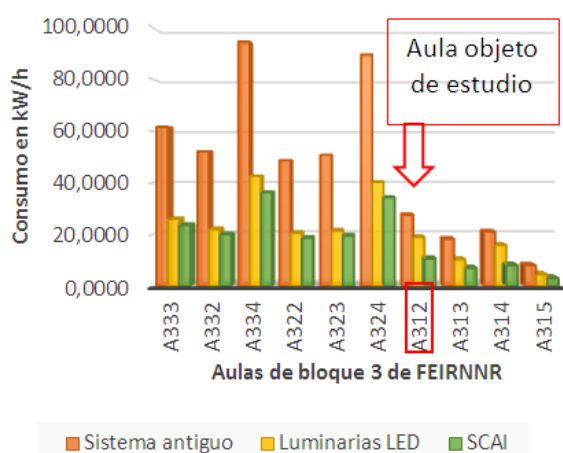
DISCUSIÓN

Para contrastar los resultados sobre los niveles de iluminación necesarios en aulas de estudio, se determinó que el aula A312 requiere un flujo luminoso mínimo de 9371.55 lm para alcanzar 300 lx en el plano de trabajo, cumpliendo con las normas UNE 12464.1 (2018) y la Norma Ecuatoriana de Construcción (NEC) en su capítulo NEC-HS-EE: Eficiencia Energética (“NEC: Norma Ecuatoriana de la construcción. Eficiencia Energética en Edificaciones Residenciales”, 2018). Se logró cumplir con el nivel mínimo de iluminación utilizando 3 paneles LED dimerizables de 45 W y se corroboró los cálculos mediante la simulación en el software Dialux. Otros estudios, como el de Sanchez-Cueva (2022) estableció en el plano de trabajo, 736 lx con 6 luminarias de 30 W para la misma aula, aunque esto aumenta el consumo de energía. Se señala que la disponibilidad limitada de paneles dimerizables en el mercado nacional dificultó la adquisición, lo que resultó en la importación de equipos desde España y Colombia, causando retrasos en la implementación del sistema.

Resumen de consumos del sistema antiguo, proyección con LED convencional y SCAI.**Tabla 11:** Resumen de valores de consumo eléctrico mensual de sistemas proyectados en el bloque A3 de la FEIRNNR de la UNL.

Aula	Consumo mensual			Consumo mensual por unidad de área			Costo mensual			Ahorro mensual	
	Sistema Anti-guo (kWh)	Sistema LED (kWh)	SCAI (kWh)	Sistema Anti-guo (kWh /m ²)	Sistema LED (kWh /m ²)	SCAI (kWh /m ²)	Sistema Anti-guo (USD)	Sistema LED (USD)	SCAI (USD)	Sistema LED (USD)	SCAI (USD)
A333	61.66	26.01	23.62	1.37	0.57	0.52	5.54	2.34	2.12	3.20	3.42
A332	52.17	22.01	19.98	1.16	0.49	0.44	4.69	1.98	1.79	2.71	2.89
A334	94.73	42.62	36.29	1.40	0.63	0.53	8.52	3.83	3.26	4.68	5.25
A322	48.65	20.52	18.63	1.08	0.45	0.41	4.37	1.84	1.67	2.53	2.70
A323	50.82	21.44	19.47	1.13	0.47	0.43	4.57	1.92	1.75	2.64	2.82
A324	89.69	40.36	34.36	1.33	0.59	0.51	8.07	3.63	3.09	4.43	4.97
A312	27.56	18.90	10.55	1.00	0.68	0.38	2.48	1.70	0.95	0.77	1.53
A313	18.23	10.25	06.98	0.39	0.22	0.15	1.64	0.92	0.62	0.71	1.01
A314	21.13	15.85	08.09	0.65	0.48	0.24	1.90	1.42	0.72	0.47	1.17
A315	07.99	04.49	03.06	0.29	0.16	0.11	0.71	0.40	0.27	0.31	0.44
Total	472.67	222.49	181.08	9.82	4.79	3.76	42.54	20.02	16.29	22.51	26.24
Promedio	47.26	22.24	18.10	0.98	0.47	0.37	4.25	2.00	1.62	2.25	2.62

Para tener una mejor visualización de los consumos energéticos, se realizó el diagrama de barras que se muestra en la Figura 19.

