



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

**SEDE CUENCA**

**CARRERA DE ELECTRICIDAD**

**EFICIENCIA DE LUMINARIAS LED CON ENERGÍA  
FOTOVOLTAICA PARA ILUMINACIÓN DE  
CICLOVÍAS Y ACERAS**

Trabajo de titulación previo a la obtención del  
título de Ingeniero Eléctrico

**AUTORES: VICTOR JOSÉ ILLARES GUARTAMBEL  
JORGE LUIS GUALPA ORTEGA**

**TUTOR: ING. FREDDY FERNANDO CAMPOVERDE ARMIJOS, MSC**

Cuenca - Ecuador

2026

## CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Nosotros, Victor José Illares Guartambel con documento de identificación N° 0105904684 y Jorge Luis Gualpa Ortega con documento de identificación N° 0302363585 manifestamos que:

Somos los autores y responsables del presente trabajo; y, autorizamos a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Cuenca, 15 de enero de 2026

Atentamente,



---

Victor José Illares Guartambel  
0105904684



---

Jorge Luis Gualpa Ortega  
0302363585

**CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL  
TRABAJO DE TITULACIÓN A  
LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

Nosotros, Victor José Illares Guartambel con documento de identificación N° 0105904684 y Jorge Luis Gualpa Ortega con documento de identificación N° 0302363585, expresamos nuestra voluntad y por medio del presente documento cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del proyecto técnico: “Eficiencia de luminarias led con energía fotovoltaica para iluminación de ciclovías y aceras”, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Eléctrico, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribimos este documento en el momento que hacemos la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, 15 de enero de 2026

Atentamente,



---

**Victor José Illares Guartambel**  
0105904684



---

**Jorge Luis Gualpa Ortega**  
0302363585

## CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Freddy Fernando Campoverde Armijos con documento de identificación N° 0102339470, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: EFICIENCIA DE LUMINARIAS LED CON ENERGÍA FOTOVOLTAICA PARA ILUMINACIÓN DE CICLOVÍAS Y ACERAS, realizado por Victor José Illares Guartambel con documento de identificación N° 0105904684 y Jorge Luis Gualpa Ortega con documento de identificación N° 0302363585, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción Proyecto técnico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, 15 de enero de 2026

Atentamente,

  
\_\_\_\_\_  
Ing. Freddy Fernando Campoverde Armijos, Msc.  
0102339470

## AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por darme la fortaleza, sabiduría y constancia para culminar esta etapa tan importante en mi vida. A mis padres, por su amor incondicional, apoyo constante y los sacrificios que hicieron posible este logro. A mis hermanos y querida hermana, por su compañía, motivación y palabras de aliento en los momentos que creía no poder seguir. Mi gratitud especial al Ingeniero Freddy Campoverde, por su valiosa guía, exigencia académica y compromiso durante todo el proceso.

Victor José Illares Guartambel

Agradezco a Dios por darme la fortaleza y sabiduría en cada paso de este camino. A mi querida madre, por su amor inmenso y su ejemplo de lucha. A mi amada esposa, por estar siempre a mi lado con paciencia, ternura y fe en mí. A mi hermana, por su apoyo incondicional y sus palabras de aliento. A mis dos hijos, que son mi mayor orgullo y la razón que me impulsa cada día. Y al Ingeniero Freddy Campoverde, por su guía firme y compromiso constante durante este proceso.

Jorge Luis Guallpa Ortega

## DEDICATORIA

Dedico este trabajo a Dios y mis padres, por su amor incondicional, por enseñarme con su ejemplo que el esfuerzo y la constancia siempre dan fruto. Agradezco su guía, sus consejos y el sacrificio que realizaron para apoyarme en cada etapa de mi formación. También dedico este logro a mi familia y compañeros que estuvieron presentes en esta etapa de mi vida , quienes con su cercanía, palabras de aliento y confianza en mí, me impulsaron a seguir adelante. Este proyecto es reflejo de todo el apoyo y afecto que me brindaron

Victor José Illares Guartambel

Este proyecto representa el cierre de una etapa significativa en mi formación académica y el inicio de nuevos desafíos profesionales. Con profunda gratitud, lo dedico a Dios, por ser mi guía constante y brindarme fortaleza en cada paso de este camino. A mi madre, por su amor incondicional, su ejemplo de perseverancia y su apoyo firme en todo momento. A mi esposa, por acompañarme con paciencia, comprensión y compromiso durante este proceso. A mis hijos, quienes son mi mayor inspiración y la motivación que impulsa cada uno de mis esfuerzos.

Jorge Luis Gualpa Ortega

## Glosario

**PWM** Pulser width modulation

**MPPT** Maximum Power Point Tracking

**AC** Alternating current

**DC** Direction current

**LED** Diodo emisor de luz

**CIE** Comisión Internacional de Iluminación

**ARCERNNR** Agencia de Regulación y Control de Energía y Recursos Naturales  
no Renovables

**RETILAP** Reglamento Técnico de Iluminación y Alumbrado Público

**INEN** Servicio Ecuatoriano de Normalización

**IESNA** Sociedad de Ingenieros de Iluminación de Norteamérica

**Luminancia** Representa la intensidad luminosa emitida o reflejada por una superficie en una dirección determinada, dividida por el área aparente proyectada desde esa dirección. Su unidad de medida es la candela

**Iluminancia** Se define como el flujo luminoso que incide sobre una superficie específica por unidad de área. Su unidad de medida es el lux

**Intensidad luminosa** Magnitud fotométrica que cuantifica el flujo luminoso emitido por una fuente de luz en una dirección específica, dentro de un ángulo sólido determinado

**Flujo luminoso** Cantidad total de energía luminosa emitida por una fuente en todas las direcciones por unidad de tiempo. Se mide en lúmenes

**Sistema fotovoltaico** Conjunto de dispositivos que convierten la ener

## RESUMEN

El presente trabajo de titulación evalúa el desempeño técnico, energético y normativo de un sistema de alumbrado público autónomo basado en luminarias LED alimentadas por energía fotovoltaica, instalado en la avenida Elia Liut, en la ciudad de Cuenca. El estudio contempla la verificación del cumplimiento de parámetros establecidos para iluminación en ciclovías y aceras, mediante mediciones fotométricas en campo, simulaciones energéticas desarrolladas en MATLAB/Simulink y análisis de percepción ciudadana.

Se definen escenarios representativos de irradiancia solar con el fin de caracterizar el comportamiento del sistema frente a distintas condiciones climáticas y estimar su nivel de autonomía operativa. Adicionalmente, se considera una programación horaria para el consumo de las luminarias, lo que permite evaluar su eficiencia en función de franjas de potencia. El enfoque metodológico integra aspectos técnicos, normativos y sociales, con el propósito de determinar la viabilidad de implementación de este tipo de sistemas en entornos urbanos. La tesis constituye una contribución aplicada al desarrollo de soluciones de alumbrado público sostenible y replicable en ciudades con características similares.

**Palabras clave:** alumbrado público autónomo, luminarias LED, sistemas fotovoltaicos, simulación energética, normativas de iluminación, percepción ciudadana.

# ABSTRACT

This thesis evaluates the technical, energy, and regulatory performance of an autonomous public lighting system based on LED luminaires powered by photovoltaic energy, installed on Elia Liut Avenue in the city of Cuenca. The study involves the verification of compliance with lighting standards for cycle paths and sidewalks through field photometric measurements, energy simulations developed in MATLAB/Simulink, and analysis of citizen perception.

Representative solar irradiance scenarios are defined to characterize the system's behavior under different climatic conditions and to estimate its level of operational autonomy. Additionally, a time-based power consumption schedule is considered for the luminaires, allowing for an assessment of system efficiency across different power operation bands. The methodological approach integrates technical, regulatory, and social aspects, aiming to determine the feasibility of implementing such systems in urban environments. This thesis constitutes an applied contribution to the development of sustainable and replicable public lighting solutions for cities with similar characteristics.

**Keywords:** autonomous public lighting, LED luminaires, photovoltaic systems, energy simulation, lighting regulations, citizen perception.

# ÍNDICE

<b>Certificado de cesión de derechos de autor</b>	<b>iii</b>
<b>Certificado de dirección del trabajo de titulación</b>	<b>iv</b>
<b>Glosario</b>	<b>vii</b>
<b>1 CONCEPTOS BÁSICOS DE ILUMINACIÓN</b>	<b>4</b>
1.1 Fundamentos de luminotecnica . . . . .	4
1.1.1 Espectro electromagnético . . . . .	4
1.1.2 Temperatura del color . . . . .	5
1.1.3 Índice de reproducción cromomática (IRC) . . . . .	6
1.1.4 Interacción de la luz con los materiales . . . . .	6
1.2 Magnitudes fotométricas . . . . .	7
1.2.1 Flujo luminoso . . . . .	7
1.2.2 Iluminancia . . . . .	7
1.2.3 Luminancia . . . . .	9
1.2.4 Intensidad luminosa . . . . .	9
1.2.5 Eficiencia luminosa . . . . .	10
1.2.6 Desviación respecto al blanco ideal (Duv) . . . . .	10
1.2.7 Coordenadas cromáticas (CIE 1976 – $u',v'$ ) . . . . .	11
1.3 Sistemas fotovoltaicos autónomos . . . . .	11
1.3.1 Radiación solar e irradiación . . . . .	11
1.3.2 Tipos de paneles solares . . . . .	12
1.3.3 Baterías . . . . .	13
1.3.4 Reguladores de carga e inversores . . . . .	15
1.3.5 Controladores MPPT . . . . .	15

1.3.6	Autonomía energética . . . . .	16
1.4	Tecnología LED para alumbrado público . . . . .	16
1.4.1	Principio de funcionamiento . . . . .	16
1.4.2	Ventajas comparativas . . . . .	17
1.4.3	Aplicaciones urbanas . . . . .	17
<b>2</b>	<b>MARCO NORMATIVO</b>	<b>19</b>
2.1	Normativa internacional . . . . .	19
2.1.1	Comisión Internacional de Iluminación (CIE 140:2019) . . . . .	19
2.1.2	Normas IESNA . . . . .	20
2.1.3	RETILAP . . . . .	21
2.2	Normativa y regulación Ecuatoriana . . . . .	22
2.2.1	Normativa ARCENRNN 007/2023 . . . . .	22
2.2.2	Regulación INEN (RTE INEN 004) . . . . .	25
2.3	Parámetros normativos para alumbrado público . . . . .	26
2.3.1	Clasificación de zonas por flujo peatonal o ciclista . . . . .	26
2.3.2	Luminancia mínima . . . . .	27
2.3.3	Luminancia promedio . . . . .	27
2.3.4	Uniformidad (U <sub>o</sub> ) . . . . .	28
2.4	Normativa aplicada a ciclovías y aceras . . . . .	28
2.4.1	Requisitos técnicos específicos . . . . .	28
<b>3</b>	<b>ANÁLISIS TÉCNICO DE LAS LUMINARIAS EN LA AVENIDA ELIA LIUT</b>	<b>30</b>
3.1	Descripción del área intervenida . . . . .	30
3.1.1	Ubicación y características físicas . . . . .	30
3.1.2	Tipo de luminarias instaladas . . . . .	31
3.2	Metodología de medición . . . . .	32
3.2.1	Instrumentación empleada . . . . .	32
3.2.2	Diseño de malla de medición . . . . .	35
3.2.3	Horarios de toma de datos . . . . .	37
3.3	Resultados fotométricos . . . . .	37

3.3.1	Iluminancia, Luminancia en cada tramo Temperatura de color, IRC y Duv en acera primer nivel . . . . .	37
3.4	Comparación de resultados . . . . .	38
3.4.1	Análisis de cumplimiento a nivel 1 . . . . .	38
3.4.2	Casos de incumplimiento y sus causas . . . . .	39
3.5	Conclusiones . . . . .	40
3.5.1	Evaluación técnica . . . . .	40
<b>4</b>	<b>SIMULACIONES</b>	<b>41</b>
4.1	Análisis de irradiación solar . . . . .	41
4.1.1	Referencia climática . . . . .	41
4.1.2	Datos compilados de la estación meteorológica de la universidad politécnica salesiana . . . . .	42
4.2	Simulación del sistema en MATLAB/Simulink . . . . .	43
4.2.1	Esquema del modelo fotovoltaico . . . . .	43
4.3	Condiciones climáticas simuladas . . . . .	48
4.4	Resultados energéticos . . . . .	59
4.4.1	Potencias generadas y consumo . . . . .	59
4.4.2	Tiempo de carga de la batería . . . . .	60
4.4.3	Niveles de autonomía . . . . .	64
<b>5</b>	<b>PERCEPCIÓN DE LOS USUARIOS</b>	<b>66</b>
5.1	Diseño y aplicación de encuestas . . . . .	66
5.1.1	Población y muestra . . . . .	66
5.1.2	Estructura del cuestionario . . . . .	67
	Encuesta sobre la Percepción de la Iluminación con Luminarias LED	
	Fotovoltaicas – Av. Elia Liut . . . . .	67
5.1.3	Proceso de levantamiento de información . . . . .	68
5.2	Análisis de resultados . . . . .	68
5.2.1	Análisis de los datos obtenidos . . . . .	68
5.2.2	comparación de las encuestas obtenidas y encuestas anteriores	73
<b>6</b>	<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>	<b>74</b>
6.1	Conclusiones generales . . . . .	74

6.2	Conclusiones por objetivo específico . . . . .	75
6.3	Recomendaciones técnicas y sociales . . . . .	76
6.4	Proyecciones futuras del sistema . . . . .	78

## ÍNDICE DE FIGURAS

1.1	Espectro de radiación de luz . . . . .	5
1.2	Espectro electromagnético . . . . .	5
1.3	Temperatura del color . . . . .	6
1.4	Índice de reproducción cromática . . . . .	6
1.5	Absorción de luz . . . . .	7
1.6	Reflexión de la luz . . . . .	7
1.7	Representación de iluminancia . . . . .	8
1.8	Representación de la luminancia . . . . .	9
1.9	Intensidad luminosa . . . . .	9
1.10	Representación del cie 1976 . . . . .	11
1.11	Irradiancia a lo largo de un día . . . . .	12
1.12	Módulo fotovoltaico . . . . .	13
1.13	Tipo de baterías . . . . .	14
1.14	Controladores de carga . . . . .	16
1.15	Diodo LED. . . . .	17
3.1	Av.Elía Liut . . . . .	30
3.2	Tramos de estudio . . . . .	31
3.3	Luminaria led . . . . .	32
3.4	Luxómetro . . . . .	33
3.5	Luminancímetro . . . . .	33
3.6	Espectrómetro OHSP-350A . . . . .	34
3.7	Cálculo para malla . . . . .	35
3.8	Malla para los puntos de medición . . . . .	36
4.1	Potencia generada de 20-5 h . . . . .	50
4.2	Potencia generada de 6-7 h . . . . .	50

4.3	Potencia generada de 8-9 h . . . . .	51
4.4	Potencia generada de 10-11 h . . . . .	51
4.5	Potencia generada de 12-13 h . . . . .	51
4.6	Potencia generada de 14-15 h . . . . .	52
4.7	Potencia generada de 16-17 h . . . . .	52
4.8	Potencia generada de 18-19 h . . . . .	52
4.9	Potencia generada de 6-7 h . . . . .	54
4.10	Potencia generada de 8-9 h . . . . .	54
4.11	Potencia generada de 10-11 h . . . . .	54
4.12	Potencia generada de 12-13 h . . . . .	55
4.13	Potencia generada de 14-15 h . . . . .	55
4.14	Potencia generada de 16-17 h . . . . .	55
4.15	Potencia generada de 18- 19 h . . . . .	56
4.16	Potencia generada de 6-7 h . . . . .	57
4.17	Potencia generada de 8-9 h . . . . .	57
4.18	Potencia generada de 10-11 h . . . . .	57
4.19	Potencia generada de 12-13 h . . . . .	58
4.20	Potencia generada de 14-15 h . . . . .	58
4.21	Potencia generada de 16-17 h . . . . .	58
4.22	Potencia generada de 18-19 h . . . . .	59

# Índice de tablas

2.1	Niveles de iluminancia . . . . .	20
2.2	Criterios de vía de tráfico móvil . . . . .	23
2.3	Criterios fotométricos para tráfico móvil . . . . .	23
2.4	<b>Parámetros de clasificación y su ponderación <math>V_{pp}</math></b> . . . . .	25
2.5	Parámetros fotométricos generales . . . . .	25
3.1	Comparación de medidas en acera y ciclovía nivel 1 . . . . .	38
3.2	Comparación de medidas en acera y ciclovía nivel 2 . . . . .	39
4.1	Perfil horario promedio de irradiación solar – Av. Elia Liut . . . . .	42
4.2	Modo de operación 1: 12h . . . . .	46
4.3	Modo de operación 1: Considerando 12h de carga . . . . .	46
4.4	Modo de operación 2: 6h . . . . .	46
4.5	Modo de operación 2: Considerando 6h de carga . . . . .	47
4.6	Perfil horario promedio de irradiación solar – Considerando radiación mínima (Mayo) . . . . .	50
4.7	Desglose horario de un día promedio - Considerando radiación prome- dio . . . . .	53
4.8	Carga generada considerando radiación máxima (noviembre) . . . . .	56
4.9	Comparación de escenarios de generación y consumo energético según irradiación . . . . .	59
4.10	Escenario 1 . . . . .	61
4.11	Escenario 2 . . . . .	61
4.12	Escenario 3 . . . . .	61
4.13	Escenario 4 . . . . .	62
4.14	Escenario 5 . . . . .	63

4.15	Escenario 6 . . . . .	63
4.16	Autonomía de la batería . . . . .	65
5.1	COMPARATIVA DE LAS ENCUESTAS REALIZADAS A LO LARGO DE LA AV. ELIA LIUT . . . . .	73

## INTRODUCCIÓN

La creciente necesidad de optimizar el consumo energético y avanzar hacia modelos de desarrollo urbano sostenible ha impulsado la implementación de tecnologías de iluminación autónoma basadas en fuentes de energía renovable. Entre estas, las luminarias LED alimentadas por sistemas fotovoltaicos se consolidan como una alternativa eficiente para espacios públicos como ciclovías y aceras, donde resulta indispensable garantizar niveles adecuados de visibilidad y seguridad sin depender de la red eléctrica convencional. El presente trabajo evalúa el desempeño técnico, energético y normativo de un sistema de alumbrado público compuesto por luminarias LED fotovoltaicas instaladas en la avenida Elia Liut, en la ciudad de Cuenca, mediante análisis fotométricos en campo, simulaciones energéticas con MATLAB/Simulink y encuestas de percepción ciudadana.

Desde un enfoque metodológico estructurado, el desarrollo de esta tesis se organiza en seis capítulos que presentan de manera progresiva los componentes técnicos, normativos y operativos del sistema de iluminación fotovoltaica evaluado. En el Capítulo 1 los fundamentos teóricos relacionados con la luminotecnica, los sistemas fotovoltaicos autónomos y la tecnología LED, constituyendo la base conceptual del estudio. El Capítulo 2 presenta un estudio del marco normativo aplicable a la iluminación de ciclovías y aceras incluyendo regulaciones internacionales y nacionales como la CIE 140:2019, IESNA RP-8, RETILAP, INEN y ARCERNNR, que definen los parámetros técnicos mínimos de cumplimiento. En el Capítulo 3, se describe el sistema de alumbrado implementado en la avenida Elia Liut y se analizan los resultados obtenidos a partir de mediciones técnicas en campo, evaluando

magnitudes fotométricas como iluminancia, luminancia, temperatura de color y eficiencia luminosa.

El Capítulo 4 desarrolla un análisis del comportamiento energético del sistema fotovoltaico, considerando su capacidad de carga y autonomía. Se incorpora una simulación en MATLAB/Simulink que modela el funcionamiento real del sistema bajo diferentes escenarios de irradiancia solar, permitiendo validar su desempeño mediante un enfoque computacional. En el Capítulo 5, se examina la percepción de los usuarios respecto a la calidad de la iluminación, mediante encuestas aplicadas a peatones y ciclistas, integrando así una dimensión cualitativa al análisis técnico. Finalmente, el Capítulo 6 presenta las conclusiones generales del estudio, el cumplimiento de los objetivos específicos y recomendaciones técnicas.

## Grupo Objetivo

El presente estudio analiza la eficiencia de luminarias LED alimentadas por sistemas fotovoltaicos en ciclovías y aceras, basado en mediciones de Iluminancia y Luminancia bajo diferentes niveles de iluminación durante la noche. Sus resultados serán de utilidad para ingenieros eléctricos, técnicos en alumbrado público, energías renovables, y urbanistas, al proporcionar información técnica clave para la planificación, diseño y regulación del alumbrado urbano sostenible. de igual manera, entidades gubernamentales como el Ministerio de Energía, municipios y empresas eléctricas podrán utilizar estos estudios como soporte técnico para la toma de decisiones orientadas a la mejora de la infraestructura urbana y el cumplimiento de normativas de eficiencia energética. Finalmente, esta investigación aportará al ámbito académico, sirviendo como referencia técnica en estudios sobre eficiencia lumínica y percepción de los usuarios en espacios públicos, fortaleciendo el conocimiento aplicado en la ingeniería eléctrica y el desarrollo urbano sostenible.