**Fig. 19:** Consumo mensual de los diferentes sistemas de iluminación.

Además, es importante destacar que el color de las paredes presente en el aula de clases es amarillo, con un índice de reflexión de 0.5 a 0.7, lo que influye en la reflexión del flujo luminoso dentro del aula, debido a que los colores de tonos claros y neutros, reflejan mejor la luz natural y artificial, como, por ejemplo, el blanco con índice de reflexión de 0.75-0.85. Es decir con un color completamente claro o tono pastel, se podría mejorar el índice de reflexión, lo que reduciría en cierta medida el consumo eléctrico. Se construyó un sistema utilizando un sensor de iluminación y un controlador Arduino para procesar la información y controlar la atenuación del panel LED, manteniendo una iluminación de 300 lx en el plano de trabajo conforme a las normas mencionadas. Sanchez-Cueva (2022) presentó un sistema de control basado en horarios, activando las luminarias con sensores de mo-

vimiento y luminosidad, también utilizando un controlador Arduino. Por otro lado, para otro sistema de iluminación en otro contexto, Ruales Gavilanes (2020) propuso un sistema de escenas automático que ajusta la iluminación según la hora del día, aunque no controla la atenuación basada en la luz natural, cuenta con un sistema de escenas manuales para ahorrar energía. En el análisis comparativo de funcionamiento, se obtuvieron resultados que demostraron un ahorro notable con el sistema automático de iluminación en comparación con el sistema antiguo que utilizaba lámparas fluorescentes. Durante un mes con labores académicas normales en el aula objeto de estudio, el consumo energético del sistema antiguo fue de 27.56 kWh, mientras que el sistema de control automático solo consumió 10.55 kWh, lo que representa un ahorro del 61.7%. Investigaciones anteriores en otros contextos respaldan que se puede generar un porcentaje de ahorro, instalando sistemas de control de iluminación. Ruales Gavilanes (2020) implementó un sistema de control automático de iluminación, obteniendo un ahorro del 55.06% en comparación con el sistema de iluminación convencional. Además, Portocarrero Chauca (2017) aplicó el protocolo DALI para controlar las luminarias, logrando un ahorro del 41.78%. A pesar de que los resultados pueden variar según el área de iluminación, ventanales en los espacios, colores de superficies, etc., en general, se observarán ahorros significativos. Cabe destacar que el sistema centralizado del protocolo mencionado (DALI) permite controlar las luminarias desde una computadora central, lo que resulta en una mayor eficiencia operativa. Sin embargo, es importante mencionar que, actualmente sería difícil la implementación en Ecuador debido a que en el mercado nacional no existe oferta de estos equipos. Además, el ahorro energético por el cambio de luminarias fluorescentes a LED en el aula de estudio fue estimado en 31.4%. El estudio desarrollado por Pompei *et al.* (2022), demostró que dicho ahorro puede oscilar entre el 70% al 40% en edificaciones. En general, las condiciones de iluminación deben ser adecuadas no solo para las personas, sino que también se

pueden estudiar métricas para que el entorno también favorezca el crecimiento de plantas (Madias *et al.*, 2023) y, además, se puede buscar una integración con el internet de las cosas (Chiradeja y Yoomak, 2023).

CONCLUSIONES

Los resultados de la investigación indican que se necesitan 3 paneles LED dimerizables de 45 W para alcanzar 300 lx de iluminación en el aula A312, respaldando este cálculo mediante la simulación en el software Dialux. Sin embargo, se encontró que Sanchez-Cueva (2022) alcanzó niveles más altos (736 lx) con una configuración diferente. Aunque ambas opciones cumplen con los requisitos de iluminación, es crucial considerar el impacto energético relacionado con el aumento de potencia en las luminarias. Los resultados respaldan la eficacia de usar un controlador y sensores de luminosidad como sistema de control para mantener una iluminación constante de 300 lx, cumpliendo con las normas. Aunque esta opción es viable, se podrían aplicar otras opciones como el módulo atenuador PowPak, que también ofrece control dimerizable pero podría ser más difícil de obtener en el mercado nacional. Además, se destaca la versatilidad de otras soluciones de control, como la de Sanchez-Cueva (2022) basada en sensores de movimiento y luminosidad, y el sistema de escenas presentado por Ruales Gavilanes (2020). Cada enfoque tiene ventajas distintas y su elección dependerá de la disponibilidad de tecnología y los objetivos de eficiencia energética y funcionalidad en situaciones específicas. El análisis comparativo demuestra que la implementación del sistema automático de iluminación genera un importante ahorro del 61.7% (1.53 USD mensuales) en el consumo mensual en función de las jornadas académicas normales, en comparación con el sistema antiguo con tecnología fluorescente. Las investigaciones previas, de Sánchez Cueva, Ruales Gavilanes y Portocarrero Chauca, analizadas en la discusión, respaldan estas conclusiones al mostrar que otros sistemas automáticos han logrado ahorros sustanciales en energía. El proyecto enfatiza la necesidad de invertir más en investigación y desarrollo de tecnologías de control de iluminación eficientes y asegurar su disponibilidad en el mercado local, con el objetivo de maximizar los ahorros energéticos y contribuir a la sostenibilidad en cuanto a sistemas de iluminación.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Nacional de Loja, la Facultad de la Energía, las Industrias y los Recursos Naturales No Renovables, a la carrera de Ingeniería Electromecánica, al Proyecto 19-DI-FEIRNNR-2023 y al Centro de Investigaciones Tecnológicas y Energéticas (CITE) que, de una u otra forma, contribuyeron en la realización de este trabajo. Gracias por su tiempo, su colaboración, y sus valiosos aportes.

CONTRIBUCIONES DE LOS AUTORES

Conceptualización: RCR y JPM; metodología: RCR y JPM; análisis formal: RCR y JPM; investigación: JPM y CSO; recursos: JPM; curación de datos: JPM, COR e ICV; redacción — preparación del borrador original: JPM, SCR y RCR; redacción — revisión y edición: JPM, SCR, RCR, EPH y JCM; visualización: EPH, JGP y FRC; supervisión: RCR;

administración de proyecto: JPM y RCR. Todos los autores han leído y aceptado la versión publicada del manuscrito. Josmani Pacheco-Macas: JPM. Raúl Chávez-Romero: RCR. Sara Chávez-Romero: SCR. Carlos Samaniego-Ojeda: CSO. Juan Chunchu-Morocho: JCM. Cristian Ortega-Reyes: COR. Edwin Paccha-Herrera: EPH. Ivan Coronel-Villavicencio: ICV. Julio Gomez-Peña: JGP. Fernando Ramírez Cabrera: FRC.

FINANCIAMIENTO

El presente trabajo no contó con ninguna fuente de financiamiento formal

REFERENCIAS

- Ahmed, S. A., Sarath Kumar, R. S., Gunadeep, M., Praveen Kumar, K., Jayanth, S. S., y Chaitanya, C. S. (2023). Design and analysis of a natural lighting system for underground structures. *Materials Today: Proceedings*. doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.08.369>
- Bustán-Gaona, D., Ayala-Chauvin, M., Buele, J., Jara-Garzón, P., y Riba-Sanmartí, G. (2023). Natural lighting performance of vernacular architecture, case study oldtown pasa, ecuador. *Energy Conversion and Management: X*, 20, 100494. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2023.100494>
- Castilla, N., Higuera-Trujillo, J. L., y Llinares, C. (2023). The effects of illumination on students memory. a neuroarchitecture study. *Building and Environment*, 228, 109833. doi: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109833>
- Castilla-Cabanes, N., Blanca, V., Antón, A., y Pastor, R. (2011, 01). Cálculo iluminación según el método de los lúmenes. <http://hdl.handle.net/10251/12833>.
- Chacón-Avilés, R., Meza-Benavides, C., C.-Braga, H. A., S.-Almeida, P., y G.-Casagrande, C. (2017). Proceso de diseño de sistemas de iluminación led energéticamente autónomos. *Tecnología en Marcha*, 30, 100. doi: <https://doi.org/10.18845/tm.v30i4.3411>
- Chiradeja, P., y Yoomak, S. (2023). Development of public lighting system with smart lighting control systems and internet of thing (iot) technologies for smart city. *Energy Reports*, 10, 3355-3372. doi: <https://doi.org/10.1016/j.egy.2023.10.027>
- Emylo. (2021). *Manual de Usuario de medidor de consumo eléctrico Emylo*. Descargado de <https://www.faboro.de/wp-content/uploads/2021/02/WiFi-Meter-User-Manual.pdf>
- Fakhari, M., Fayaz, R., y Asadi, S. (2021). Lighting preferences in office spaces concerning the indoor thermal environment. *Frontiers of Architectural Research*, 10(3), 639-651. doi: <https://doi.org/10.1016/j.foar.2021.03.003>
- INSHT, I., y Alvarez Bayona, T. (2015). Iluminación en el puesto de trabajo. *Madrid: NIPO*.
- Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía. (2001). *Guía técnica de eficiencia energética en iluminación - centros docentes*. Editorial del Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía.
- Madias, E.-N. D., Christodoulou, K., Androvitsaneas, V. P., Skalkou, A., Sotiropoulou, S., Zervas, E., y Doulos, L. T. (2023). The effect of artificial lighting on both biophilic and human-centric design. *Journal of Building Engineering*, 76, 107292. doi: <https://doi.org/10.1016/j.job.2023.107292>