## Objetivos

### Objetivo General

Evaluar la eficiencia de luminarias LED alimentadas por sistemas fotovoltaicos instaladas en ciclovías y aceras, mediante mediciones de Iluminancia y Luminancia, análisis del efecto de la irradiancia solar sobre la capacidad de carga del sistema y estudio de la percepción de los usuarios, con el fin de determinar su desempeño técnico, conformidad normativa y autonomía energética en condiciones reales de operación

### Objetivos Específicos

1. Analizar el rendimiento de las luminarias LED instaladas en la avenida Elia Liut, alimentadas por sistemas fotovoltaicos, mediante mediciones de Iluminancia y Luminancia en condiciones operativas reales, con el fin de evaluar su desempeño técnico y verificar su cumplimiento con las normativas nacionales e internacionales de alumbrado público.

2. Evaluar el comportamiento energético del sistema fotovoltaico que alimenta las luminarias, a través de simulaciones en distintos escenarios de irradiancia solar, para determinar la potencia generada, el tiempo de carga de las baterías y su capacidad para garantizar el suministro nocturno continuo.

3. Estudiar la percepción de los usuarios sobre la iluminación mediante encuestas orientadas a valorar visibilidad, confort visual y sensación de seguridad del sistema implementado.

# CAPÍTULO 1

## CONCEPTOS BÁSICOS DE ILUMINACIÓN

### 1.1 Fundamentos de luminotecnia

La luminotecnia es la disciplina que estudia el uso técnico de la luz artificial con el objetivo de generar condiciones visuales adecuadas, eficientes y confortables para el ser humano en diferentes espacios, tanto interiores como exteriores [1]. A través de esta ciencia se consideran variables como la distribución espacial de la luz, su intensidad, color, eficiencia y el impacto que tiene en el entorno visual

#### 1.1.1 Espectro electromagnético

La luz visible forma parte del espectro electromagnético, comprendiendo longitudes de onda entre aproximadamente 380 y 780 nanómetros fig 1.2. Esta franja incluye las radiaciones perceptibles por el ojo humano y es fundamental en la luminotecnia, ya que determina la composición cromática de la iluminación [2].

Cuando la luz es separada en sus diversas longitudes de onda componentes es llamada Espectro. Si se hace pasar la luz por un prisma de vidrio transparente, produce un espectro formado por los colores fig 1.1 rojo, naranja, amarillo, verde, azul, índigo y violeta.

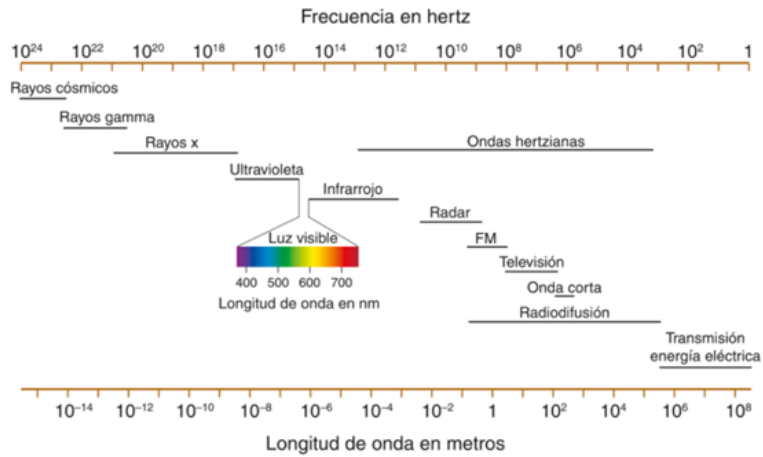


Figura 1.1: Espectro de radiación de luz

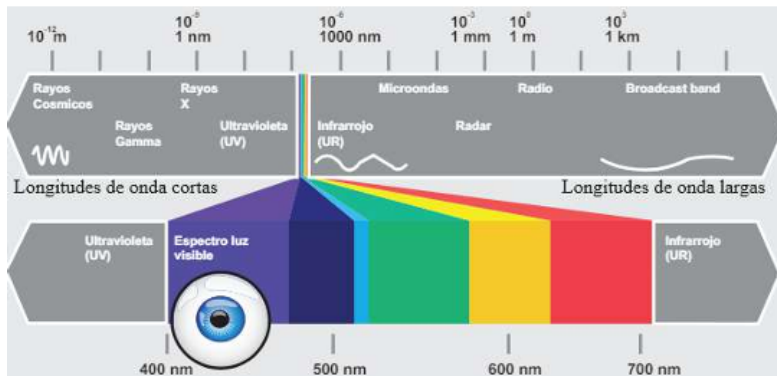


Figura 1.2: Espectro electromagnético

### 1.1.2 Temperatura del color

La temperatura de color correlacionada (CCT) indica el color aparente de una fuente de luz, medida en kelvin (K). Valores entre 2700 y 3000 K corresponden a tonos cálidos, mientras que los superiores a 5000 K son considerados fríos fig 1.3. En el alumbrado público se privilegian fuentes con temperaturas frías por su mejor rendimiento visual [2].

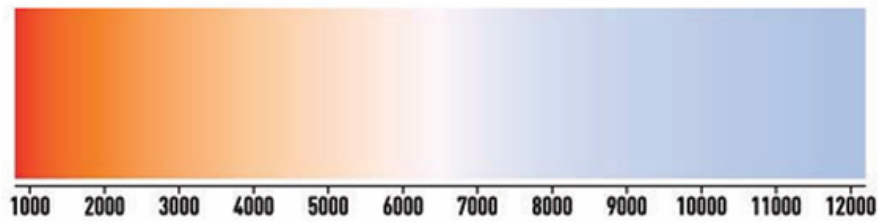


Figura 1.3: Temperatura del color

### 1.1.3 Índice de reproducción cromomática (IRC)

El IRC es un parámetro que evalúa la capacidad de una fuente luminosa para reproducir fielmente los colores de los objetos fig 1.4, en comparación con una fuente de referencia. Se expresa en una escala de 0 a 100 [2].

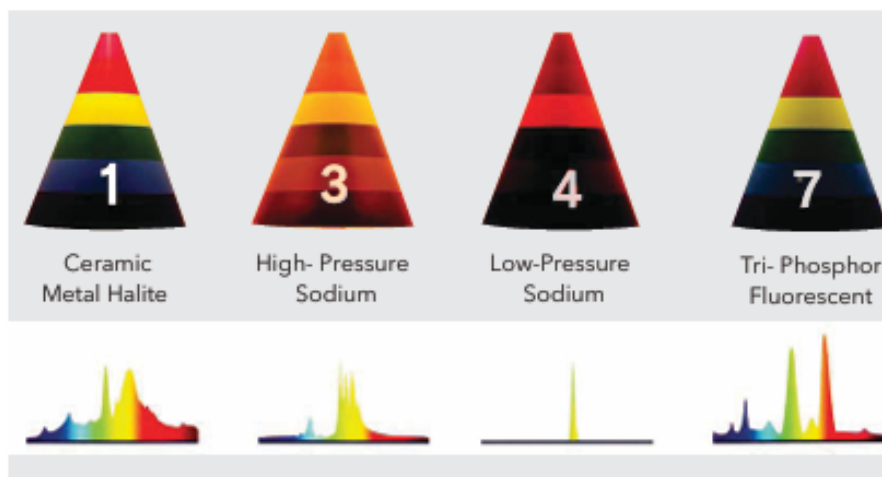
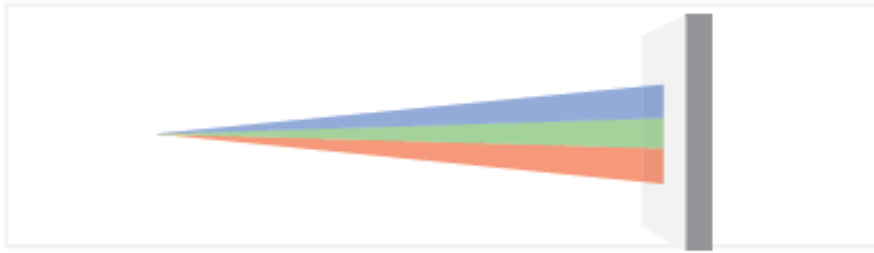


Figura 1.4: Índice de reproducción cromatica

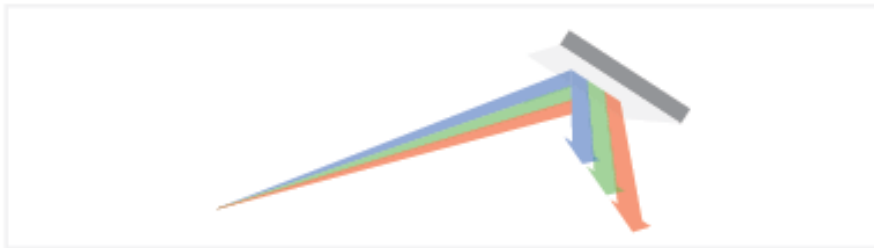
### 1.1.4 Interacciona de la luz con los materiales

Los fenómenos de reflexión, absorción y transmisión de la luz, directa o indirecta sobre las superficies influyen directamente en la percepción visual. Materiales claros reflejan más luz fig 1.6, mientras que superficies oscuras o rugosas tienden

a reducir la luminancia general del entorno fig 1.5 [2].



**Figura 1.5:** Absorción de luz



**Figura 1.6:** Reflexión de la luz

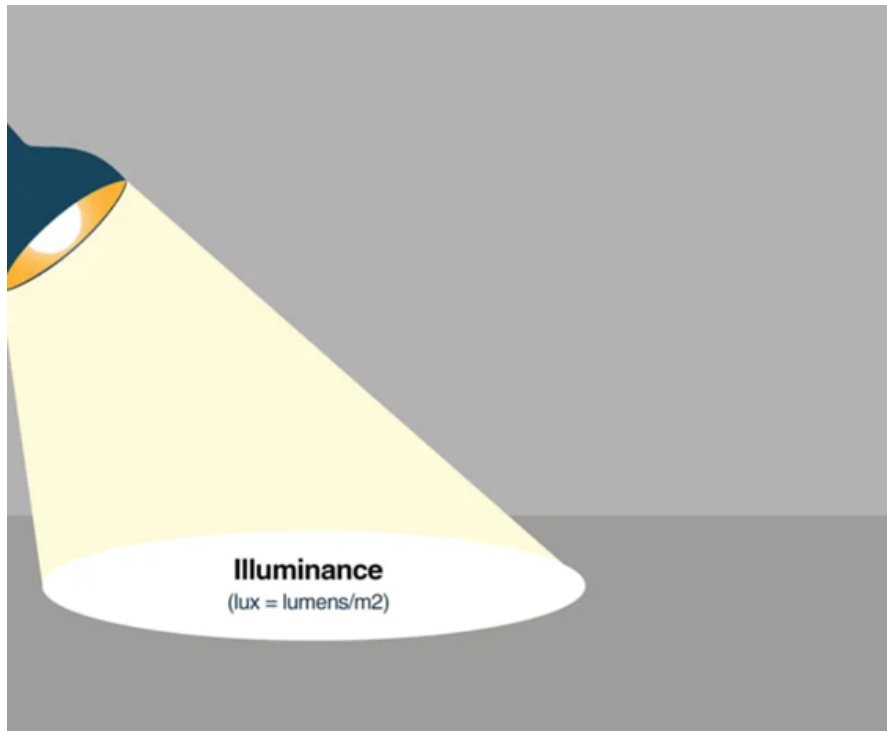
## 1.2 Magnitudes fotométricas

### 1.2.1 Flujo luminoso

Es la cantidad total de energía luminosa emitida por una fuente por unidad de tiempo, medida en lúmenes lm. Representa la potencia luminosa total de una fuente en todas las direcciones [1].

### 1.2.2 Iluminancia

Es la cantidad de flujo luminoso recibido por unidad de superficie fig 1.7, expresada en lux lx. Se mide comúnmente con luxómetros y permite establecer si la luz proporcionada es suficiente para una actividad determinada [2]. se define según la



**Figura 1.7:** Representación de iluminancia

siguiente expresión:

$$MV = \frac{dF}{dS}, \quad (1.1)$$

donde:

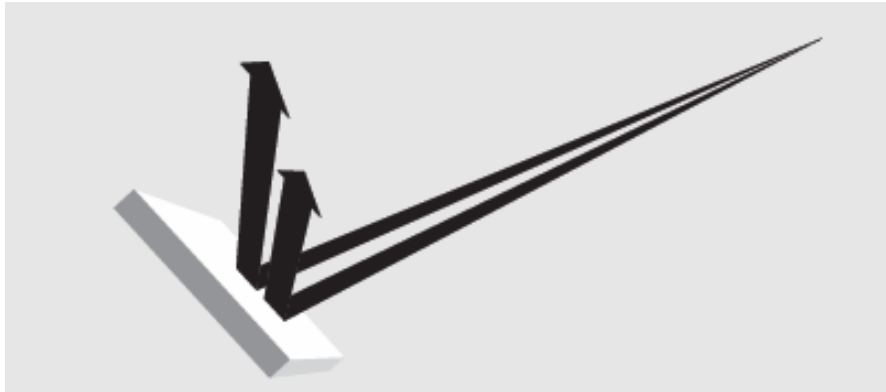
$MV$  Emitancia, medida en *lux*.

$dF$  Flujo luminoso emitido, en *lúmenes*.

$dS$  Elemento diferencial de área de emisión considerado, en *metros cuadrados*.

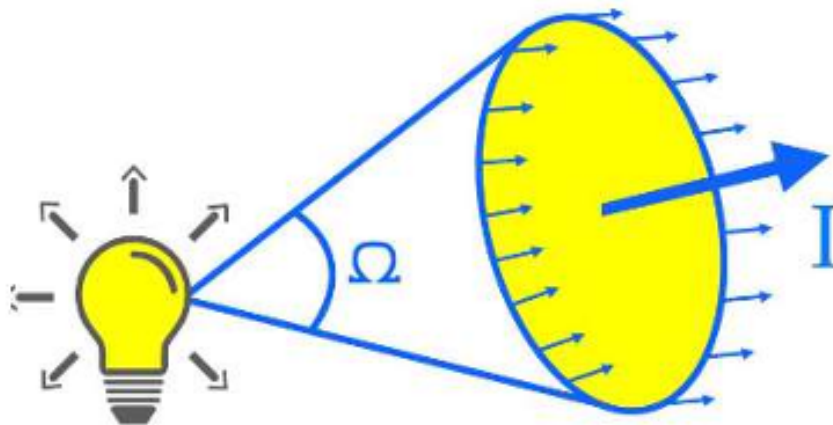
### 1.2.3 Luminancia

Representa la cantidad de luz emitida o reflejada por una superficie en una dirección específica fig 1.8. Se mide en candelas por metro cuadrado  $\text{cd}/\text{m}^2$  y se relaciona directamente con la percepción de brillo [2].



**Figura 1.8:** Representación de la luminancia

### 1.2.4 Intensidad luminosa



**Figura 1.9:** Intensidad luminosa

Corresponde al flujo luminoso emitido por unidad de ángulo sólido en una dirección dada 1.9. Se expresa en candelas  $\text{cd}$  y se emplea para caracterizar la

distribución angular de la luz [2].

### 1.2.5 Eficiencia luminosa

Es la relación entre el flujo luminoso emitido  $\Phi$  y la potencia eléctrica consumida  $P$ , expresada en lúmenes por vatio  $\text{lm/W}$ . Una mayor eficiencia implica menor consumo para una misma cantidad de luz útil [1]. Se calcula como:

$$\eta = \frac{\Phi}{P} = \frac{\text{lm}}{\text{W}}, \quad (1.2)$$

donde:

$\eta$  Eficiencia luminosa del sistema, expresada en lúmenes por vatio ( $\text{lm/W}$ ).

$\Phi$  Flujo luminoso emitido, medido en lúmenes ( $\text{lm}$ ).

$P$  Potencia eléctrica consumida por la fuente de luz, medida en vatios ( $\text{W}$ ).

### 1.2.6 Desviación respecto al blanco ideal (Duv)

El parámetro Duv representa la desviación de una fuente de luz con respecto al blanco ideal en el espacio de color. Un valor Duv cercano a cero indica una luz más neutra, mientras que valores positivos o negativos generan una sensación visual más cálida o fría, respectivamente. Este indicador es clave en estudios de percepción y calidad cromática [3].

### 1.2.7 Coordenadas cromáticas (CIE 1976 – $u',v'$ )

Este sistema define la posición cromática de una fuente de luz en un plano uniforme basado en la percepción visual fig1.10. Las coordenadas  $u'$  y  $v'$  permiten representar con precisión el color emitido y su relación con el blanco estándar, siendo fundamentales en análisis espectro fotométricos modernos [4]

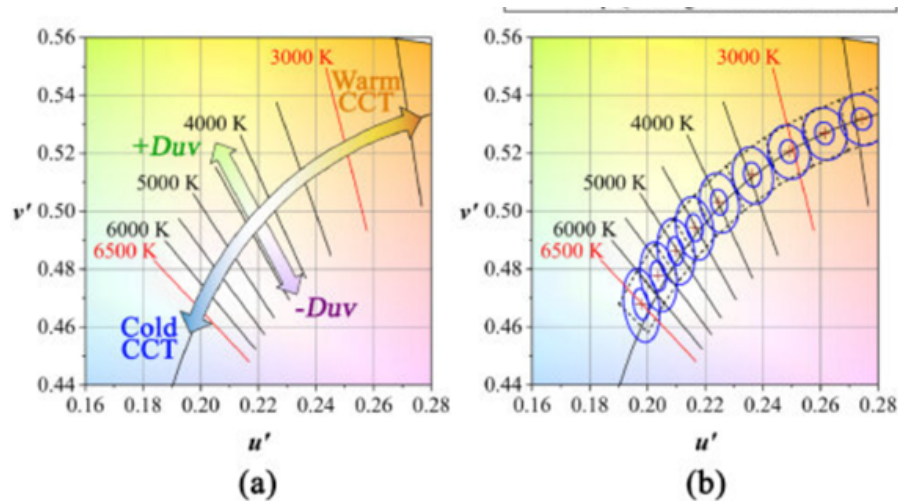


Figura 1.10: Representación del cie 1976

## 1.3 Sistemas fotovoltaicos autónomos

### 1.3.1 Radiación solar e irradiación

La irradiación solar se define como la potencia por unidad de área [ $W/m^2$ ] proveniente del sol fig 1.11 que incide sobre una superficie, siendo un parámetro clave para dimensionar sistemas fotovoltaicos. En ciudades como Cuenca, Ecuador, se estima un promedio diario de irradiación solar global entre 4.5 y 5.0  $kWh/m^2$ , lo que permite el diseño eficaz de sistemas autónomos [5].

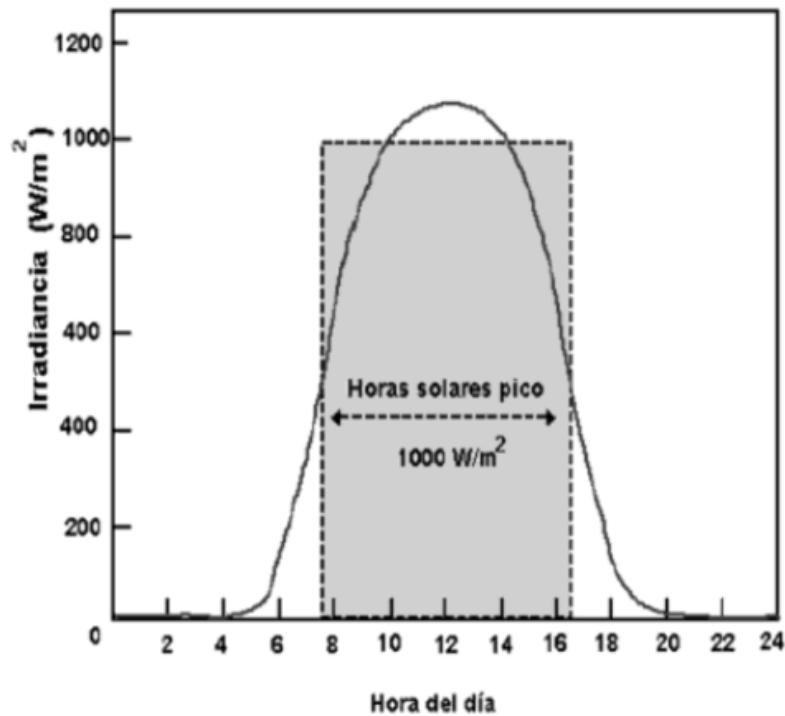
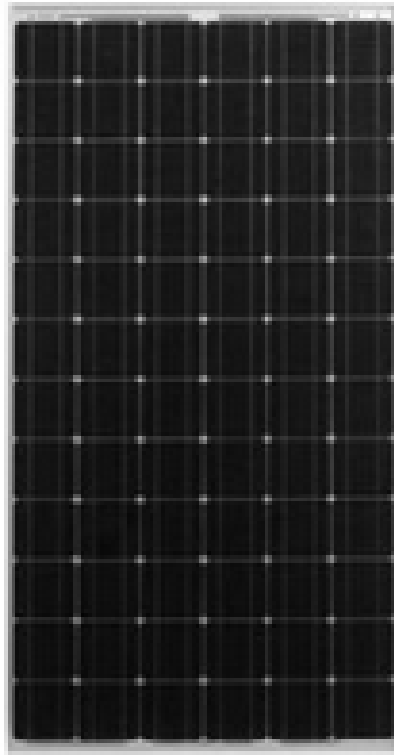


Figura 1.11: Irradiancia a lo largo de un día

### 1.3.2 Tipos de paneles solares

Denominado panel solar o módulo fotovoltaico, su principal función es la de proporcionar energía a la instalación a partir de la irradiación solar, aprovechando el efecto fotoeléctrico. Un módulo fotovoltaico está formado por la interconexión de varias células solares en serie y/o en paralelo fig 1.12, para adaptar el módulo a los niveles de tensión y corriente, puesto que cada célula puede suministrar unos 0,5 voltios. Para los módulos solares de uniones de silicio y con conexiones de células en serie, los valores de tensión por número de células rondan las 36 células para 12 voltios y las 72 células para 24 voltios [5]. Los paneles fotovoltaicos pueden ser monocristalinos, policristalinos o de capa delgada. Los primeros ofrecen mayor eficiencia y durabilidad, siendo los más adecuados para zonas urbanas con espacio limitado [5].



**Figura 1.12:** Modulo fotovoltaico

### 1.3.3 Baterías

Permiten almacenar la energía generada para garantizar el suministro nocturno. Las baterías de litio, aunque más costosas, ofrecen mayor eficiencia de carga, durabilidad y menor mantenimiento frente a las de plomo-ácido [6].

En los sistemas de iluminación autónoma basados en energía solar, las baterías constituyen un componente fundamental. Su función principal es acumular la energía eléctrica generada por los módulos fotovoltaicos durante las horas de irradiación, permitiendo alimentar las luminarias en los momentos en que no hay aporte solar, como en la noche o en días nublados. La elección adecuada de una batería fig 1.13 depende de varios factores técnicos como la profundidad de descarga, el número de ciclos, el rendimiento en distintas temperaturas y la ca-

pacidad de almacenamiento. En la práctica, se utilizan con frecuencia dos tipos de tecnologías: baterías de plomo-ácido y baterías de ion de litio. Las primeras, en sus versiones AGM y gel, son valoradas por su costo accesible y buena disponibilidad en el mercado. No obstante, presentan una vida útil limitada y una menor eficiencia de carga [5].

Por su parte, las baterías de litio se caracterizan por una mayor densidad energética, tiempos de carga reducidos y un número de ciclos considerablemente superior. Estas cualidades las hacen atractivas para proyectos que exigen continuidad operativa y bajas tareas de mantenimiento, a pesar de que su inversión inicial es más elevada. La selección de una u otra opción debe alinearse con los requerimientos de autonomía del sistema, el entorno de instalación y los objetivos de eficiencia general del proyecto [5].



**Figura 1.13:** Tipo de baterías

### 1.3.4 Reguladores de carga e inversores

Existen algunos tipos de reguladores como inversores de carga, los reguladores dispositivos electrónicos diseñados para proteger las baterías del sistema, evitando sobrecargas durante el día y descargas excesivas durante la noche. Existen dos tipos principales: los de tipo PWM que en sus siglas en inglés significa modulación por ancho de pulso, más económicos, y los MPPT que en sus siglas en inglés significa, seguimiento del punto de máxima potencia, que ajustan dinámicamente la tensión de entrada para maximizar la energía transferida desde los paneles hacia las baterías [5].

Por otro lado, los inversores permiten transformar la corriente continua DC generada por el sistema en corriente alterna AC, necesaria cuando las luminarias u otros dispositivos asociados lo requieren. Estos equipos deben dimensionarse con base en la potencia de consumo esperada y considerar márgenes de seguridad para proteger la instalación.

### 1.3.5 Controladores MPPT

Los controladores MPPT son una evolución tecnológica de los reguladores tradicionales fig 1.14.

Su principal función es adaptar las condiciones eléctricas del generador fotovoltaico para operar constantemente en el punto donde se entrega la máxima potencia posible, considerando factores como la irradiación y la temperatura. Su inclusión mejora considerablemente la eficiencia del sistema, especialmente en climas variables o con condiciones de irradiación poco estables [5].



Figura 1.14: Controladores de carga

### 1.3.6 Autonomía energética

La autonomía energética se refiere al número de horas o días que el sistema puede continuar operando sin recibir energía solar directa. Este parámetro se define en función del consumo nocturno total, la capacidad útil de las baterías y las pérdidas por conversión energética. En sistemas bien diseñados, se recomienda una autonomía mínima de 2 a 3 noches sin recarga solar para asegurar un alumbrado confiable en condiciones meteorológicas adversas [5].

## 1.4 Tecnología LED para alumbrado público

### 1.4.1 Principio de funcionamiento

Los diodos emisores de luz LED generan luz mediante un proceso de electroluminiscencia en materiales semiconductores fig 1.15. Esta tecnología permite

alta eficiencia, larga vida útil y bajo mantenimiento [7].

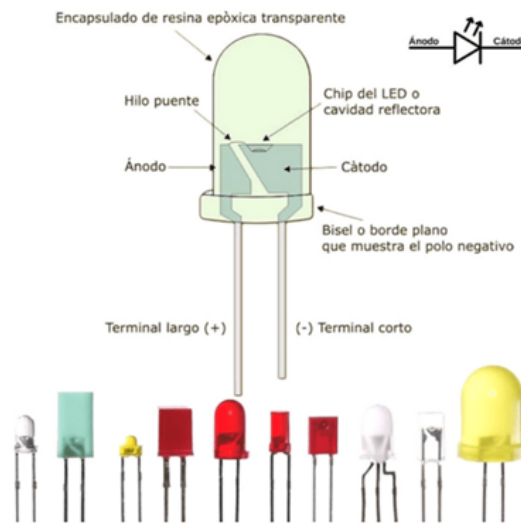


Figura 1.15: Diodo LED.

### 1.4.2 Ventajas comparativas

La tecnología LED destaca por su bajo consumo eléctrico, larga vida útil y eficiencia superior frente a fuentes convencionales. Estas luminarias no solo consumen menos energía, sino que también convierten una mayor proporción de electricidad en luz útil, reduciendo las pérdidas por calor. Además, su encendido es inmediato y funcionan adecuadamente en un amplio rango de temperaturas, lo que las hace apropiadas para instalaciones exteriores. Por su resistencia a impactos y vibraciones, resultan idóneas en contextos urbanos con alto tránsito o exposición ambiental. Estas características, junto a su bajo requerimiento de mantenimiento, optimizan su uso en alumbrado público con altos estándares de fiabilidad [1].

### 1.4.3 Aplicaciones urbanas

El uso de luminarias LED en entornos urbanos ha ganado relevancia debido a su adaptabilidad y eficacia. Son ampliamente utilizadas en aceras, ciclovías y espacios

públicos por su capacidad de proporcionar iluminación uniforme y controlada. La posibilidad de integrar esta tecnología con fuentes renovables, como los sistemas fotovoltaicos autónomos, refuerza su papel en el desarrollo de ciudades sostenibles. Al ofrecer mayor percepción de seguridad y confort visual, su implementación mejora notablemente la experiencia de los usuarios en zonas peatonales, recreativas y de movilidad no motorizada [1].

## CAPÍTULO 2

### MARCO NORMATIVO

#### 2.1 Normativa internacional

##### 2.1.1 Comisión Internacional de Iluminación (CIE 140:2019)

La normativa técnica emitida por la Comisión Internacional de Iluminación (CIE) establece que la iluminación destinada a espacios peatonales debe garantizar una iluminancia vertical adecuada a una altura de 1.5 metros, ya que este parámetro es crucial para permitir el reconocimiento facial y la detección anticipada de movimientos por parte de otros peatones o ciclistas, aspectos esenciales para la seguridad y percepción del entorno urbano [8].

Asimismo, la CIE recomienda la implementación de tecnología LED en reemplazo de las lámparas de HPS, por sus siglas en inglés *High Pressure Sodium*, debido a que la iluminación LED proporciona:

- Mejor uniformidad luminosa en el plano horizontal y vertical.
- Reducción significativa del deslumbramiento, lo cual mejora el confort visual.
- Mayor percepción de seguridad, especialmente en entornos urbanos nocturnos.

La normativa también sugiere que las luminarias para aceras y ciclovías deben instalarse a una altura entre 3 y 5 metros, con el fin de garantizar una cobertura uniforme del área peatonal sin generar sombras o puntos críticos de baja visibilidad [8].

Adicionalmente, se incluye una tabla 2.1 de referencia con los niveles mínimos de iluminancia y los factores de uniformidad requeridos, los cuales deben ser cumplidos en función del tipo de vía, uso peatonal y condiciones de flujo de usuarios, a fin de asegurar un entorno iluminado eficiente, seguro y accesible para todos [8].

Clase	Promedio [lux]	Uniformidad mínima ( $U_o$ )	Ev mínimo a 1,5 m [lux]
P1	$\geq 15$	0.4	10
P2	$\geq 10$	0.4	7
P3	$\geq 7.5$	0.4	5
P4	$\geq 5$	0.3	3
P5	$\geq 3$	0.3	1
P6	$\geq 1$	0.2	0.6

**Tabla 2.1:** Niveles de iluminancia

### 2.1.2 Normas IESNA

A nivel internacional, la norma IESNA RP-8-18, emitida por la *Illuminating Engineering Society of North America*, establece lineamientos técnicos detallados para el diseño del alumbrado en entornos urbanos, incluyendo espacios peatonales y zonas compartidas. Esta normativa pone énfasis en la importancia de reducir al mínimo la presencia de zonas de sombra, garantizando una distribución uniforme del flujo luminoso que permita una visibilidad eficaz durante el período nocturno [9].

En cuanto a los valores recomendados, la IESNA RP-8-18 sugiere una iluminancia horizontal promedio comprendida entre 5 y 20 lux, dependiendo del volumen de tránsito peatonal, el nivel de actividad y las características del entorno

urbano. Estos niveles buscan proporcionar condiciones visuales seguras y confortables, adaptadas a contextos de baja, media o alta circulación de personas [9].

Asimismo, la normativa incorpora criterios de uniformidad de iluminación, estableciendo relaciones entre la iluminancia mínima y la iluminancia promedio que pueden alcanzar un máximo de 2.5 luxes, con el objetivo de evitar contrastes abruptos y facilitar una percepción visual continua y estable. Aunque no se definen valores específicos de luminancia para estas áreas, el documento enfatiza la relevancia del confort visual, la reducción del deslumbramiento y la correcta percepción del entorno como factores clave en la seguridad, accesibilidad y experiencia del usuario [9].

### **2.1.3 RETILAP**

El Reglamento Técnico de Iluminación y Alumbrado Público RETILAP establece criterios normativos específicos orientados a asegurar condiciones óptimas de visibilidad y seguridad en entornos destinados al tránsito peatonal y ciclovías. Esta normativa define valores mínimos de iluminancia horizontal media y luminancia promedio que deben cumplirse para garantizar un entorno visualmente adecuado, particularmente durante condiciones nocturnas o de baja visibilidad. Para aceras, pasos peatonales y corredores exclusivos para bicicletas, se requiere una iluminancia horizontal media no inferior a 5 lux y una luminancia promedio mínima de  $0.5 \text{ cd/m}^2$ , con el fin de proporcionar niveles básicos de percepción visual. No obstante, en zonas consideradas críticas por su complejidad funcional o concentración de usuarios tales como intersecciones, cruces peatonales, accesos a estaciones de transporte o áreas escolares se exige una mayor intensidad lumínica. En estos casos, los valores mínimos se incrementan significativamente, alcanzando 20 lux de iluminancia horizontal y  $5 \text{ cd/m}^2$  de luminancia promedio [10]. Estas exigencias técnicas son fundamentales para mitigar riesgos asociados al desplazamiento peatonal y ciclista, optimizar la identificación de obstáculos y mejorar la respuesta visual ante situaciones de emergencia, contribuyendo así a una movilidad segura

y eficiente en el espacio público urbano [10].

## 2.2 Normativa y regulación Ecuatoriana

### 2.2.1 Normativa ARCENRNN 007/2023

"Las clases del tipo M 2.3 se estructuran en un máximo de seis etapas, determinadas

$$M = \left( 6 - \sum V_{pm} \right), \quad (2.1)$$

donde:

$M$  Clase de iluminación, cuya categoría va desde M1 la más alta, hasta M6 la más baja, según los criterios de diseño lumínico establecidos en normativas internacionales.

$\sum V_{pm}$  Sumatoria de los valores de ponderación asociados a diferentes parámetros de evaluación como entorno, velocidad, tipo de vía, entre otros.

Existen criterios a considerar para elegir cada parámetro como se indica en la tabla 2.2

El parámetro de velocidad consignado en la tabla 2.2 hace referencia al límite máximo de velocidad autorizado para la vía, conforme a lo dispuesto por la entidad competente. Por su parte, el parámetro de volumen de tráfico también presente en la Tabla 2.2 se establecerá según el tipo de vía. En carreteras, se deberá considerar la información disponible por parte del Ministerio de Transporte y Obras

Parámetros	Opciones	VpM
Velocidad	Muy alta, $V_c \geq 100$ km/h	1.0
	Alta, $70 < V_c < 100$ km/h	0.5
	Moderada, $40 < V_c \leq 70$ km/h	0.0
Volumen del tráfico	Muy alto	1.0
	Alto	0.5
	Moderado	0.0
	Bajo	-0.5
	Muy bajo	-1.0
Composición del tráfico	Mixto (no motorizado - alto porcentaje)	2.0
	Mixto	1.0
	Solo motorizado	0.0
Separación de vías	No	1.0
	Sí	0.0
Intersección (densidad)	Alta	1.0
	Moderada	0.5
	No	0.0
Estacionamiento para vehículos	Sí	1.0
	No	0.0
Iluminación ambiental	Alta	0.0
	Moderada	-0.5
	Baja	-1.0
Guías visuales	Pobre	0.5
	Moderado o bueno	0.0

**Tabla 2.2:** Criterios de vía de tráfico móvil

Públicas. En el caso de calles o avenidas ubicadas en zonas urbanas o rurales, la determinación se realizará en función de la densidad poblacional, clasificada como muy alta, alta, media, baja o muy baja [11].

Clase M	$L_{prom}$ (cd/m <sup>2</sup> )	$U_0$ mín	T %	SR mín
1	2 – 2.4		0.7	
2	1.5 – 1.8	0.4	10	
3	1 – 1.2		0.6	0.5
4	0.75 – 1			
5	0.5 – 0.75	0.35	15	0.4
6	0.3 – 0.5			

**Tabla 2.3:** Criterios fotométricos para tráfico móvil

## TRÁFICO PEATONAL

Las clases de alumbrado tipo P están diseñadas para brindar visibilidad adecuada a peatones, ciclistas y zonas adyacentes a vías vehiculares, tales como aceras, ciclovías, bermas y carriles de estacionamiento. Estas clases se categorizan de P1 a P6 tabla 2.5, definiendo sus especificaciones técnicas mediante una ecuación que considera la suma ponderada de factores relacionados con los usuarios y el entorno. La velocidad utilizada para dicha clasificación corresponde al límite máximo autorizado por la autoridad competente, asignándose categorías de velocidad baja o muy baja en ausencia de normativas o restricción vehicular, respectivamente. Además, los valores ponderados para estacionamientos e iluminación ambiental se basan en parámetros similares a los establecidos en otras tablas normativas [11].

$$P = \left(6 - \sum V_{pp}\right), \quad (2.2)$$

donde:

$P$  Clase de iluminación peatonal, cuya categoría va desde P1 la más alta hasta P6 la más baja, de acuerdo con normativas técnicas de alumbrado público.

$\sum V_{pp}$  Sumatoria de los valores de ponderación asociados a factores como el entorno, nivel de actividad peatonal, velocidad del tráfico adyacente, entre otros.

El parámetro de velocidad en la tabla 2.4 corresponde al límite máximo autorizado por la autoridad competente.

El volumen de tráfico se determina según el tipo de vía y su ubicación urbana o rural, para carreteras se usan datos del Ministerio de Transporte, y para calles y avenidas la ponderación depende de la densidad poblacional.

Parámetros	Opciones	$V_{pp}$
Velocidad [km/h]	Baja, $6 < V_c \leq 40$	1,0
	Muy baja, $V_c \leq 6$	0,0
Tráfico p-c/hora $T_{c.c}$	Muy alto, $T_{c.c} > 480$	1,0
	Alto, $300 < T_{c.c} \leq 480$	0,5
	Moderado, $121 < T_{c.c} \leq 299$	0,0
	Bajo, $60 \leq T_{c.c} \leq 120$	-0,5
	Muy bajo, $T_{c.c} < 60$	-1,0
Composición: p, c y Tv	Mixto (p, c y Tv)	2,0
	Mixto (p y Tv)	1,5
	Mixto (p y c)	1,0
	Únicamente (p, c o moderada)	0,0

Tabla 2.4: Parámetros de clasificación y su ponderación  $V_{pp}$

Clase de iluminación	Eh máx (lx)	Eh mín (lx)	Eh min (lx)	Ev (lx)	Esc (lx)
P1	18	15	3.0	5.0	3.0
P2	12	10	2.0	3.0	2.0
P3	9.0	7.5	1.5	2.5	1.5
P4	7.5	5.0	1.0	1.5	1.0
P5	5.0	3.0	0.6	1.0	0.6
P6	3.0	2.0	0.4	0.6	0.4

Tabla 2.5: Parámetros fotométricos generales

### 2.2.2 Regulación INEN (RTE INEN 004)

Según la norma ecuatoriana INEN 004, en su sección 9.4.3 se aborda la iluminación para ciclovías y aceras. Esta norma proporciona recomendaciones sobre la distancia a la que deben colocarse las luminarias, de acuerdo con la posición del ciclista [4]. La normativa sugiere instalar una luminaria a 50 metros de distancia antes de un cruce, para que los conductores de automóviles tengan una visibilidad clara de la posible presencia de ciclistas en la vía [12].

Para la instalación de un sistema de iluminación exclusivo para ciclo vías, se recomienda que las luminarias se coloquen a una altura de entre 4 y 5 metros [12]. La distancia entre postes o farolas debe establecerse entre 20 y 40 metros, ajustándose a las características del entorno de la ciclo vía. En áreas con edificaciones

consolidadas, como zonas residenciales, la separación óptima es de aproximadamente 20 metros; en contraste, en zonas no edificadas, esta distancia debe variar entre 30 metros en áreas arboladas y 40 metros en espacios abiertos [12].

Durante los estudios de diseño de ciclovías, es crucial realizar un análisis exhaustivo sobre la incorporación de un sistema de iluminación adecuado, asegurando la viabilidad del uso nocturno y, por ende, las condiciones de seguridad necesarias para los ciclistas [12].

## **2.3 Parámetros normativos para alumbrado público**

### **2.3.1 Clasificación de zonas por flujo peatonal o ciclista**

Existe una clasificación específica para las zonas peatonales y las aceras, la cual varía en función del flujo peatonal y del tipo de infraestructura. Esta clasificación se establece en rangos del 1 al 6, considerando criterios como la intensidad del tránsito de personas y las condiciones constructivas del entorno. Uno de los factores determinantes en esta categorización es el nivel de difusión lumínica presente en la vía. En el caso particular de la calle Elia Liut, esta se identifica como un espacio destinado principalmente al tránsito de ciclistas, donde se alcanzan velocidades superiores a 25 km/h. El flujo de tráfico se considera mixto y de intensidad moderada, influenciado por la cercanía a zonas de actividad comercial e industrial. Cabe destacar que no se dispone de áreas de estacionamiento vehicular en el tramo comprendido entre la Calle Vieja y la Avenida Ramírez Dávalos, y que las condiciones de iluminación ambiental en dicho sector son bajas [13].