- NEC: Norma Ecuatoriana de la construcción. Eficiencia Energética en Edificaciones Residenciales. (2018).
- Pompei, L., Blaso, L., Fumagalli, S., y Bisegna, F. (2022). The impact of key parameters on the energy requirements for artificial lighting in italian buildings based on standard en 15193-1:2017. *Energy and Buildings*, 263, 112025. doi: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.112025>
- Portocarrero Chauca, C. A. (2017). Propuesta de implementación del sistema “led” con control dali de iluminación para reducir costos en la planta de operaciones de jnr logística e ingeniería sac.
- Ruales Gavilanes, B. J. (2020). *Diseño e implementación de un sistema de control de iluminación para el salón 216b del edificio de aulas y relación con el medio externo (earme) de la epn* (B.S. thesis). Quito, 2020.
- Sanchez-Cueva, L. H. (2022). Sistema de iluminación led automatizado para el edificio 3 de la facultad de energía, las industrias y los recursos naturales no renovables de la universidad nacional de loja e implementación de prototipo. *Dspace UNL*.
- Sikora, R., Markiewicz, P., y Korzeniewska, E. (2023). Using identification method to modelling short term luminous flux depreciation of led luminaire to reducing electricity consumption [Article]. *Scientific Reports*, 13(1). (Cited by: 0; All Open Access, Gold Open Access, Green Open Access) doi: 10.1038/s41598-023-27925-5

ANEXOS

Anexo 1

Código de programación

```
const int botonPin = 2; // Pin del interruptor 1
const int botonPin2 = 4; // Pin del interruptor 2
int estadoBoton = 0; // Variable para almacenar el estado del interruptor 1
int estadoBoton2 = 0; // Variable para almacenar el estado del interruptor 2
const int salidaPWM = 9; // Pin de voltaje de salida
const int salidaPWM2 = 10; // Pin de voltaje de salida
// Función para escalar un valor de entrada desde un rango inicial a un rango deseado
float scaleValue(float inputValue, float inputMin, float inputMax, float outputMin, float outputMax)
{return map(inputValue, inputMin, inputMax, outputMin, outputMax);}
void setup() { Serial.begin(9600); pinMode(botonPin, INPUT); // Configura el pin del interruptor 1 como entrada
pinMode(botonPin2, INPUT); // Configura el pin del interruptor 2 como entrada
```

```
pinMode(salidaPWM, OUTPUT); // Configura la variable como salida
pinMode(salidaPWM2, OUTPUT); // Configura la variable como salida
pinMode(9, OUTPUT); // Configurar el pin 9 como salida analógica
pinMode(10, OUTPUT); // Configurar el pin 10 como salida analógica }
void loop() { // Leer el valor analógico desde el pin A0 estadoBoton = digitalRead(botonPin);
estadoBoton2 = digitalRead(botonPin2);
int sensorValue = analogRead(A0);
int sensorValue2 = analogRead(A3);
if (estadoBoton == 1 and estadoBoton2==0) { // Escalar el valor leído del rango de 0-1023 a un rango de 0-255 (valores analógicos para el MODO AUTOMÁTICO)
int scaledValue = scaleValue(sensorValue, 0, 850, 255, 0);
int scaledValue2 = scaleValue(sensorValue2, 0, 880, 255, 0);
// Escribir el valor escalado en el pin 9 (salida analógica) analogWrite(9, scaledValue);
analogWrite(10, scaledValue2); }
if (estadoBoton2 == 0
if (estadoBoton == 0) { })
// Condición para cuando los interruptores 1 y 2 estén en posición OFF el voltaje de salida se ajuste a 0V
Serial.print("voltaje mínimo"); analogWrite(salidaPWM, 0)
;
analogWrite(salidaPWM2, 0) ;}
if (estadoBoton2 == 1
if (estadoBoton == 1) { }) // Condición para cuando los interruptores 1 y 2 estén en posición ON el voltaje de salida se ajusta a 5V
Serial.print("Voltaje máximo");
analogWrite(salidaPWM, 255);
analogWrite(salidaPWM2, 255);}
if (estadoBoton2 == 1 and estadoBoton==0) // Condición para cuando el interruptor 2 esta en posición ON y el interruptor 1 esta en posición OFF, el voltaje de salida se ajusta en 1V (MODO PROYECCIÓN)
analogWrite(salidaPWM2 , 51) ;
// Imprime los valores en el puerto serial

Serial.print("Valor original: ");
Serial.print(sensorValue);
Serial.print("Valor original: ");
Serial.print(sensorValue2);
delay(100); // Pequeña pausa para evitar lecturas y escrituras muy rápidas
```

Anexo 2

Diagrama multifilar de sistema de control de iluminación automático.