### **2.3.2 Luminancia mínima**

Conforme a lo dispuesto en la Regulación ARCERNNR-007/23, para luminarias con distribución fotométrica Tipo I, se establece como criterio técnico una relación mínima de utilización del flujo luminoso del 0,5 lm en sistemas de alumbrado público destinados a ciclovías, aceras y parques. Esta relación representa la proporción del flujo luminoso efectivamente aprovechado en la zona útil respecto al total emitido por la luminaria. En contraste, para aplicaciones en túneles, pasos deprimidos y sistemas de semaforización, se permite una relación de utilización del flujo luminoso menor o igual a 1, en atención a los requerimientos particulares de seguridad visual, continuidad luminosa y uniformidad en condiciones de conducción específicas [11].

### **2.3.3 Luminancia promedio**

Conforme a lo establecido en la tabla 2.3 de los criterios fotométricos aplicables al tránsito peatonal en aceras, el nivel de iluminancia requerido debe ser definido en función de la intensidad del flujo de usuarios. Este criterio contempla un rango de iluminancia horizontal promedio que oscila entre 0.6 lux y 2.2 lux, el cual se ajusta de acuerdo con el nivel de afluencia peatonal en el entorno evaluado. Valores cercanos al límite inferior de 0.6 lux se consideran adecuados para zonas con bajo tránsito, como senderos residenciales o parques poco concurridos, mientras que los valores más altos de hasta 2.2 lux, son requeridos en áreas con elevada actividad peatonal, como zonas comerciales, estaciones de transporte público o centros urbanos. Esta metodología garantiza condiciones adecuadas de visibilidad, seguridad y confort para los usuarios, en concordancia con los principios de diseño del alumbrado público eficiente [11].

### 2.3.4 Uniformidad (Uo)

El factor de uniformidad longitudinal de luminancia FUL, con un valor de 0.70, indica que la luminancia más baja registrada a lo largo del eje longitudinal del andén o acera representa al menos el 70% de la luminancia promedio en ese eje. Este valor se considera alto, lo que implica una buena homogeneidad visual en el trayecto peatona [11].

## 2.4 Normativa aplicada a ciclovías y aceras

### 2.4.1 Requisitos técnicos específicos

Uno de los requisitos técnicos fundamentales para el diseño de alumbrado en andenes es el cumplimiento de un factor de uniformidad longitudinal UL igual o superior a 0.70 m. Este parámetro garantiza una iluminación homogénea a lo largo del eje de circulación peatonal, lo cual mejora significativamente la visibilidad continua y permite un tránsito seguro, sin la presencia de zonas sorpresivamente de sombra o deslumbramiento. Además, una alta uniformidad longitudinal incrementa la percepción de seguridad, ya que elimina contrastes visuales abruptos que podrían generar inseguridad o desconcierto. También optimiza el confort visual, al proporcionar una experiencia luminosa estable que reduce la fatiga ocular y favorece la detección temprana de obstáculos, contribuyendo así a la accesibilidad y a la seguridad de los peatones. Para verificar este cumplimiento, se debe realizar el cálculo del factor de uniformidad longitudinal utilizando la siguiente ecuación:

$$FUL = \frac{L_{\min}}{L_{\max}} \geq 0.70 \quad (2.3)$$

donde:

*FUL* Factor de uniformidad de la luminancia.

$L_{\min}$  Luminancia mínima registrada en el área evaluada, en candelas por metro cuadrado  $cd/m^2$ .

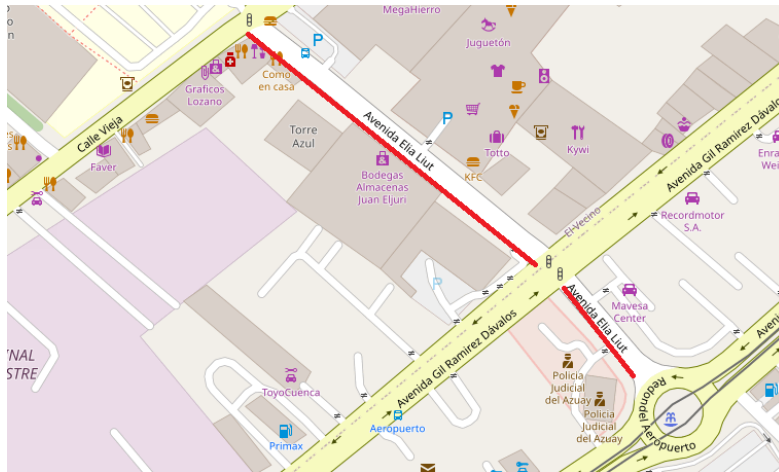
$L_{\max}$  Luminancia máxima registrada en el área evaluada, en candelas por metro cuadrado  $cd/m^2$ .

## CAPÍTULO 3

# ANÁLISIS TÉCNICO DE LAS LUMINARIAS EN LA AVENIDA ELIA LIUT

### 3.1 Descripción del área intervenida

#### 3.1.1 Ubicación y características físicas



**Figura 3.1:** Av.Elía Liut

El estudio de la avenida Elia Liut fig 3.1 se compone de dos tramos. El tramo 1 abarca desde la avenida Gil Ramírez Dávalos hasta el redondel del aeropuerto, mientras que el tramo 2 se extiende desde la calle Vieja hasta la avenida Gil

Ramírez Dávalos, tal como se muestra en la Fig 3.2. A lo largo de toda la avenida Elia Liut se han instalado 15 luminarias LED fotovoltaicas, cada una con una potencia de 60 W y una temperatura de color de 5000 K. Estas luminarias están distribuidas de la siguiente manera: 4 unidades en el Tramo 1 y 11 unidades en el tramo 2.



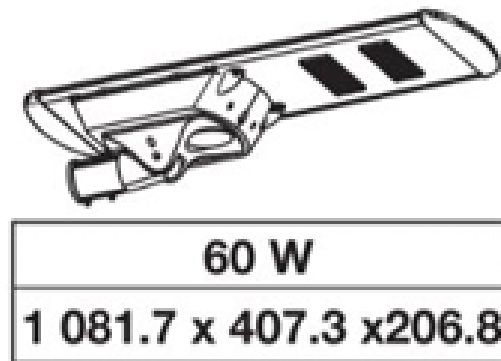
**Figura 3.2:** Tramos de estudio

Adicional a esto las luminarias cuentan con niveles de iluminación de atenúan durante la noche.

### 3.1.2 Tipo de luminarias instaladas

La luminaria instalada en la avenida Elia Liut corresponde a un sistema de iluminación LED fotovoltaica de 60 W, tal como se muestra en la Fig 3.3. Estas luminarias, pertenecientes a la marca LEDVANCE, proporcionan un flujo luminoso de 11.100 lúmenes. Se trata de una solución eficiente y sostenible que opera con una tensión nominal de 18 V DC, alcanzando una eficiencia luminosa de 185 lm/W. Estas luminarias presentan una temperatura de color de 4.000 K o 5.000 K, adecuada para espacios urbanos, y cuentan con un ángulo de apertura de 150°, lo que permite una distribución homogénea de la luz sobre la vía. Entre otras características destacadas se encuentran su índice de protección IP68, lo que las

hace resistentes al polvo y al agua, así como su resistencia a impactos mecánicos con clasificación IK08. Además, incorporan una batería de fosfato de litio y hierro  $\text{LiFePO}_4$  con capacidad de 18 Ah y vida útil superior a 2.000 ciclos, lo que asegura su autonomía nocturna. Estos datos técnicos han sido extraídos de la ficha proporcionada por el fabricante, seleccionando los más relevantes para el análisis funcional de la instalación.



**Figura 3.3:** Luminaria led

## 3.2 Metodología de medición

### 3.2.1 Instrumentación empleada

- LUXÓMETRO

Este equipo fig 3.4 es un instrumento diseñado para cuantificar el nivel de iluminancia en una superficie, expresado en lux lx. Integra un sensor fotodetector y un sistema de adquisición de datos que permite registrar y almacenar las mediciones realizadas. Estos datos pueden ser transferidos a un computador para su posterior análisis. Actualmente, el mercado ofrece una amplia gama de modelos de luxómetros, que varían en precisión, capacidad de almacenamiento y funcionalidades adicionales según su aplicación específica [14].



**Figura 3.4:** Luxómetro

- LUMINANCÍMETRO



**Figura 3.5:** Luminancímetro

El instrumento de medición fig. 3.5 utilizado para cuantificar la luminancia,

que es la cantidad de luz emitida, reflejada o transmitida por una superficie en una dirección específica, expresada en candelas por metro cuadrado ( $\text{cd}/\text{m}^2$ ). Este dispositivo emplea sensores fotosensibles calibrados para captar la intensidad luminosa en una zona puntual, permitiendo evaluar el brillo percibido por el observador según la dirección de medición [15].

- ESPECTRÓMETRO OHSP-350A

Es un instrumento portátil que mide la distribución espectral de la irradiancia luminosa fig 3.6, permitiendo evaluar la intensidad de la luz en función de la longitud de onda. Además, determina parámetros cromáticos como la temperatura de color correlacionada CCT, el índice de reproducción cromática CRI y las coordenadas cromáticas CIE, siendo fundamental para el análisis y control de calidad de fuentes de luz en aplicaciones científicas e industriales [16].



**Figura 3.6:** Espectrómetro OHSP-350A

### 3.2.2 Diseño de malla de medición

Conforme a la toma de mediciones realizadas en la calle Elia Liut, específicamente en los tramos correspondientes a ciclovías y aceras, se tomó como referencia la metodología planteada en la tesis titulada “Análisis de la eficiencia del sistema fotovoltaico para alumbrado público, aplicado a la calle Elia Liut entre Av. España y calle Vieja” [13]. Esta investigación establece una guía técnica clara para la evaluación del rendimiento del sistema de alumbrado en espacios peatonales y de movilidad alternativa, como es el caso de las ciclovías. Dentro del documento se detallan los parámetros técnicos necesarios para la correcta toma de mediciones, entre ellos la definición de puntos de muestreo a lo largo de la vía, considerando distancias equidistantes que permitan evaluar de forma representativa la uniformidad de la iluminancia. Asimismo, se especifica la altura de medición recomendada de 1,5 metros sobre el nivel del suelo para evaluar la iluminancia vertical, en cumplimiento con las recomendaciones de la CIE, orientadas a garantizar la visibilidad y seguridad de peatones y ciclistas durante las horas nocturnas. Estas directrices fueron aplicadas en la presente toma de datos, lo cual permitió asegurar la coherencia metodológica con estudios previos y facilitar la comparación de resultados. La disposición espacial de los puntos de medición utilizados puede observarse en la Fig. 3.7.

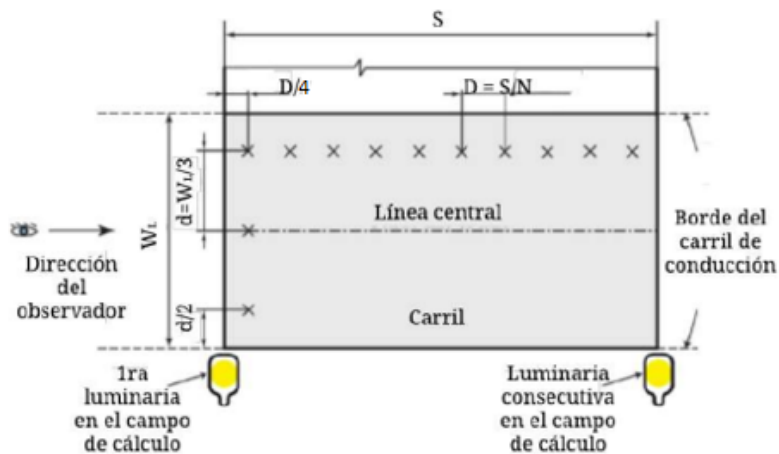


Figura 3.7: Cálculo para malla



previamente, con la diferencia de que se considera un ancho distinto, propio de este tipo de vía. Asimismo, a lo largo de la ciclovía se establecen 10 puntos de cálculo distribuidos longitudinalmente. En cuanto al ancho, también se definen puntos específicos de evaluación, de acuerdo con los criterios técnicos establecidos para este tipo de análisis. Al ser un ancho muy pequeño se tiene que se traza los bordes del extremo a 0,55 m. Estos datos se pueden comprobar en la Fig. 3.8 que corresponde a las grillas de tomas datos.

### **3.2.3 Horarios de toma de datos**

Las mediciones se realizaron durante cinco días, en los cuales se repitieron dos veces las mismas evaluaciones. La primera ronda de mediciones se llevó a cabo los días 20, 21 y 22 de mayo del presente año, abarcando la etapa en la que las luminarias operan a su máxima potencia, específicamente en el horario de 18:30 a 21:45, aproximadamente. Durante este periodo, se registraron variaciones en el nivel de iluminación, por lo que se realizaron mediciones tanto de luminancia como de iluminancia.

## **3.3 Resultados fotométricos**

### **3.3.1 Iluminancia, Luminancia en cada tramo Temperatura de color, IRC y Duv en acera primer nivel**

Estos datos y la medición tomada tanto en la acera como en la ciclovía se encuentran dentro de los anexos

### 3.4 Comparación de resultados

#### 3.4.1 Análisis de cumplimiento a nivel 1

Acera				Ciclovía			
Tramo	(lm)	Lum (cd/m <sup>2</sup> )	Ilum (lx)	Tramo	(lm)	Lum (cd/m <sup>2</sup> )	Ilum (lx)
1.1	1,709	2,671	56,421	1.1	1,809	2,938	65,509
1.2	1,373	1,800	45,917	1.2	1,646	2,235	57,191
1.3	1,291	1,399	35,343	1.3	1,386	1,817	44,955
2.1	1,025	1,581	26,754	2.1	0,728	1,643	48,145
2.2	1,282	1,339	45,708	2.2	1,423	1,866	48,145
2.3	1,245	1,718	31,046	2.3	1,745	2,573	48,627
2.4	1,259	2,405	43,408	2.4	0,970	1,998	37,282
2.5	1,610	4,021	51,862	2.5	1,585	3,177	50,600
2.6	1,222	2,522	34,885	2.6	1,184	2,253	40,591
2.7	1,288	3,319	38,846	2.7	1,079	2,310	36,545
2.8	1,545	3,945	45,562	2.8	1,217	2,670	37,073
2.9	1,093	3,375	35,415	2.9	0,749	2,050	26,973
2.10	1,499	4,226	50,392	2.10	1,080	2,892	43,282

**Tabla 3.1:** Comparación de medidas en acera y ciclovía nivel 1

Como se puede observar dentro de la tabla 3.1 se cumple con las normativas nacionales ARCERNNR-007/23 e internacionales RETILAP y CIE porque los valores de luminancia promedio en aceras y ciclovías superan el mínimo exigido de 1,5cd/m<sup>2</sup>. En aceras, la luminancia varía entre 1,2 y 4,2 cd/m<sup>2</sup>, y en ciclovías entre 0,7 y 2,8 cd/m<sup>2</sup>, siendo la mayoría de los tramos superiores al valor de referencia. Además, la iluminancia en lux registrada en ambos casos oscila entre 26 y 65 lux, lo que está dentro del rango recomendado para espacios peatonales y de tránsito ligero generalmente entre 20 y 50 lux. Esto garantiza una visibilidad adecuada para peatones y ciclistas, mejorando la seguridad y el confort visual.

### 3.4.2 Casos de incumplimiento y sus causas

Al tener los datos promediados como se observa en tabla 3.2 no cumple completamente con los requisitos establecidos en normativas como el RETILAP y la ARCERNNR-007/23, principalmente debido a que varios tramos presentan niveles de iluminancia por debajo del mínimo recomendado. Para espacios peatonales y ciclovías, se recomienda una iluminancia promedio de al menos 20 lux para garantizar una visibilidad adecuada y la seguridad de los usuarios.

Acera				Ciclovía			
Tramo	(lm)	Lum (cd/m <sup>2</sup> )	Ilum (lx)	Tramo	(lm)	Lum (cd/m <sup>2</sup> )	Ilum (lx)
1.1	0.491	2.002	45.150	1.1	0.475	2.014	51.518
1.2	0.799	1.619	34.929	1.2	0.985	2.085	45.700
1.3	0.695	1.308	26.721	1.3	0.960	1.664	36.745
2.1	0.497	1.244	17.608	2.1	0.475	1.203	17.118
2.2	0.760	1.185	32.108	2.2	0.985	1.892	32.082
2.3	0.695	1.505	24.877	2.3	0.960	1.791	33.209
2.4	0.533	1.738	19.885	2.4	0.448	1.365	20.773
2.5	0.866	2.730	30.108	2.5	0.955	2.403	58.300
2.6	0.528	1.608	19.969	2.6	0.562	1.653	22.918
2.7	0.563	1.801	19.700	2.7	0.497	1.375	20.836
2.8	0.846	2.451	31.138	2.8	0.791	1.375	25.245
2.9	0.535	2.595	28.577	2.9	0.369	1.620	29.682
2.10	0.858	2.214	19.323	2.10	0.764	1.244	16.827

**Tabla 3.2:** Comparación de medidas en acera y ciclovía nivel 2

Sin embargo, en la tabla 3.2 se observan valores por debajo de este umbral, como en las aceras del tramo 2.5 con 19,960 lux o ciclovías del tramo 2.10 con 16,874lux, lo que representa un posible incumplimiento normativo. En cuanto a la luminancia, aunque algunos tramos superan el valor mínimo de 1,5cd/m<sup>2</sup>, varios se mantienen por debajo, especialmente en las aceras, donde los valores más bajos oscilan entre 1,2 y 1,3cd/m<sup>2</sup>. Esto puede afectar la capacidad de los usuarios para percibir correctamente su entorno, reduciendo la seguridad en condiciones nocturnas. Por lo tanto, el sistema de iluminación del Nivel 2 necesita ajustes, como el

incremento del flujo luminoso o la redistribución de luminarias, para asegurar el cumplimiento técnico con las normativas vigentes y garantizar condiciones óptimas de visibilidad para peatones y ciclistas.

## **3.5 Conclusiones**

### **3.5.1 Evaluación técnica**

El sistema de alumbrado instalado en aceras y ciclovías opera en dos niveles de potencia: un primer nivel al 100% de flujo luminoso y un segundo nivel reducido, lo que requiere una evaluación diferenciada. En el nivel 1, los valores de luminancia e iluminancia cumplen con lo establecido por normativas como RETILAP y ARCERNNR-007/23. La luminancia en aceras y ciclovías supera el mínimo recomendado de  $1,5\text{cd/m}^2$ , y la iluminancia se mantiene en la mayoría de los tramos por encima de los 30 lux, garantizando seguridad visual, reconocimiento de rostros y confort para peatones y ciclistas. Esto indica que, en condiciones de máxima potencia, el sistema de iluminación es adecuado y está bien diseñado. Sin embargo, en el nivel 2, cuando las luminarias operan con menor intensidad, se observan tramos con luminancia e iluminancia por debajo de los valores mínimos requeridos. Por ejemplo, en algunos sectores se registran iluminancias menores a 20 lux y luminancias por debajo de  $1,5\text{cd/m}^2$ , lo que representa un posible incumplimiento normativo y puede afectar la seguridad nocturna.

## CAPÍTULO 4

### SIMULACIONES

#### 4.1 Análisis de irradiación solar

##### 4.1.1 Referencia climática

Para el análisis y evaluación energética de la batería del sistema fotovoltaico autónomo implementado en la iluminación de aceras y ciclovías de la av. Elia Liut en la ciudad de Cuenca, se utilizaron datos históricos de irradiación obtenidos de la estación meteorológica de la Universidad Politécnica Salesiana. Esta fuente ofrece registros horarios continuos de radiación solar a lo largo del año, lo que la convierte en una herramienta confiable y representativa para el análisis del clima local.

El uso de datos reales a largo plazo permite caracterizar de manera precisa las condiciones operativas del sistema. A partir de estos registros que nos ayudan como base de datos, se extrajeron los promedios horarios mensuales de irradiación correspondientes a la zona de estudio, generando un perfil representativo del comportamiento solar a lo largo del año. Esta información fue sistematizada en el archivo titulado "RADIACIÓN\_UPS\_DATOS\_COMPLETO.xlsx", que constituye la base del análisis energético desarrollado en este capítulo.

### 4.1.2 Datos compilados de la estación meteorológica de la universidad politécnica salesiana

Los registros procesados están expresados en Wh/m<sup>2</sup> por hora, lo que permite calcular la irradiación diaria total promedio para cada mes. Esta base de datos fue utilizada para establecer tres escenarios de operación representativos, los cuales permiten evaluar la variabilidad estacional del sistema:

- Escenario 1: Irradiación mínima, mes de mayo con 4048,1 Wh/m<sup>2</sup>
- Escenario 2: Promedio anual con 4668,2 Wh/m<sup>2</sup>
- Escenario 3: Irradiación máxima registrada en el mes de noviembre con 5610,7 Wh/m<sup>2</sup>

Hora	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Prom.	Largo	Ancho	A Panel
0:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1.081	0.407	0.44
1:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1.081	0.407	0.44
2:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1.081	0.407	0.44
3:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1.081	0.407	0.44
4:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1.081	0.407	0.44
5:00	0	0	0	0	0	0	0	0.161	0	0	0.067	0	0.019	1.081	0.407	0.44
6:00	0	0	0	0	15.129	12.8	8.903	15.484	18.867	38.677	47.433	29.5	15.566	1.081	0.407	0.44
7:00	14.258	11.964	10	15.833	97.774	101.345	89.613	128.935	122.667	164.581	189.267	148.125	91.197	1.081	0.407	0.44
8:00	109.29	125.214	90.323	99.367	237.484	273	239.161	289.323	307.9	332.677	401.767	375.75	240.105	1.081	0.407	0.44
9:00	299.387	306.571	247.161	281	393.097	450.767	410.29	449.516	495.333	545.29	638.4	539	421.318	1.081	0.407	0.44
10:00	513.613	513.536	433.742	484.767	542.806	603.1	500.29	645.355	596.333	663.258	765.267	550.375	567.703	1.081	0.407	0.44
11:00	649.484	678.964	638.742	647.033	625.516	699.433	571.129	709.968	590.1	671.613	789.5	556	652.29	1.081	0.407	0.44
12:00	737.484	756.679	656.677	612.367	627.806	698.367	554.129	616.968	603.433	700.419	828.367	619.286	667.665	1.081	0.407	0.44
13:00	721.387	763.714	606.677	662.167	524.419	437.767	450.129	618.258	514.967	647.097	668.233	634.571	604.116	1.081	0.407	0.44
14:00	679.129	654.286	554.387	575.833	445.226	545.067	496.419	565.387	493.667	540.903	564.033	677.143	565.957	1.081	0.407	0.44
15:00	537.419	521.75	434.871	491.833	318.032	455.733	395.871	382.161	372.533	359.452	406.333	395	422.582	1.081	0.407	0.44
16:00	373.258	339.964	265.065	387.767	162.258	235.5	243.871	208.613	241.433	190.742	227.533	240.143	259.679	1.081	0.407	0.44
17:00	230.29	224.071	187.065	231.133	56.839	74.567	86.323	76.71	82.4	52.774	82.1	72.714	121.415	1.081	0.407	0.44
18:00	117.194	118.036	97.387	70.467	1.71	2.733	4.161	4.355	2.8	1.129	2.4	3.429	35.483	1.081	0.407	0.44
19:00	12.767	13.393	7.226	3.167	0	0	0	0	0	0.032	0	0.143	3.061	1.081	0.407	0.44
20:00	0.033	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.003	1.081	0.407	0.44
21:00	0.067	0	0	0	0	0	0	0	0	0.032	0	0	0.008	1.081	0.407	0.44
22:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1.081	0.407	0.44
23:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1.081	0.407	0.44
SUM	4995.06	5028.14	4229.32	4562.73	4048.1	4590.18	4050.29	4711.19	4442.43	4908.68	5610.7	4841.18	4668	26		

**Tabla 4.1:** Perfil horario promedio de irradiación solar – Av. Elia Liut

La tabla 4.1 presenta el perfil horario promedio de irradiación para la ubicación estudiada, elaborado a partir de la información validada por la estación meteorológica mencionada.

La selección de estos escenarios permite evaluar la variabilidad en la carga de la batería y el comportamiento energético del sistema fotovoltaico. Esta estrategia

facilita la determinación del desempeño real del sistema bajo condiciones climáticas típicas, críticas y favorables. Además, el uso de estos datos en la simulación computacional optimiza la evaluación técnica de la capacidad de carga de la batería y la autonomía energética a lo largo de los distintos meses del año.

## **4.2 Simulación del sistema en MATLAB/Simulink**

### **4.2.1 Esquema del modelo fotovoltaico**

Con el objetivo de analizar el comportamiento energético del sistema fotovoltaico autónomo empleado en la iluminación de la Av. Elia Liut, se desarrolló un modelo computacional en MATLAB/Simulink utilizando la biblioteca Simscape Electrical. Este modelo reproduce el funcionamiento diario del sistema bajo condiciones de irradiación variables, representando fielmente la operación real en tres escenarios solares previamente definidos.

La estructura del modelo se diseñó tomando como referencia metodológica la tesis de Ajila Chuchuca y Loaiza Mora [13], adaptando su configuración al contexto específico del presente estudio. El objetivo principal de esta simulación es evaluar el comportamiento dinámico del sistema en cuanto a generación, almacenamiento y consumo energético.

#### **Subsistemas del modelo**

##### **Generación fotovoltaica**

La fuente de irradiación solar fue implementada mediante un bloque tipo Switch con múltiples entradas que permiten simular perfiles horarios desde las 00:00 h hasta las 23:59 h, con intervalos de dos horas. Estos datos fueron extraídos de la estación meteorológica de la UPS y representan condiciones promedio diarias

ajustadas para los tres escenarios definidos.

El panel fotovoltaico simulado corresponde a un módulo monocristalino de 80 W, con tensión nominal de 18V, corriente de 4,44 A y área útil de 0,44 m<sup>2</sup>. Su eficiencia se consideró en 18%, y fue modelado mediante un bloque PV Array, que integra variaciones de irradiación y temperatura para estimar la potencia generada en tiempo real [17]

### **MPPT y convertidor elevador**

Se implementó un controlador MPPT que en sus siglas en inglés significa, Maximum Power Point Tracking, basado en el algoritmo Perturb and Observe, encargado de identificar y mantener el punto de operación óptimo del panel. Este controlador modula un convertidor DC-DC tipo boost, que eleva la tensión del panel para adaptarse a los niveles requeridos por la batería.

### **Batería y control de carga**

El sistema incorpora una batería LiFePO<sub>4</sub> de 42 V DC y 18 Ah, equivalente a una capacidad total de 756 Wh. Según el datasheet de Narada, operar la batería LiFePO<sub>4</sub> con una profundidad de descarga del 80% permite aproximadamente 3500 ciclos a 25°C, mientras que una descarga completa de 100% reduce la vida útil a 2000 ciclos. A profundidades moderadas como 20%, podrían alcanzarse hasta 24000 ciclos [18].

Adicionalmente, estudios experimentales recientes han demostrado que las baterías LiFePO<sub>4</sub>/ presentan un comportamiento más estable y menor deterioro estructural cuando se utilizan dentro de un intervalo intermedio de estado de carga SoC, por sus siglas en inglés: *State of Charge*. En particular, se ha observado que operar en el rango comprendido entre 20% y 100% de SoC ofrece un desempeño eficiente entre la capacidad energética aprovechable y la longevidad del sistema. Sin embargo, a medida que el SoC se aproxima al 100%, el desgaste acumulativo del electrodo se incrementa progresivamente [19].

Con base en estos criterios técnicos, el modelo desarrollado para la presente investigación adopta un rango operativo de SoC entre 20% y 100%, lo cual permite maximizar el uso energético del sistema sin comprometer de forma significativa la vida útil de la batería, garantizando un desempeño robusto y sostenible en el tiempo.

### **Perfil de consumo de la luminaria LED**

La luminaria LED utilizada en el sistema fue modelada mediante un equivalente eléctrico simplificado compuesto por una cadena de diodos en serie con resistencia dinámica asociada, representando el comportamiento V-I no lineal del arreglo LED. Este conjunto se alimenta desde un convertidor DC-DC controlado, cuyo nivel de tensión es conmutado electrónicamente de acuerdo con el perfil horario programado en el controlador interno de la lámpara. Para reproducir esta lógica en Simulink se implementó un bloque *switching logic* que selecciona los distintos niveles de potencia demandada en función de la hora simulada.

La programación horaria se validó experimentalmente mediante campañas de medición en campo incluyendo iluminancia, luminancia y espectrometría realizadas sobre las luminarias instaladas en la Av. Elia Liut, y se corroboró con la ficha técnica del fabricante LEDVANCE Solar Streetlight 60 W. La correspondencia entre las potencias eléctricas medidas y los niveles fotométricos observados confirma la validez del modelo adoptado para fines de simulación energética [17].

Con base en la documentación técnica del fabricante, la luminaria dispone de dos modos de operación nocturna preprogramables a través de su controlador multifunción integrado. Estos modos, utilizados en el presente estudio para evaluar el efecto de la atenuación sobre la autonomía del sistema, se describen a continuación.

#### **Modo de operación 1: 12 horas de iluminación continua.**

El perfil de consumo se distribuye de la siguiente forma tabla 4.2:

Franja horaria	% Potencia LED	Consumo (W)
19:00–22:00	100%	60 W
22:00–00:00	50%	30 W
00:00–05:00	20%	12 W
05:00–07:00	50%	30 W

**Tabla 4.2:** Modo de operación 1: 12h

Esto representa un consumo energético total de 360 Wh por noche tabla 4.3, considerando 12 horas activas de iluminación con regulación horaria escalonada.

CONFIGURACIÓN APLICADA		
POTENCIA CONSUMIDA POR NOCHE		
Franja Horaria	Porcentaje	Potencia (W)
19–22	100%	60 W
22–00	50%	30 W
00–05	20%	12 W
05–07	50%	30 W
CONSUMO		
100%	180 Wh	
50%	120 Wh	
20%	60 Wh	
TOTAL: 360 Wh		

**Tabla 4.3:** Modo de operación 1: Considerando 12h de carga

### Modo de operación 1: 6 horas de iluminación continua.

El perfil de consumo se distribuye de la siguiente forma tab 4.4:

Franja horaria	% Potencia LED	Consumo (W)
19:00–22:00	100%	60 W
22:00–00:00	50%	30 W
00:00–01:00	20%	12 W

**Tabla 4.4:** Modo de operación 2: 6h

En este modo, la iluminación se limita a 6 horas de servicio tabla 4.5, con un consumo total de 252 Wh por noche.

<b>POTENCIA CONSUMIDA POR NOCHE</b>		
<b>Franja Horaria</b>	<b>Porcentaje</b>	<b>Potencia (W)</b>
19-22	100%	60 W
22-00	50%	30 W
00-01	20%	12 W
<b>CONSUMO</b>		
100%	180 Wh	
50%	60 Wh	
20%	12 Wh	
<b>TOTAL: 252 Wh</b>		

**Tabla 4.5:** Modo de operación 2: Considerando 6h de carga

### **Instrumentación y monitoreo**

Finalmente, el modelo incluye bloques de medición que calculan y registran en tiempo real:

- Potencia generada por el panel W.
- Potencia consumida por la luminaria W.
- Lúmenes emitidos por la luminaria L.
- Estado de carga de la batería W.

Estos parámetros permiten realizar un análisis técnico integral del comportamiento del sistema en condiciones ideales en donde existe una abundante radiación como en el mes de noviembre, días con una radiación promedio y en días con baja radiación como el mes de mayo.

### 4.3 Condiciones climáticas simuladas

Para el análisis energético del sistema fotovoltaico, se utilizó una metodología basada en datos horarios reales de irradiación solar. Se estableció un rango de operación útil del sistema desde las 05:00 h hasta las 19:00 h, correspondiente a las horas con potencial generación solar. Este intervalo de 14 horas fue subdividido en bloques de 2 horas para permitir una evaluación detallada de la energía generada en cada segmento horario.

#### Escenarios de simulación considerados

Para el desarrollo del modelo computacional en Simulink, se emplearon los tres escenarios de irradiación previamente definidos en el apartado 4.1. Estos representan condiciones críticas, promedio y favorables de generación solar en el sitio de estudio, y permiten analizar el comportamiento energético del sistema bajo situaciones realistas de operación.

- **Escenario 1 – Día de irradiación mínima:** Corresponde al mes de mayo, con una irradiación diaria de 4048,10 Wh/m<sup>2</sup>.
- **Escenario 2 – Día promedio:** Basado en la irradiación media anual diaria, 4668,17 Wh/m<sup>2</sup>.
- **Escenario 3 – Día de irradiación máxima:** Asociado al mes de noviembre, con 5610,70 Wh/m<sup>2</sup>.

#### Parámetros del sistema para el cálculo de energía generada

- **Panel fotovoltaico:** 80 W de potencia nominal, 18 V, corriente nominal 4,44 A, área útil 0,44 m<sup>2</sup>, eficiencia 18%.
- **Batería:** LiFePO<sub>4</sub>, 42 V, 18 Ah, equivalente a 756 Wh de capacidad útil, soc mínimo 20%, soc máximo 100%.

- **Luminaria LED:** Potencia nominal de 60 W, 30 W, 12 W, utilizada exclusivamente para el análisis de descarga, no activa durante la fase de carga.

### Cálculo de energía generada por bloque horario

La energía generada en cada bloque de dos horas fue estimada mediante la fórmula:

$$E_{\text{bloque}} = G_{\text{bloque}} \cdot A_{\text{panel}} \cdot \eta \quad (4.1)$$

,

donde:

$G_{\text{bloque}}$  Irradiación acumulada en cada intervalo de 2 horas, expresada en Wh/m<sup>2</sup>.

$A_{\text{panel}}$  Área útil del panel solar, 0,44 m<sup>2</sup>.

$\eta$  Eficiencia del módulo fotovoltaico, 0,18.

Este análisis permitió estimar la energía acumulada en Wh, así como su impacto porcentual sobre la capacidad total de la batería.

### Escenario 1: mes de irradiación mínima, mes de mayo

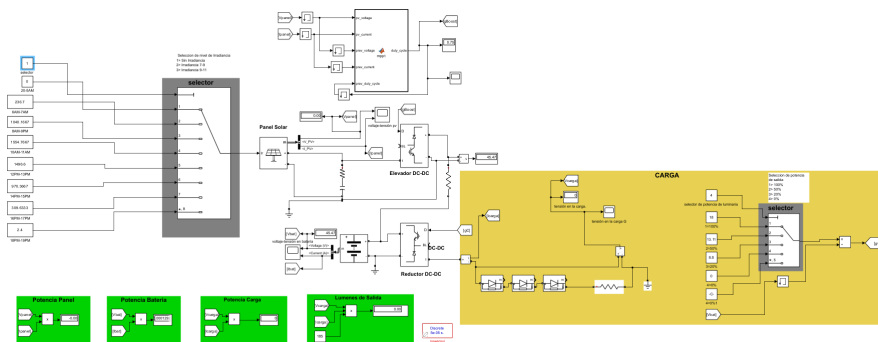
El escenario de mínima irradiación representa la condición más exigente para el sistema fotovoltaico tabla 4.6. Con un total diario de 4048 Wh/m<sup>2</sup>, distribuido en 14 horas útiles, la energía generada apenas alcanza los 320 Wh, lo que representa un 42% de la capacidad total de la batería 756 Wh.

Este nivel de carga es insuficiente para satisfacer el consumo nocturno definido en el modo de operación 1, el cual demanda 360 Wh por noche. Como resultado,

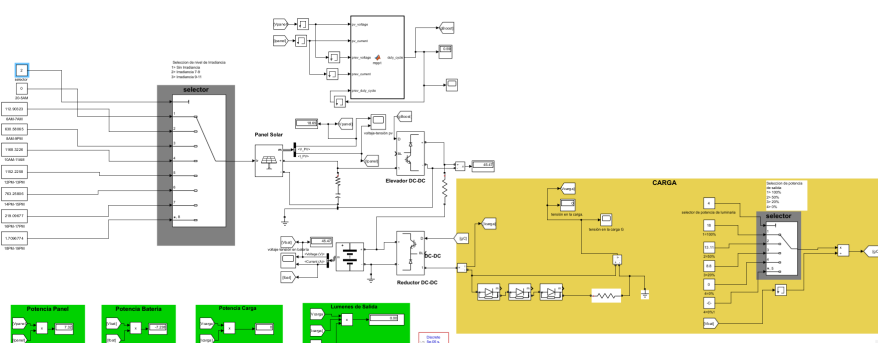
el sistema presenta un déficit energético diario, comprometiendo la autonomía de la luminaria desde la primera noche.

DESGLOSE HORARIO DE UN DÍA PROMEDIO					
Considerando radiación mínima (MAYO)					
HORA INICIO	HORA FIN	HORA ÚTIL	IRRADIACIÓN	ENERGÍA DE CARGA	PORCENTAJE DE CARGA
0:00	5:00 a. m.	0	0	0 Wh	0 %
5:00	7:00 a. m.	2	112.9032258	8.941264839 Wh	1.182706989 %
7:00	9:00 a. m.	2	630.5806452	49.93824145 Wh	6.605587493 %
9:00	11:00 a. m.	2	1168.322581	92.52420855 Wh	12.23865192 %
11:00	1:00 p. m.	2	1152.225806	91.24943965 Wh	12.0700317 %
1:00	3:00 p. m.	2	763.2580645	60.44550496 Wh	7.995437164 %
3:00	5:00 p. m.	2	219.0967742	17.35116308 Wh	2.295127392 %
5:00	7:00 p. m.	2	1.709677419	0.135396296 Wh	0.017909563 %
TOTAL HORAS			14 h		
IRRADIACIÓN TOTAL			4048.096774 wh/m <sup>2</sup>		
ENERGÍA TOTAL Wh			320.59 Wh		
ENERGÍA TOTAL %			42.40545223 %		

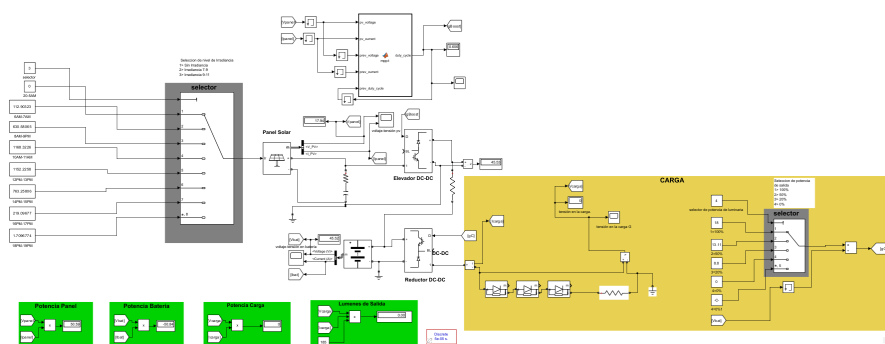
**Tabla 4.6:** Perfil horario promedio de irradiación solar – Considerando radiación mínima (Mayo)



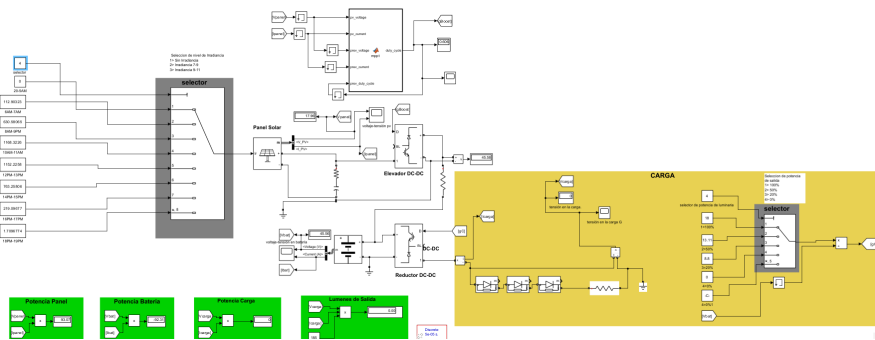
**Figura 4.1:** Potencia generada de 20-5 h



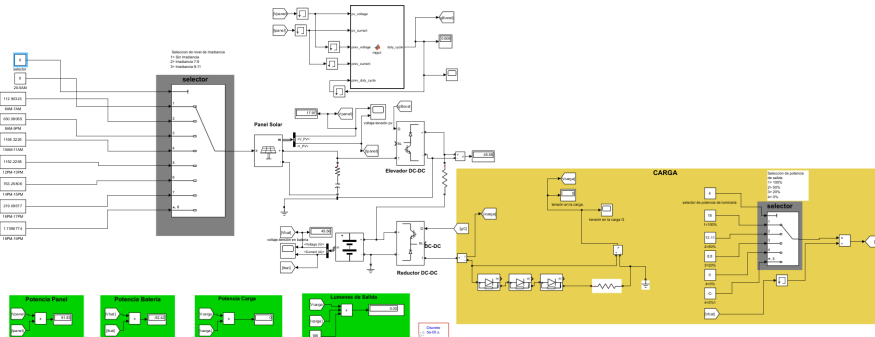
**Figura 4.2:** Potencia generada de 6-7 h



**Figura 4.3:** Potencia generada de 8-9 h

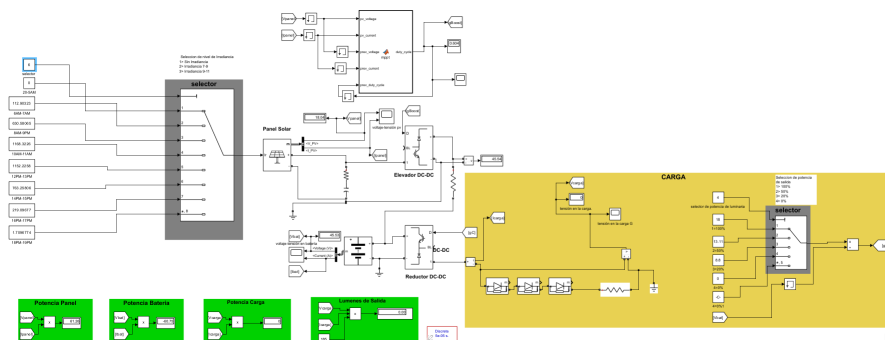


**Figura 4.4:** Potencia generada de 10-11 h



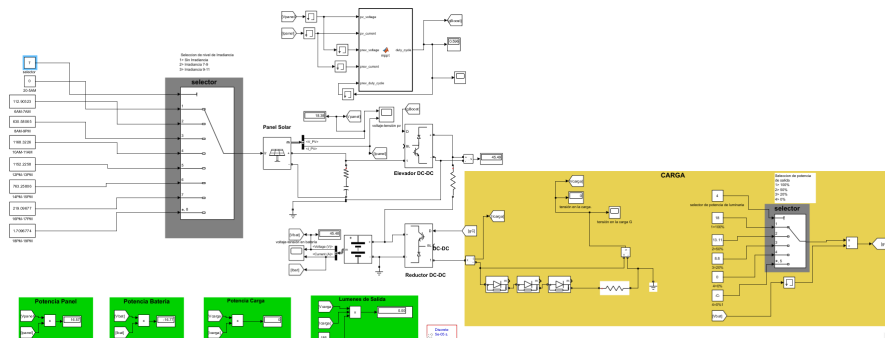
**Figura 4.5:** Potencia generada de 12-13 h

A pesar de que la generación se mantiene activa durante casi todo el intervalo solar de 05:00 a 20:00 fig 4.1, la intensidad de irradiación por hora es baja y dispersa, especialmente en las primeras y últimas franjas horarias. Esto limita la eficiencia del sistema, ya que el panel no opera cerca de su punto máximo de potencia durante gran parte del día, estos resultados son validados mediante el simulador el cual nos presenta resultados similares a los calculados.