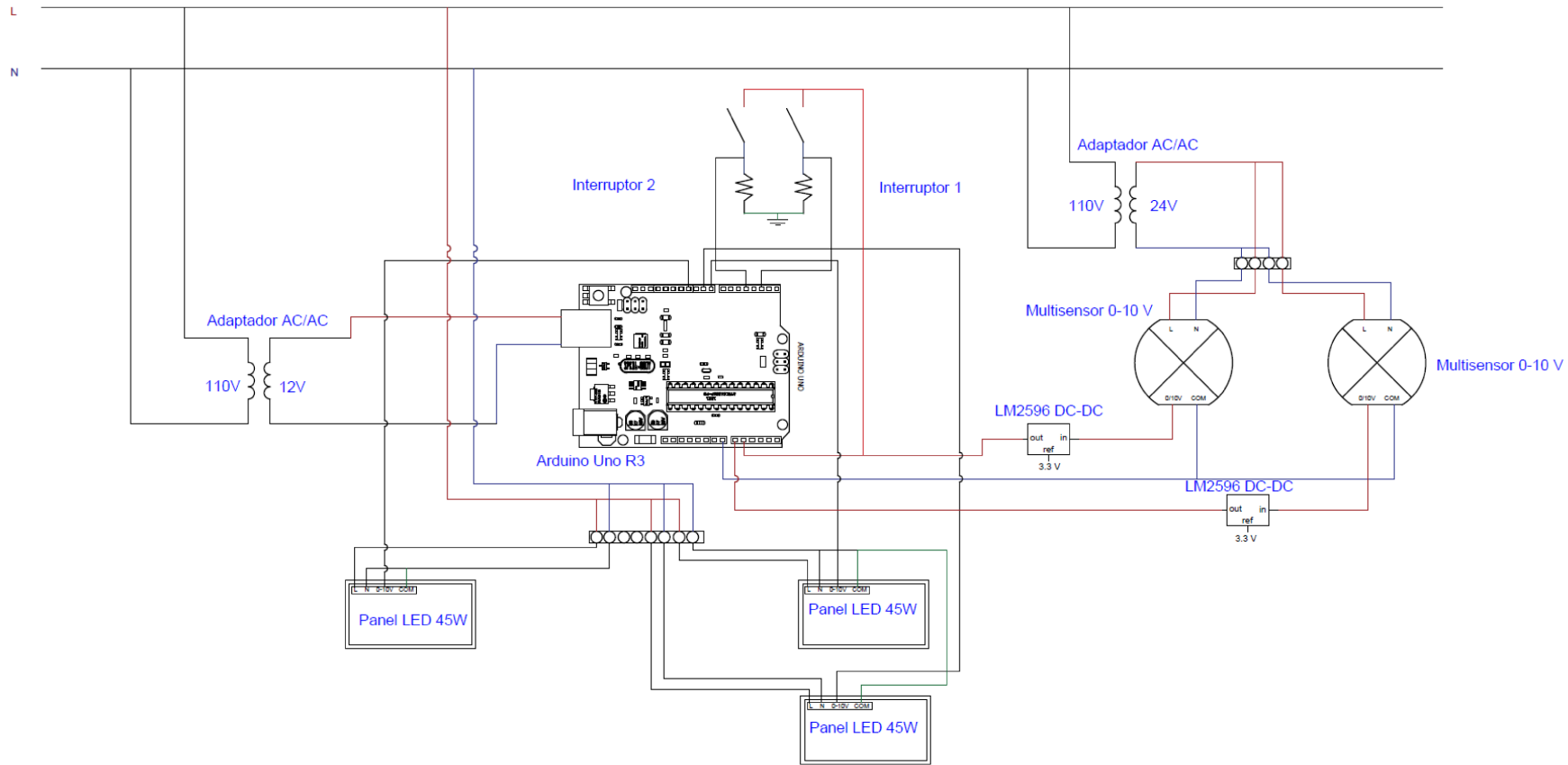


Fig. 20: Diagrama eléctrico multifilar del sistema de iluminación