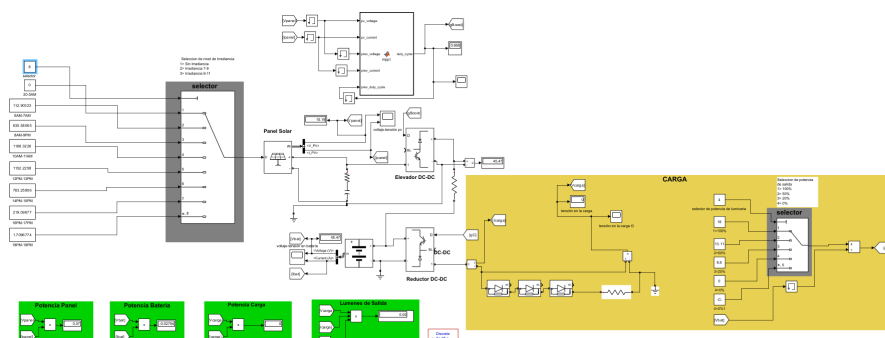


**Figura 4.6:** Potencia generada de 14-15 h

A continuación, se presentan los diferentes modelos de simulación con sus resultados, los cuales se pueden observar en la fig 4.2, fig 4.3, fig 4.4, fig 4.5, fig 4.6, fig 4.7, fig 4.8



**Figura 4.7:** Potencia generada de 16-17 h



**Figura 4.8:** Potencia generada de 18-19 h

En ambos escenarios se evidencian datos muy semejantes lo que a su vez valida

y permite desde un punto de vista de diseño, la necesidad de:

- Considerar un sobredimensionamiento del panel o banco de baterías,
- Evaluar el uso de estrategias de atenuación más agresivas en días críticos.

Este análisis justifica la necesidad de simular condiciones reales y no ideales en el diseño de sistemas autónomos, especialmente para zonas urbanas donde se exige continuidad del servicio incluso en días con baja radiación.

### Escenario 2: mes de irradiación promedio

El segundo escenario corresponde a un día con irradiación media anual tabla 4.7, con un valor diario de 4668,13 Wh/m<sup>2</sup> distribuido en 14 horas útiles de generación entre las 06:00 a 20:00. En estas condiciones, el sistema fotovoltaico genera 369,69 Wh, lo que representa un 48,9% de carga de la batería. El segundo esce-

DESGLOSE HORARIO DE UN DÍA PROMEDIO					
Considerando radiación promedio					
HORA INICIO	HORA FIN	HORA ÚTIL	IRRADIACIÓN	ENERGÍA DE CARGA	PORCENTAJE DE CARGA
0:00	5:00 a. m.	0	0	0 Wh	0 %
6:00	7:00 a. m.	2	106.7629682	8.45 Wh	1.118385306 %
8:00	9:00 a. m.	2	661.4224206	52.38 Wh	6.928667575 %
10:00	11:00 a. m.	2	1219.993705	96.62 Wh	12.77992787 %
12:00	1:00 p. m.	2	1271.78069	100.72 Wh	13.3224175 %
14:00	3:00 p. m.	2	988.5391641	78.29 Wh	10.35534787 %
16:00	5:00 p. m.	2	381.0943868	30.18 Wh	3.992117955 %
18:00	7:00 p. m.	2	38.54390681	3.05 Wh	0.403763025 %
<b>TOTAL HORAS</b>			14 h		
<b>IRRADIACIÓN TOTAL</b>			4668.137242 wh/m <sup>2</sup>		
<b>ENERGÍA TOTAL Wh</b>			369.69 Wh		
<b>ENERGÍA TOTAL %</b>			48.90062709 %		

**Tabla 4.7:** Desglose horario de un día promedio - Considerando radiación promedio

nario corresponde a un día con irradiación media anual tabla 4.7, con un valor diario de 4668,13 Wh/m<sup>2</sup> distribuido en 14 horas útiles de generación entre las 06:00 a 20:00. En estas condiciones, el sistema fotovoltaico genera 369,69 Wh, lo que representa un 48,9% de carga de la batería, tales como se muestra en las fig 4.9, fig 4.10, fig 4.11, fig 4.12, fig 4.13, fig 4.14, fig 4.15,

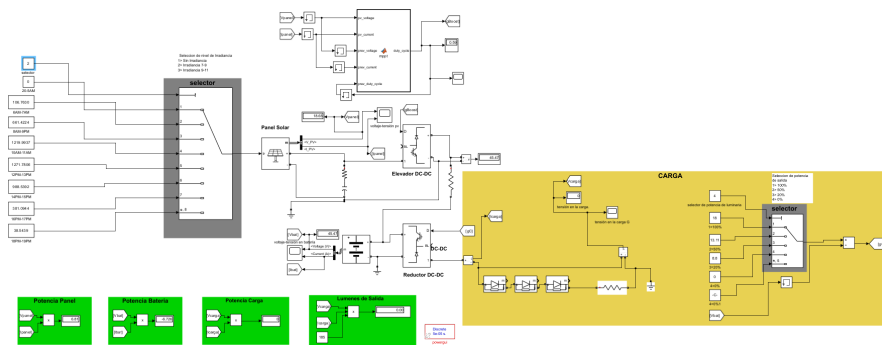


Figura 4.9: Potencia generada de 6-7 h

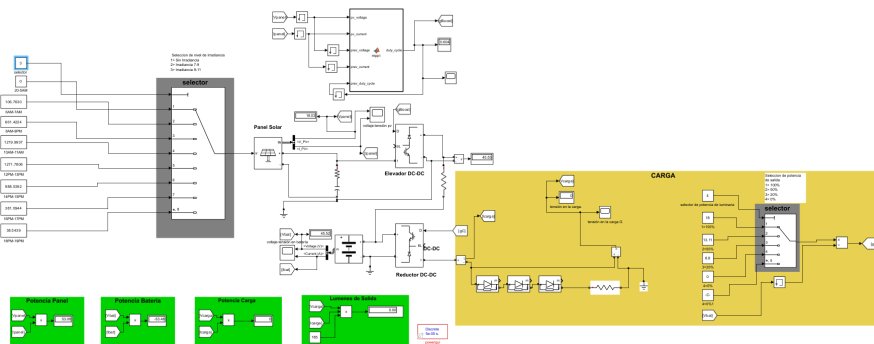


Figura 4.10: Potencia generada de 8-9 h

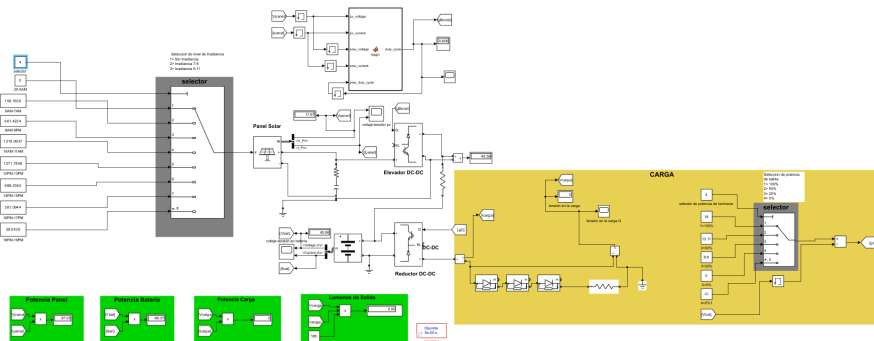
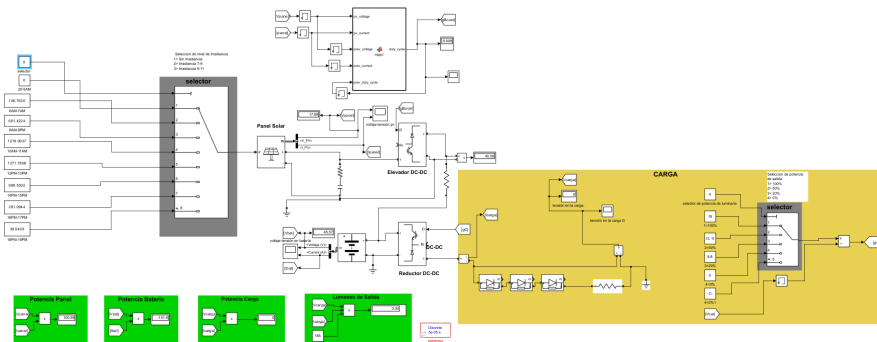
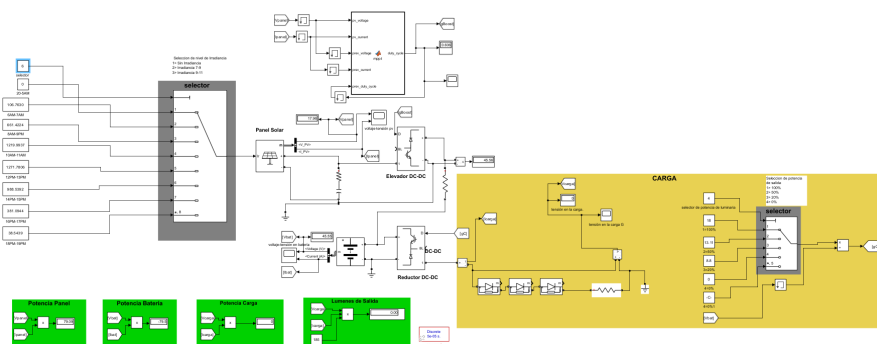


Figura 4.11: Potencia generada de 10-11 h

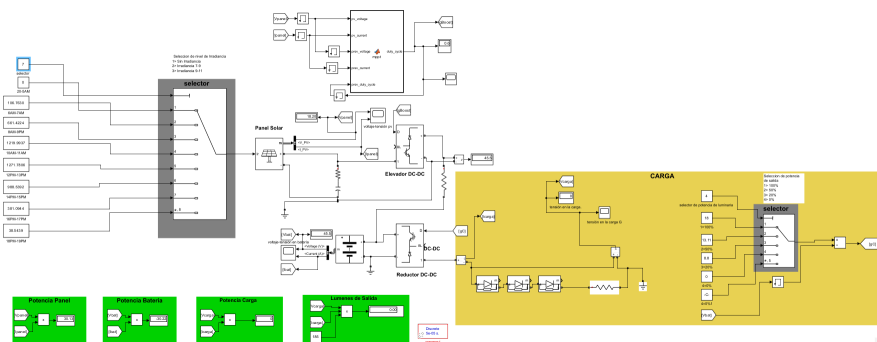
Este nivel de generación es suficiente para cubrir el consumo nocturno del sistema bajo el modo de operación 1, que requiere 360 Wh. Además, el pequeño excedente energético de 9,7 Wh, puede ser aprovechado para compensar parcialmente la carga de la batería en caso de que esta no se encuentre al 100% al inicio del ciclo diario.



**Figura 4.12:** Potencia generada de 12-13 h

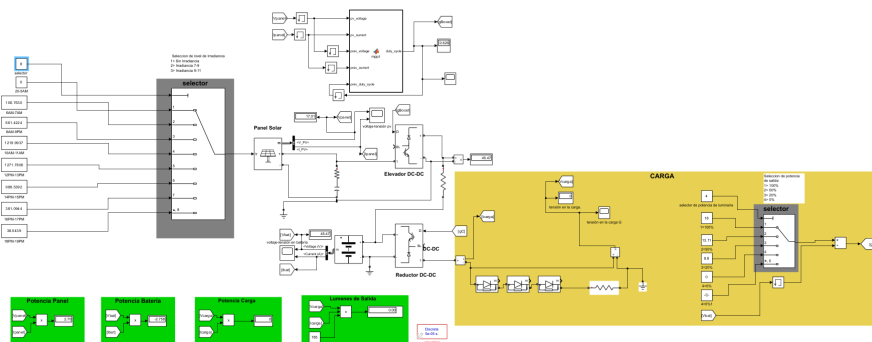


**Figura 4.13:** Potencia generada de 14-15 h



**Figura 4.14:** Potencia generada de 16-17 h

Los bloques de mayor aporte se concentran entre las 09:00 y 15:00, donde la irradiación es más estable y permite operar el panel cerca de su rendimiento óptimo. A diferencia del escenario anterior, en este caso la distribución horaria de generación es más uniforme y eficiente, como se corrobora en el simulador.



**Figura 4.15:** Potencia generada de 18- 19 h

Bajo condiciones promedio de radiación, el sistema fotovoltaico sí alcanza un balance energético favorable, permitiendo cubrir el consumo completo de iluminación nocturna y contribuyendo a la recarga de la batería. Este escenario confirma la viabilidad operativa del sistema en días típicos, sin comprometer la autonomía de la luminaria.

### Escenario 3: mes de irradiación máxima

Este escenario representa la condición óptima de generación fotovoltaica tabla 4.8, correspondiente a un día con irradiación máxima del año: 5610,63 Wh/m<sup>2</sup>. Durante las 14 horas útiles entre las 05:00 a 19:00 horas, el sistema genera un total de 444,33 Wh, equivalente al 58,77% de carga de la batería.

DESGLOSE HORARIO DE UN DÍA PROMEDIO					
Considerando radiación máxima (noviembre)					
HORA INICIO	HORA FIN	HORA ÚTIL	IRRADIACIÓN	ENERGÍA DE CARGA	PORCENTAJE DE CARGA
0:00	5:00 a. m.	0	0	0,00 Wh	0,000 %
6:00	7:00 a. m.	2	236.7	18,75 Wh	2,480 %
8:00	9:00 a. m.	2	1040.17	82,38 Wh	10,896 %
10:00	11:00 a. m.	2	1554.77	123,13 Wh	16,287 %
12:00	1:00 p. m.	2	1496.60	118,52 Wh	15,677 %
14:00	3:00 p. m.	2	970.37	76,85 Wh	10,165 %
16:00	5:00 p. m.	2	309.63	24,52 Wh	3,244 %
18:00	7:00 p. m.	2	2.40	0,19 Wh	0,025 %
<b>TOTAL HORAS</b>			14 h		
<b>IRRADIACIÓN TOTAL</b>			5610.63 Wh/m <sup>2</sup>		
<b>ENERGÍA TOTAL (Wh)</b>			444.33 Wh		
<b>ENERGÍA TOTAL (%)</b>			58.77 %		

**Tabla 4.8:** Carga generada considerando radiación máxima (noviembre)

La mayor concentración de energía útil ocurre entre las 08:00 y 14:00, con

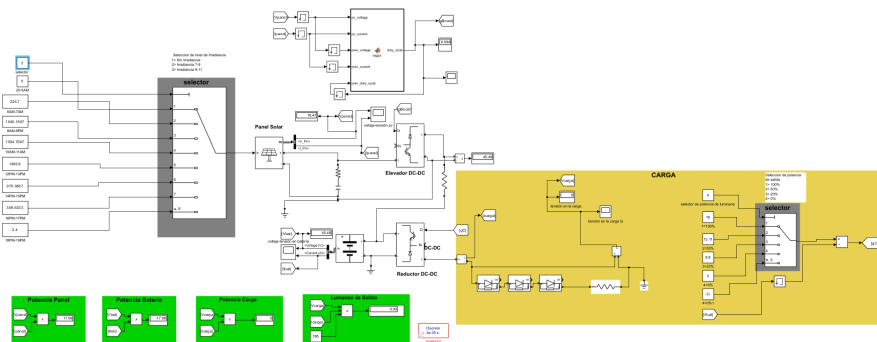


Figura 4.16: Potencia generada de 6-7 h

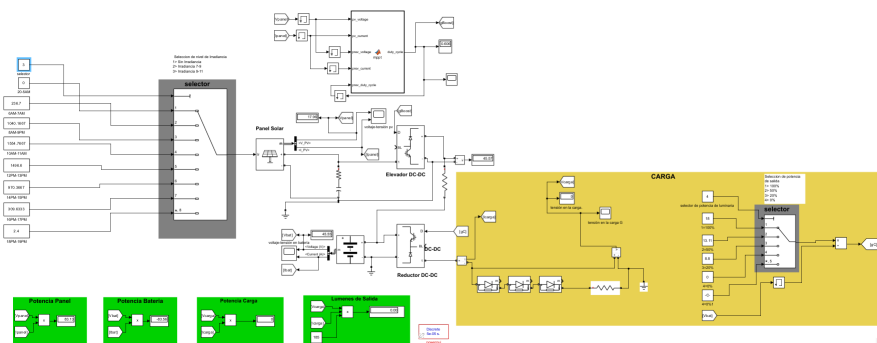


Figura 4.17: Potencia generada de 8-9 h

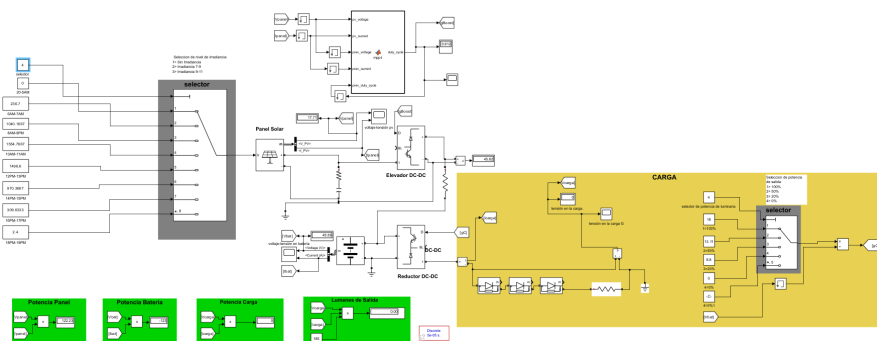
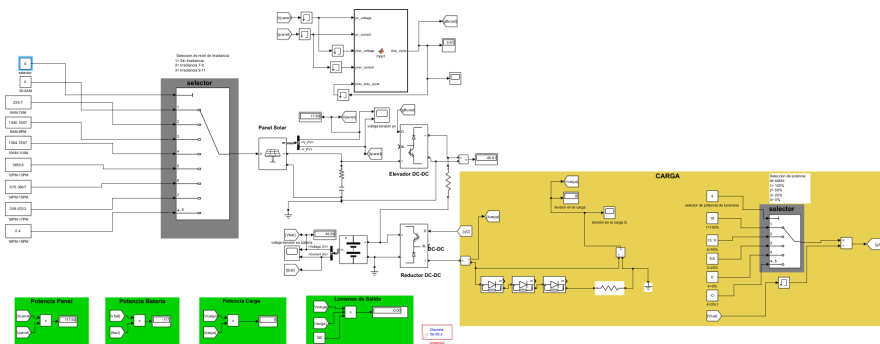


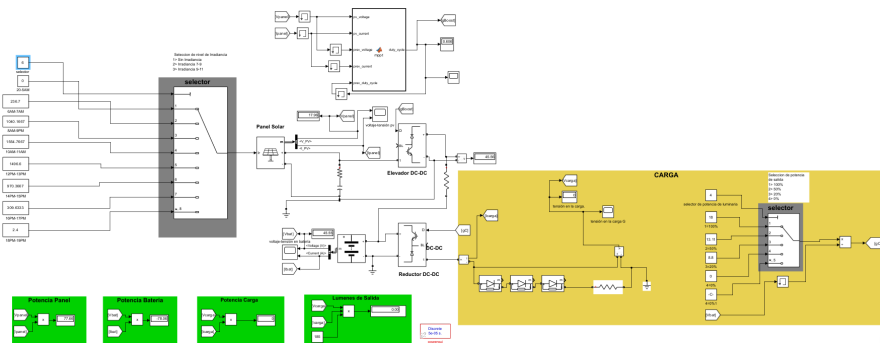
Figura 4.18: Potencia generada de 10-11 h

bloques horarios que aportan más de 120 Wh cada uno, gracias a una irradiación, superior a  $1400 \text{ Wh/m}^2$  en algunos casos. Estos valores permiten que el panel opere en condiciones cercanas a su punto de máxima potencia. En este escenario, el sistema no solo cubre completamente el consumo nocturno de 360 Wh, sino que además dispone de un excedente significativo de más de 84 Wh, lo que permite

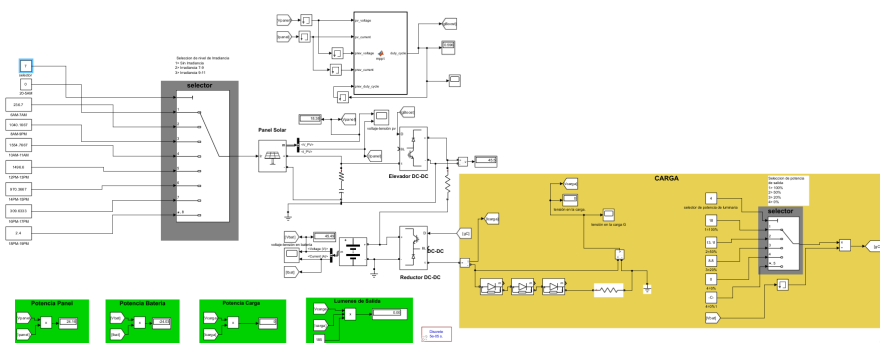


**Figura 4.19:** Potencia generada de 12-13 h

recuperar parcialmente la carga de la batería si no se encontraba al 100%. Estos datos resultados de la simulacion se obtienen el la fig 4.16, fig 4.17, fig 4.18, fig 4.19, fig 4.20, fig 4.21, fig 4.22.



**Figura 4.20:** Potencia generada de 14-15 h



**Figura 4.21:** Potencia generada de 16-17 h

Este nivel de desempeño confirma que, bajo condiciones solares favorables, el sistema no presenta restricciones operativas, mantiene la autonomía de ilumi-

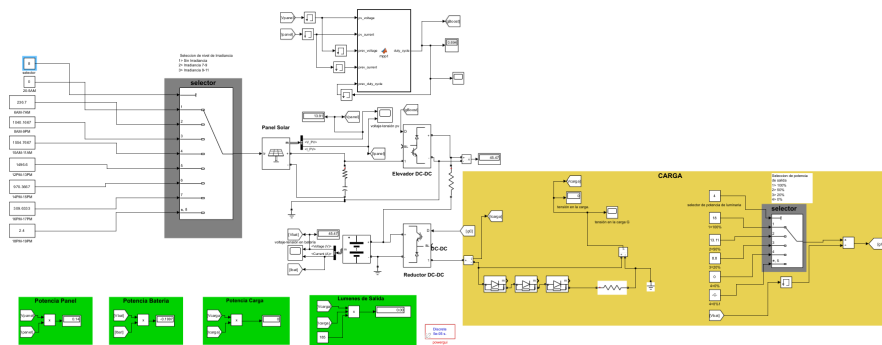


Figura 4.22: Potencia generada de 18-19 h

nación, y genera un margen de reserva energética útil para días posteriores con menor irradiación.

## 4.4 Resultados energéticos

### 4.4.1 Potencias generadas y consumo

El análisis de los tres escenarios de irradiación evidencia diferencias significativas en la capacidad del sistema para garantizar autonomía nocturna como se puede observar en la tabla 4.9.

Parámetro	Escenario 1: Mínima (mayo)	Escenario 2: Promedio (anual)	Escenario 3: Máxima (noviembre)
Irradiación total [Wh/m <sup>2</sup> ]	4048,10	4668,14	5610,63
Horas útiles de carga [h]	14	14	14
Energía generada [Wh]	320,59	369,69	444,33
Porcentaje de carga batería [%]	42,41	48,90	58,77
Consumo requerido (modo 1) [Wh]	360	360	360
¿Cubre el consumo completo?	No	Sí	Sí
Excedente o déficit [Wh]	-39,41	9,69	84,33
Conclusión operativa	No autónomo	Autonomía marginal	Autonomía asegurada

Tabla 4.9: Comparación de escenarios de generación y consumo energético según irradiación

En condiciones de irradiación mínima, la generación alcanza solo 320,59 Wh, resultando en un déficit de 39,41 Wh respecto al consumo requerido. Esto compromete la autonomía desde el primer ciclo, mientras que bajo condiciones promedio,

el sistema genera 369,69 Wh, superando ligeramente la demanda con 9,69 Wh, lo que permite operar en modo completo, aunque con margen reducido.

En el escenario de irradiación máxima, se obtiene una generación de 444,33 Wh, lo que asegura el consumo diario y deja un excedente de 84,33 Wh para recuperar carga, por ende, el sistema es energéticamente autónomo en condiciones promedio y favorables, pero presenta limitaciones operativas bajo irradiación mínima en el mes de mayo, lo que justifica la necesidad de control adaptativo o redimensionamiento en proyectos similares.

#### **4.4.2 Tiempo de carga de la batería**

El análisis se realiza considerando una batería LiFePO<sub>4</sub> de 756 Wh de capacidad total, con un rango operativo entre 20% y 100% de SoC presentando un total de 604,8 Wh de capacidad útil. Para evaluar la recarga diaria, se consideran tres escenarios representativos de irradiación, tomando en cuenta el tiempo efectivo necesario de irradiación solar útil por día y el consumo fijo nocturno de 360 Wh, correspondiente a la luminaria operando bajo el Modo 1 y el consumo fijo nocturno de 252 Wh, correspondiente al modo de operación 2. El sistema parte en los diferentes escenarios con la batería totalmente cargada.

##### **Modo de operación 1**

##### **Escenario 1 – Radiación mínima en el mes de mayo**

- Diferencia energética diaria: -39,41 Wh, déficit del 6,5% de la capacidad útil, tabla 4.10. La batería no se recarga completamente después de un día con baja radiación. Si no hay días de recuperación, el sistema alcanza el límite operativo de 20% de SoC. Aunque se cuenta con 14 horas de irradiación, esta no es suficiente para cubrir el consumo diario.

##### **Escenario 2 – Radiación promedio anual**

<b>ESCENARIO 1: CONSIDERANDO RADIACIÓN MÍNIMA</b>	
<b>Energía generada en 14 h</b>	320,59 Wh
<b>Energía consumida en 12 h</b>	360 Wh
<b>E generada - E consumida</b>	-39,41 Wh
<b>Carga de batería</b>	756 Wh
<b>Carga de batería útil</b>	604,8 Wh
<b>Energía disponible</b>	565,39 Wh
<b>Energía disponible post 28 días</b>	13,65 Wh

**Tabla 4.10:** Escenario 1

- Resultado: La batería compensa el consumo y se recarga totalmente antes de las 17:00 tabla 4.11, con margen positivo y la curva de irradiación permite una carga constante y sostenida a lo largo del día.

<b>ESCENARIO 2: CONSIDERANDO RADIACIÓN PROMEDIO</b>	
<b>ENERGÍA GENERADA EN 12H</b>	366,64 Wh
<b>ENERGÍA CONSUMIDA EN 12H</b>	360 Wh
<b>E GENERADA - E CONSUMIDA</b>	6,64 Wh
<b>CARGA DE BATERÍA</b>	756 Wh
<b>CARGA DE BATERÍA ÚTIL</b>	604,8 Wh
<b>ENERGÍA DISPONIBLE</b>	611,44 Wh

**Tabla 4.11:** Escenario 2

**Escenario 3 – Radiación máxima registrada en el mes de noviembre.**

<b>ESCENARIO 3: CONSIDERANDO RADIACIÓN MÁXIMA</b>	
<b>ENERGÍA GENERADA EN 10H</b>	419,62 Wh
<b>ENERGÍA CONSUMIDA EN 12H</b>	360 Wh
<b>E GENERADA - E CONSUMIDA</b>	59,62 Wh
<b>CARGA DE BATERÍA</b>	756 Wh
<b>CARGA DE BATERÍA ÚTIL</b>	604,8 Wh
<b>ENERGÍA DISPONIBLE</b>	664,42 Wh

**Tabla 4.12:** Escenario 3

- Resultado: La batería se recarga completamente antes de las 15:00 tabla

4.12, evidenciando un aprovechamiento más eficiente en menor tiempo, lo que indica que, a pesar de solo considerar 10 horas del día, la intensidad de la irradiación permite una carga rápida y con excedente considerable.

El sistema demuestra alta viabilidad energética en condiciones promedio y máximas, con capacidad de recarga total incluso antes de completar la jornada solar. En escenarios críticos, el sistema puede operar durante varios días gracias a la reserva, pero requerirá días consecutivos de buena radiación para recuperar el estado de carga.

### Modo de operación 2

#### Escenario 4– Radiación mínima en el mes de mayo

<b>ESCENARIO 4: CONSIDERANDO RADIACIÓN MÍNIMA</b>	
<b>ENERGÍA GENERADA EN 10H</b>	303,10 Wh
<b>ENERGÍA CONSUMIDA EN 6H</b>	252 Wh
<b>E GENERADA - E CONSUMIDA</b>	51,10 Wh
<b>CARGA DE BATERÍA</b>	756 Wh
<b>CARGA DE BATERÍA ÚTIL</b>	604,8 Wh
<b>ENERGÍA DISPONIBLE</b>	655,90 Wh

**Tabla 4.13:** Escenario 4

- Resultado: La batería se carga completamente antes de las 15:00 tabla 4.13, manteniendo un margen energético cómodo para enfrentar variaciones de irradiación, este escenario asegura autonomía continua con capacidad de reserva, a pesar de existir un déficit por días anteriores de baja irradiación, parte del día aún estaría disponible para recuperación de carga o acumulación de ser necesario lo que indica un sistema con buena respuesta ante irradiación media con tiempos de recarga muy eficientes

#### Escenario 5 – Radiación promedio

<b>ESCENARIO 5: CONSIDERANDO RADIACIÓN PROMEDIO</b>	
<b>ENERGÍA GENERADA EN 10H</b>	336,46 Wh
<b>ENERGÍA CONSUMIDA EN 6H</b>	252 Wh
<b>E GENERADA - E CONSUMIDA</b>	84,46 Wh
<b>CARGA DE BATERÍA</b>	756 Wh
<b>CARGA DE BATERÍA ÚTIL</b>	604,8 Wh
<b>ENERGÍA DISPONIBLE</b>	840,46 Wh

**Tabla 4.14:** Escenario 5

- Resultado: La batería se carga completamente antes de las 15:00 tabla 4.14, manteniendo un margen energético cómodo para enfrentar variaciones de irradiación, este escenario asegura autonomía continua con capacidad de reserva, a pesar de existir un déficit por días anteriores de baja irradiación, parte del día aún estaría disponible para recuperación de carga o acumulación de ser necesario lo que indica un sistema con buena respuesta ante irradiación media con tiempos de recarga muy eficientes.

#### **Escenario 6 – Radiación máxima, noviembre**

<b>ESCENARIO 6: CONSIDERANDO RADIACIÓN MÁXIMA</b>	
<b>ENERGÍA GENERADA EN 8H</b>	342,77 Wh
<b>ENERGÍA CONSUMIDA EN 6H</b>	252 Wh
<b>E GENERADA - E CONSUMIDA</b>	90,77 Wh
<b>CARGA DE BATERÍA</b>	756 Wh
<b>CARGA DE BATERÍA ÚTIL</b>	604,8 Wh
<b>ENERGÍA DISPONIBLE</b>	846,77 Wh

**Tabla 4.15:** Escenario 6

- Resultado: La batería se recarga totalmente antes de las 13:00 tabla 4.15, garantizando excedentes significativos para mantener autonomía prolongada, el sistema demuestra una alta eficiencia, con tiempos de recarga mucho menores a la jornada solar disponible.

En el **Modo de Operación 2**, la reducción de consumo a 252 Wh permite que, incluso en condiciones de irradiación mínima, la batería se recargue completamente durante el día, manteniendo un margen positivo. En escenarios promedio y máximos, la recarga ocurre antes de culminar la jornada solar, lo que mejora la confiabilidad operativa y la capacidad de resiliencia frente a días consecutivos de baja irradiación.

#### **4.4.3 Niveles de autonomía**

El análisis de autonomía se ha realizado asumiendo ausencia total de irradiación solar en condiciones extremas de días nublados continuos, evaluando el comportamiento del sistema en ambos modos de operación definidos por el fabricante de la luminaria. Se parte de una batería completamente cargada con capacidad total de 756 Wh, de los cuales 604,8 Wh se consideran aprovechables debido al SoC mínimo del 20%.

##### **Modo de operación 1 – Carga completa durante 12 horas**

Bajo este modo, el sistema demanda un consumo energético diario de 360Wh, correspondiente a un ciclo completo de funcionamiento nocturno de 12 horas, dado este consumo:

- La batería ofrece una autonomía de 1,68 días, lo que equivale a 40,32 horas de trabajo continuo sin reposición energética, esto equivale a 1 noche completa más el 68% de una segunda noche, es decir, 1,68 ciclos nocturnos de 12 horas sin generación solar antes de alcanzar el umbral de seguridad del 20% de descarga.

##### **Modo de operación 2 – Carga parcial durante 6 horas**

En este caso, la luminaria reduce su consumo a 252Wh por noche, lo que se traduce en una operación nocturna de 6 horas, con una combinación de potencias del 100%, 50% y 20% por franjas horarias. El menor requerimiento energético genera:

- Una autonomía de 2,4 días, es decir, 57,6 horas de operación continua, esto permite abastecer exactamente 2,4 noches de 6 horas, es decir, 2 ciclos completos más un 40% de un tercero, sin necesidad de recarga.

Este análisis evidencia que, bajo condiciones críticas de generación nula, el Modo 2 garantiza mayor continuidad operativa, resultando más robusto ante eventos prolongados de baja irradiación. Así, el uso de perfiles de atenuación nocturna no solo contribuye a la eficiencia energética, sino que también aumenta significativamente la autonomía del sistema, preservando el servicio de iluminación urbana en contextos climáticos adversos.

<b>AUTONOMÍA DE LA BATERÍA CONSIDERANDO RADIACIÓN CERO</b>		
<b>Parámetro</b>	<b>12 horas de trabajo (Modo 1)</b>	<b>6 horas de trabajo (Modo 2)</b>
<b>Carga batería</b>	756 Wh	756 Wh
<b>Carga batería útil</b>	604,8 Wh	604,8 Wh
<b>Consumo</b>	360 W	252 W
<b>Autonomía</b>	1,68 días	2,4 días
<b>Ciclo de trabajo</b>	40,32 horas	57,6 horas

**Tabla 4.16:** Autonomía de la batería

## CAPÍTULO 5

### PERCEPCIÓN DE LOS USUARIOS

#### 5.1 Diseño y aplicación de encuestas

##### 5.1.1 Población y muestra

Se llevó a cabo un muestreo aleatorio mediante la aplicación de encuestas presenciales a 30 usuarios habituales de la calle Elia Liut, en el intervalo horario comprendido entre las 19:00 y 22:00 horas. El objetivo principal fue evaluar la percepción de satisfacción y confort visual durante su desplazamiento por las áreas peatonales y ciclovías adyacentes. Adicionalmente, se implementó un cuestionario digital dirigido a usuarios frecuentes de la misma vía, con la finalidad de complementar y validar los datos obtenidos en el levantamiento presencial. Esta estrategia metodológica permitió recopilar información representativa y relevante que fundamenta el análisis del comportamiento visual y la experiencia subjetiva de los usuarios, contribuyendo al desarrollo de un estudio riguroso sobre las condiciones lumínicas y su impacto en la percepción de seguridad y comodidad en el espacio público.

### 5.1.2 Estructura del cuestionario

Las encuestas aplicadas en el presente estudio están conformadas por un total de diez preguntas cuidadosamente diseñadas para abordar aspectos fundamentales: la calidad de la iluminación, el confort visual y la percepción de seguridad que experimentan tanto peatones como ciclistas durante su tránsito por el área de estudio. Cada pregunta ha sido formulada con el propósito de captar de manera precisa y detallada la experiencia subjetiva de los usuarios respecto a las condiciones lumínicas presentes en las aceras y ciclovías del sector. Esta estructura permite un análisis integral que abarca no solo la evaluación técnica de la iluminación, sino también su impacto en el bienestar y la sensación de seguridad de los usuarios, aspectos clave para el diseño y la planificación urbana orientados a mejorar la movilidad y la calidad del espacio público. Las encuestas digitales que se implementaron para complementar la recolección de datos presenciales mantienen la misma estructura y contenido para posteriormente poder realizar comparación con encuestas anteriores y así tener información clave para ver el confort de los usuarios. El formato usado en las encuestas es el mismo que se encuentra dentro de la tesis ANÁLISIS DE LA EFICIENCIA DEL SISTEMA FOTOVOLTAICO PARA ALUMBRADO PÚBLICO, APLICADO A LA CALLE ELIA LIUT ENTRE AV ESPAÑA Y CALLE VIEJA [13].

## Encuesta sobre la Percepción de la Iluminación con Luminarias LED Fotovoltaicas – Av. Elia Liut

### Preguntas de percepción

1. ¿Cómo califica la calidad de la iluminación proporcionada por las luminarias LED fotovoltaicas?

Muy buena    Buena    Regular    Mala    Muy mala

### **5.1.3 Proceso de levantamiento de información**

Las encuestas presenciales se llevaron a cabo en lo largo de la calle Elia Liut durante dos jornadas consecutivas, en un horario comprendido entre las 19:00 y 22:00 horas. Se determinó que la hora de mayor afluencia peatonal era alrededor de las 20:00 horas, por lo que se enfocó la recolección de datos en ese intervalo para captar la mayor cantidad de usuarios posibles.

La selección de los encuestados se realizó mediante muestreo aleatorio entre las personas que transitaban por la zona. A cada participante se le proporcionó un formulario impreso que contenía preguntas de opción múltiple, diseñadas para evaluar la percepción sobre la calidad de la iluminación, el confort visual y la seguridad percibida.

Para complementar la recolección presencial, se implementaron encuestas digitales distribuidas mediante un enlace accesible a través de un código QR que los usuarios podían escanear con sus dispositivos móviles. Se facilitó el acceso a internet a aquellos participantes que no contaban con conexión, brindando apoyo directo en la calle para asegurar la participación y el correcto llenado del cuestionario digital.

## **5.2 Análisis de resultados**

### **5.2.1 Análisis de los datos obtenidos**

#### **Pregunta 1**

¿Cómo califica la calidad de iluminación proporcionada por las luminarias LED fotovoltaicas?

Los resultados reflejan una percepción mayoritariamente favorable con un 67%, en contraposición de un 33% que manifiestan que no creen que la luminaria led tiene una suficiente iluminación. Esta consistencia en las respuestas evidencia la efectividad del sistema de alumbrado en términos de cobertura, intensidad lumínica y respuesta a las necesidades visuales de los peatones y ciclistas que transitan por la zona..

### **Pregunta 2**

¿Considera que la intensidad de la luz es suficiente para caminar, circular o transitar de forma segura durante la noche?

Se puede observar una tendencia ampliamente positiva con una parte que favorece con 63% que manifestó estar “de acuerdo” o “totalmente de acuerdo” con que la intensidad lumínica proporcionada es adecuada para transitar tanto por la acera como por la ciclovía. Este resultado refleja un nivel alto de conformidad por parte de los usuarios, 37% lo que sugiere que la iluminación instalada cumple con los niveles de visibilidad requeridos para una circulación segura durante el horario nocturno.

### **Pregunta 3**

¿Cree que las luminarias LED fotovoltaicas contribuyen a la seguridad vial en la ciclovía y acera?

Se tiene como resultado que el 80% de este resultado refleja una percepción favorable por parte de los usuarios respecto al desempeño del sistema de alumbrado implementado, lo cual refuerza su pertinencia en espacios urbanos destinados a la movilidad no motorizada. La valoración positiva puede estar asociada a la mejora en la visibilidad del entorno, la reducción de zonas oscuras y el aumento de la percepción de control social, elementos clave en la prevención de incidentes y en la generación de entornos más seguros durante el horario nocturno.

#### **Pregunta 4**

¿Está de acuerdo en que este tipo de iluminación debería implementarse en otras calles y veredas de la ciudad?

Se observa que el 90% de usuarios tienen un alto nivel de confort visual para transitar por la acera y la ciclovía. Esta valoración positiva evidencia que el sistema de iluminación LED fotovoltaica no solo cumple con su función técnica, sino que también aporta al bienestar visual de los transeúntes. Los resultados permiten inferir que la implementación de este tipo de tecnología podría ser replicada en otros sectores de la ciudad, como una estrategia efectiva para mejorar la calidad del espacio público, aumentar la seguridad vial y promover el uso activo de infraestructura peatonal y ciclística durante el horario nocturno.

#### **Pregunta 5**

¿Considera que las luminarias LED fotovoltaicas mejoran la estética urbana de la Av. Elia Liut?

Se obtiene que el 87% , de los resultados obtenidos, que la percepción estética de las luminarias instaladas en las veredas y ciclovías es altamente favorable. Un porcentaje considerable de los encuestados indicó que estas luminarias contribuyen positivamente a la mejora visual del entorno urbano, destacando que aportan a la estética general de la calle Elia Liut.

#### **Pregunta 6**

¿Ha notado apagones, reducción de la iluminación o fallas en las luminarias durante la noche en el último año?

Esta pregunta se tiene resultados de un 43% , que la mayoría de los encuestados no percibe la atenuación que ocurre cuando la luminaria reduce su nivel de iluminación. Sin embargo, aproximadamente el 57% de la muestra sí manifestó

haber notado este cambio en la intensidad luminosa.

### **Pregunta 7**

¿Considera que la autonomía nocturna (duración de encendido) de las luminarias es adecuada?

Los resultados reflejan que una 73% de los encuestados se muestra conforme con el tiempo de funcionamiento de las luminarias. La mayoría considera que la duración del encendido es adecuada y responde satisfactoriamente a las necesidades de iluminación durante el horario nocturno.

### **Pregunta 8**

¿Considera que la iluminación actual cubre adecuadamente las zonas críticas como intersecciones, cruces peatonales y tramos largos de ciclovía y aceras?

En relación con esta pregunta, los resultados muestran una tendencia hacia un nivel con un promedio de 57% de percepción de seguridad por parte de los usuarios en los cruces peatonales e intersecciones ubicadas a lo largo de la calle Elia Liut. La otra parte correspondiente al 43% de los encuestados indicó no sentirse ni particularmente seguros ni inseguros al transitar por estos puntos, lo cual evidencia una percepción ambigua o neutral respecto a las condiciones actuales. Este resultado sugiere la necesidad de realizar intervenciones específicas en dichos sectores, con el fin de reforzar la iluminación, mejorar la señalización horizontal y vertical, y asegurar una mayor visibilidad en los cruces, especialmente durante la noche.

### **Pregunta 9**

¿Apoya la instalación de luminarias LED fotovoltaicas como medida para reducir el consumo energético en la ciudad?

Los resultados obtenidos con una respuesta favorable del 87% en esta sección de la encuesta reflejan que los usuarios muestran un alto nivel de aceptación hacia el uso de luminarias LED fotovoltaicas. Una parte importante de los encuestados reconoce que este tipo de tecnología representa una alternativa sostenible, y valora positivamente su implementación por los beneficios que ofrece, entre ellos, la reducción del consumo energético y, en consecuencia, del costo económico para la ciudad.

### **Pregunta 10**

¿Considera que las luminarias LED fotovoltaicas generan beneficios ambientales para la ciudad?

Las respuestas proporcionadas con un 87% de los transeúntes que frecuentan la calle Elia Liut, existe una percepción clara de los beneficios ambientales asociados al uso de luminarias LED fotovoltaicas. Uno de los aspectos más valorados por los usuarios es que este tipo de luminarias no requiere la instalación de líneas eléctricas aéreas, lo que contribuye a mantener un entorno urbano más limpio, ordenado y visualmente libre de contaminación por cableado. A partir del análisis de los resultados obtenidos en las encuestas, tanto físicas como digitales, se concluye que la percepción general de los usuarios respecto al sistema de iluminación LED fotovoltaica implementado en la calle Elia Liut es mayoritariamente positiva. Los encuestados valoran favorablemente aspectos como el confort visual, la visibilidad nocturna y la percepción de seguridad al transitar por las aceras y ciclovías del sector. Una proporción significativa de la muestra manifestó estar conforme con la intensidad lumínica proporcionada, señalando que esta es adecuada para la circulación segura durante la noche. Asimismo, se evidencia una alta aceptación de este tipo de tecnología por sus beneficios ambientales y económicos, especialmente por la reducción del consumo energético y la eliminación de cableado aéreo, lo cual mejora la estética urbana.

## 5.2.2 comparación de las encuestas obtenidas y encuestas anteriores

Pregunta	ago-24		jun-25	
	BUENO	MALO	BUENO	MALO
Pregunta 1	76%	24%	67%	33%
Pregunta 2	71%	29%	63%	37%
Pregunta 3	70%	30%	80%	20%
Pregunta 4	71%	29%	90%	10%
Pregunta 5	87%	13%	87%	13%
Pregunta 6	69%	31%	43%	57%
Pregunta 7	72%	28%	73%	27%
Pregunta 8	90%	10%	57%	43%
Pregunta 9	90%	10%	87%	13%
Pregunta 10	90%	10%	87%	13%

**Tabla 5.1:** COMPARATIVA DE LAS ENCUESTAS REALIZADAS A LO LARGO DE LA AV. ELIA LIUT

En las encuestas realizadas aproximadamente el mes de agosto del año 2025, se tiene la tabla 5.1 que los niveles de satisfacción, confort y percepción de seguridad por parte de los usuarios eran notablemente altos. Este resultado puede atribuirse a que, en ese momento, las luminarias LED fotovoltaicas habían sido recién implementadas en la calle Elia Liut, lo que generó un impacto positivo inicial al tratarse de una tecnología novedosa para los transeúntes. Actualmente, según los datos obtenidos en las encuestas recientes, se observa que estos niveles no han disminuido de forma significativa. Por el contrario, se han estabilizado en valores que continúan siendo favorables, lo cual demuestra que el sistema mantiene un desempeño adecuado en términos de calidad de iluminación y aceptación ciudadana. Sin embargo, es importante considerar que, con el paso del tiempo, podría generarse una pérdida de percepción positiva si no se lleva a cabo un adecuado mantenimiento del sistema o si no se ajustan ciertos elementos en función del desgaste natural de los equipos. Por ello, se recomienda realizar monitoreos periódicos para asegurar que los niveles actuales de iluminación, confort y seguridad se mantengan, y que el sistema continúe cumpliendo con los estándares requeridos en el espacio público.

## CAPÍTULO 6

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 6.1 Conclusiones generales

El sistema de alumbrado público autónomo implementado en la avenida Elia Liut ha demostrado ser una solución eficiente, sostenible y alineada con las exigencias técnicas y sociales de un entorno urbano moderno. Desde la perspectiva normativa, el sistema cumple con los parámetros establecidos por los estándares ARCERNNR-007/23, CIE e ISO, alcanzando niveles promedio de iluminancia de 6,5 lx, luminancia de 0,39 cd/m<sup>2</sup> y una uniformidad de 0,29, valores que superan los mínimos requeridos para ciclovías y aceras. Esto garantiza condiciones óptimas de visibilidad, confort visual y seguridad para peatones y ciclistas, lo cual fue respaldado por la percepción favorable de los usuarios.

Desde el punto de vista energético, la simulación desarrollada evidenció que en condiciones de irradiancia mínima de 4048,10 Wh/m<sup>2</sup>, el sistema no logra reponer la energía consumida en el modo de operación 1 de 360 Wh/noche, provocando una caída progresiva del estado de carga de la batería y comprometiendo su autonomía. Sin embargo, en escenarios de irradiancia media y alta, se alcanza un 100 por ciento de carga antes culminar el día, logrando una autonomía operativa de hasta 2,4 días bajo esquemas de atenuación programada, lo que demuestra su viabilidad energética en condiciones favorables.

En cuanto a la percepción ciudadana, el 93 por ciento de los encuestados calificó positivamente la calidad de la iluminación, el diseño y el impacto ambiental del sistema. No obstante, se identificaron oportunidades de mejora en zonas críticas como intersecciones o cruces peatonales donde la sensación de seguridad disminuye levemente.

En síntesis, el sistema LED fotovoltaico instalado constituye una alternativa replicable y técnicamente viable para el alumbrado público con enfoque sostenible. Su desempeño integral puede mantenerse mediante un plan de mantenimiento preventivo, monitoreo constante y ajustes en puntos críticos, fortaleciendo así su funcionalidad, eficiencia y aceptación social.

## 6.2 Conclusiones por objetivo específico

- El análisis normativo comparativo entre RETILAP, INEN y la CIE permitió establecer criterios técnicos para ciclovías y aceras, como iluminancia mínima de 5 lx, luminancia de 0,3 cd/m<sup>2</sup> y uniformidad de 0,25. Las mediciones en campo arrojaron valores promedio de 6,5 lx de iluminancia, 0,39 cd/m<sup>2</sup> de luminancia, superando los mínimos exigidos por normativa. Además, el índice de reproducción cromática CRI se mantuvo por encima de 70, y la temperatura de 5000 k dentro del rango aceptable para confort visual. Estos resultados verifican que el sistema instalado no solo cumple, sino que supera los estándares requeridos, garantizando seguridad peatonal y visibilidad adecuada durante la noche.
- La simulación del sistema fotovoltaico realizada en MATLAB/Simulink, junto con los cálculos desarrollados en Excel, permitió analizar con precisión el comportamiento energético de un panel fotovoltaico de 80 W y una batería LiFePO<sub>4</sub> de 756 Wh, considerando escenarios de irradiancia mínima de 4048,10 Wh/m<sup>2</sup>, irradiancia media de 4668,17 Wh/m<sup>2</sup> e irradiancia máxima de 5610,70 Wh/m<sup>2</sup>. Se identificó que, bajo condiciones de irradiancia baja, el sistema no logra reponer la totalidad de la energía consumida en el Modo de operación 1,

el cual demanda 360 Wh por noche durante un ciclo de 12 horas. En este escenario, el estado de carga (SOC) de la batería presentó una disminución progresiva, comprometiendo la autonomía del sistema y evidenciando una ineficiencia operativa en días críticos.

No obstante, en escenarios de irradiancia media y alta, el sistema alcanza niveles de carga del 100 %, permitiendo una autonomía de hasta 2,4 días en modos de ahorro programado, lo que garantiza el mantenimiento del suministro energético incluso bajo condiciones climáticas adversas. Estas simulaciones respaldan la viabilidad energética del sistema, optimizando la relación entre generación, almacenamiento y consumo horario de potencia.

- A partir de las encuestas realizadas en la actualidad, se observa que los niveles de percepción en cuanto al confort visual y la seguridad vial presentan una tendencia mayoritariamente favorable, calificándose como buenos y muy buenos por parte de los usuarios. Esta valoración positiva posiciona a la calle Elia Liut como una de las zonas óptimas para la circulación tanto de ciclistas como de peatones, gracias a las condiciones adecuadas de iluminación durante el horario nocturno. Sin embargo, también se identificaron observaciones relevantes por parte de los usuarios en cuanto a la necesidad de mejorar la iluminación en cruces peatonales e intersecciones, donde la percepción de seguridad disminuye ligeramente. Este aspecto representa una oportunidad de mejora puntual para optimizar la experiencia de movilidad y reforzar la seguridad en puntos críticos del recorrido

### **6.3 Recomendaciones técnicas y sociales**

Considerando el análisis realizado sobre el sistema de iluminación LED fotovoltaica implementado en la calle Elia Liut, se sugiere fortalecer su aplicación en otros sectores urbanos, tomando en cuenta una serie de recomendaciones tanto técnicas como sociales que garanticen su eficacia y sostenibilidad a largo plazo. Desde el punto de vista técnico, se debe establecer un plan de mantenimiento periódico

para los paneles solares, ya que su superficie puede acumular polvo y sedimentos que afectan el rendimiento energético del sistema. Aunque las condiciones solares del Ecuador son favorables y no requieren ajustes complejos en la inclinación de los paneles, es recomendable realizar revisiones básicas de orientación en zonas con sombras o pendientes pronunciadas, a fin de maximizar la captación solar. Además, es importante supervisar regularmente los niveles de iluminación, especialmente en luminarias con sistemas de atenuación automática, para asegurar que se mantengan dentro de los estándares requeridos para visibilidad y seguridad. También se sugiere la verificación estructural periódica de postes, anclajes y elementos de soporte, con el fin de prevenir fallas mecánicas y extender la vida útil del sistema.

En cuanto al componente social, es fundamental atender los puntos críticos donde la percepción de seguridad es ambigua, como cruces peatonales e intersecciones, reforzando la iluminación en estas zonas para mejorar la visibilidad y la confianza de los usuarios. Asimismo, se recomienda fomentar el involucramiento ciudadano mediante campañas de concienciación sobre el uso responsable del mobiliario urbano, así como establecer canales accesibles para reportar fallos o deficiencias en la iluminación. La participación de la comunidad también debe considerarse en futuros procesos de implementación, permitiendo adaptar las soluciones técnicas a las necesidades reales del entorno. En conjunto, estas acciones permitirán consolidar el sistema de iluminación LED fotovoltaico como una estrategia urbana eficiente, sostenible y socialmente aceptada, contribuyendo a la mejora del espacio público y a la calidad de vida en la ciudad. Considerando el análisis realizado sobre el sistema de iluminación LED fotovoltaica implementado en la calle Elia Liut, se sugiere fortalecer su aplicación en otros sectores urbanos, tomando en cuenta una serie de recomendaciones tanto técnicas como sociales que garanticen su eficacia y sostenibilidad a largo plazo. Desde el punto de vista técnico, se debe establecer un plan de mantenimiento periódico para los paneles solares, ya que su superficie puede acumular polvo y sedimentos que afectan el rendimiento energético del sistema. Aunque las condiciones solares del Ecuador son favorables y no requieren ajustes complejos en la inclinación de los paneles, es recomendable realizar revisiones básicas de orientación en zonas con sombras o pendientes

pronunciadas, a fin de maximizar la captación solar. Además, es importante supervisar regularmente los niveles de iluminación, especialmente en luminarias con sistemas de atenuación automática, para asegurar que se mantengan dentro de los estándares requeridos para visibilidad y seguridad. También se sugiere la verificación estructural periódica de postes, anclajes y elementos de soporte, con el fin de prevenir fallas mecánicas y extender la vida útil del sistema. En cuanto al componente social, es fundamental atender los puntos críticos donde la percepción de seguridad es ambigua, como cruces peatonales e intersecciones, reforzando la iluminación en estas zonas para mejorar la visibilidad y la confianza de los usuarios. Asimismo, se recomienda fomentar el involucramiento ciudadano mediante campañas de concienciación sobre el uso responsable del mobiliario urbano, así como establecer canales accesibles para reportar fallos o deficiencias en la iluminación. La participación de la comunidad también debe considerarse en futuros procesos de implementación, permitiendo adaptar las soluciones técnicas a las necesidades reales del entorno. En conjunto, estas acciones permitirán consolidar el sistema de iluminación LED fotovoltaico como una estrategia urbana eficiente, sostenible y socialmente aceptada, contribuyendo a la mejora del espacio público y a la calidad de vida en la ciudad.

## **6.4 Proyecciones futuras del sistema**

El sistema de iluminación LED fotovoltaico se presenta como una solución altamente eficiente y sostenible para las necesidades actuales de alumbrado público en entornos urbanos. Su funcionamiento autónomo mediante energía solar, junto con la ausencia de cableado aéreo, lo convierten en una opción ideal para ciudades que buscan reducir su huella ambiental, optimizar el consumo energético y mejorar la estética del espacio público. Además de sus beneficios técnicos, como una mayor durabilidad, bajos costos de mantenimiento y eficiencia en la distribución lumínica, esta tecnología permite su aplicación flexible en espacios clave como aceras, ciclovías, parques y vías peatonales, donde la iluminación adecuada es esencial para garantizar la seguridad y el confort visual durante la noche.

En este sentido, se considera pertinente proyectar la expansión del sistema LED fotovoltaico hacia otros sectores de la ciudad, especialmente aquellos con infraestructura eléctrica limitada o condiciones donde la instalación convencional resulta compleja o costosa. Su implementación contribuiría a mejorar la calidad de vida urbana, promover entornos más seguros y fomentar el uso activo del espacio público incluso en horarios nocturnos.

Para garantizar, su efectividad a largo plazo se recomienda acompañar la instalación con planes de mantenimiento periódico, monitoreo técnico de niveles de iluminación y actualización tecnológica conforme avancen los estándares internacionales en eficiencia energética y diseño urbano.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] M. Caballero. *Instalaciones eléctricas interiores 2022*. Editex, 2022.
- [2] Sylvania. Guía técnica de iluminación. <https://www.sylvania-lighting.com>, 2021. Consultado en 2021.
- [3] P. Houser et al. Optimization of led lighting for clinical settings. *Lighting Research & Technology*, 47(8), 2015.
- [4] M. R. Luo. Chromaticity diagrams. In R. Luo, editor, *Encyclopedia of Color Science and Technology*. Springer, 2016.
- [5] P. García. *Energía solar fotovoltaica para todos*. Marcombo, 2022.
- [6] M. Pareja. *Energía solar fotovoltaica: 3a edición*. Marcombo, 2020.
- [7] F. Bernal. *Control de la iluminación*. Ediciones Paraninfo, 2019.
- [8] J. Pérez. Análisis de criterios para selección en tráfico. In *Congreso Internacional de Ingeniería (CIE)*, pages 123–130, Quito, Ecuador, 2014.
- [9] U.S. Department of Transportation. Guidelines for the implementation of reduced lighting on roadways. Technical report, Federal Highway Administration (FHWA), 2020.
- [10] RETILAP. Reglamento técnico de iluminación y alumbrado público. <https://surl1.li/ohrczb>, n.d.

- [11] Agencia de Regulación y Control de Energía y Recursos Naturales No Renovables. Regulación nro. arcernnr 007/23. Technical report, ARCERNNR, 2023.
- [12] Instituto Ecuatoriano de Normalización (INEN). Reglamento técnico ecuatoriano rte inen 004 (6<sup>a</sup> revisión) - eficiencia energética de productos que utilizan energía. <http://181.112.149.204/buzon/reglamentos/RTE-004-6.pdf>, 2013.
- [13] J. A. L. M. Ajila Chuchuca and J. A. Loaiza Mora. *Análisis de la eficiencia del sistema fotovoltaico para alumbrado público, aplicado a la calle Elia Liut entre Av. España y calle Vieja*. Tesis de grado, Universidad Politécnica Salesiana, Quito, Ecuador, 2024.
- [14] A. Korzeniowska and M. Konowrocki. Analysis of the spectral sensitivity of luxmeters and light sensors. *Energies*, 15(16):5847, August 2022. art. no. 5847.
- [15] M. M. Kamiński. The influence of a photometric distance on luminance measurements. *Energies*, 16(10):4166, May 2023. art. no. 4166.
- [16] X. Tang, J. Li, F. Sun, C. Dai, and H. Wei. Calibration method of spectroradiometer based on direct solar irradiance. *J. Opt.*, 53:1872–1881, September 2023.
- [17] LEDVANCE LATAM. Ficha técnica – solar streetlight latam (modelos 25w a 100w, con batería lifepo4 incluida). <https://www.ledvance.com>, December 2023. Ciudad de México: LEDVANCE® LATAM.
- [18] Narada Power Source Co., Ltd. Specification of lifepo4 battery 3.2v 18ah. <https://www.naradapower.com>, 2020. Zhejiang, China: Narada Group.
- [19] Jiuchun Jiang, Wei Shi, Jianming Zheng, Pengjian Zuo, Jie Xiao, Xilin Chen, Wu Xu, and Ji-Guang Zhang. Optimized operating range for large-format lifepo4/graphite batteries. *Journal of The Electrochemical Society*, 161(3):A336–A341, 2014.