



**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL**

**Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la  
Producción**

**“Optimización Energética en el Alumbrado Público: Transición  
hacia Luminarias LED en la Vía Ilumán-Agato, Otavalo”**

**PROYECTO DE TITULACIÓN**

**Previo a la obtención del Título de:**

**MAGÍSTER EN SISTEMAS DE ENERGÍA**

**Presentada por:**

**Marco Narvárez**

**GUAYAQUIL – ECUADOR**

**Año: 2024**

## **DEDICATORIA**

Este trabajo de titulación lo dedico a mi esposa que siempre está en los mejores y peores momentos, a mi familia por darme la vida y enseñarme los valores que siempre los tomo en cuenta para cumplir todas las metas que me he propuesto, y a las personas que ya no están junto a mí pero sé que desde el lugar donde están siempre me cuidan.

# **TRIBUNAL DE TITULACIÓN**

---

**JORGE ARAGUNDI R, Ph.D.**

**DIRECTOR DE PROYECTO**

---

**JUAN PERALTA J, Ph.D.**

**VOCAL**

## **DECLARACIÓN EXPRESA**

“La responsabilidad del contenido de este proyecto de titulación, me corresponden exclusivamente; y el patrimonio intelectual del mismo a la ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL”

---

Marco Narváez

# ÍNDICE DE CONTENIDO

1.	GENERALIDADES.....	1
1.1.	Antecedentes.....	1
1.2.	Problemática.....	3
1.3.	Objetivos.....	4
1.3.1.	Objetivo General.....	4
1.3.2.	Objetivos Específicos .....	4
1.4.	Alcance .....	4
2.	METODOLOGÍA.....	1
2.1.	Tipo y Diseño de Investigación .....	1
2.1.1.	Tipo de Investigación.....	1
2.1.2.	Diseño de Investigación .....	1
2.2.	Variables y Operacionalización .....	2
2.3.	Población y Muestra .....	3
2.3.1.	Población .....	3
2.3.2.	Muestra .....	3
2.4.	Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos .....	4
2.5.	Análisis Comparativo de Luminarias.....	4
2.5.1.	Iluminación LED.....	4
2.5.2.	Luminarias de Vapor de Sodio .....	8
2.5.3.	Comparación de Luminarias .....	11

2.5.4.	Gastos Energéticos .....	12
2.5.5.	Mantenimiento de Alumbrado Público .....	14
2.5.6.	Análisis de costos.....	16
2.6.	Marco Legal .....	20
2.6.1.	Legislación Internacional.....	20
2.6.2.	Legislación Nacional.....	21
3.	DESARROLLO Y RESULTADOS .....	23
3.1.	ANÁLISIS TECNICO Y ECONÓMICO DEL SISTEMA ACTUAL.....	23
3.2.	MODELO MATEMATICO .....	29
3.3.	ALGORITMOS DE OPTIMIZACION DEL SISTEMA .....	33
3.4.	COMPARACIÓN DE RESULTADOS .....	44
4.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	53

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Luminaria LED para alumbrado público (Otorongo, 2021). .....	5
<b>Figura 2.</b> Chip de luminaria LED (Otorongo, 2021). .....	5
<b>Figura 3.</b> Driver de luminaria LED (Otorongo, 2021). .....	6
<b>Figura 4.</b> Composición de una luminaria LED (Otorongo, 2021). .....	7
<b>Figura 5.</b> Conjunto óptico para luminaria LED (Otorongo, 2021). .....	7
<b>Figura 6.</b> Luminaria de vapor de sodio a baja presión (Cóndor, 2018). .....	9
<b>Figura 7.</b> Luminaria de vapor de sodio de alta presión (Cóndor, 2018). .....	9
<b>Figura 8.</b> Curvas de mantenimiento de luminarias comerciales (M. Rivadeneira, 2015). .	14
<b>Figura 9.</b> Tramo 1 - Vía Ilumán - Agato .....	23
<b>Figura 10.</b> Tramo 2 Vía Ilumán – Agato .....	24
<b>Figura 11</b> Tramo 3 - vía Ilumán - Agato.....	25
<b>Figura 12.</b> Luminaria Lumec Lum Olympia 1 de la vía Ilumán Agato (INPROEL, 2023) ...	27
<b>Figura 13.</b> Ficha Técnica de las Luminarias de la vía Ilumán Agato. ....	27
<b>Figura 14.</b> Cuadrícula de Medición de Iluminación Vial IEC 140 - 2000 .....	28
<b>Figura 15.</b> Simulación de Iluminación Vial en Dialux .....	33
<b>Figura 16.</b> Características de la Luminaria LED LUG.....	35
<b>Figura 17.</b> Diagrama de Ponderación por Escenarios de Prueba en Vapor de Sodio.....	40
<b>Figura 18.</b> Diagrama de Barras de Suma Ponderadas para Luminarias de Vapor de Sodio .....	41
<b>Figura 19.</b> Diagrama de Matriz de Ponderaciones del Sistema de Iluminación LED .....	42

<b>Figura 20.</b> Diagrama de Barras De Sumatoria Poderada para Luminarias LED .....	43
<b>Figura 21.</b> Parámetros de Luminaria de Vapor Escenario 5.....	45
<b>Figura 22.</b> Características del Escenario 3 para Iluminación LED Dialux .....	47
<b>Figura 23.</b> Código AMPL de Datos luminarias.dat .....	50
<b>Figura 24.</b> Código AMPL Modelo luminarias.mod.....	51
<b>Figura 25.</b> Código AMPL de Ejecución luminarias.run .....	51
<b>Figura 26.</b> Respuesta Óptima AMPL del Modelo de Luminarias .....	51



## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> <i>Operacionalización de Variables</i> .....	2
<b>Tabla 2.</b> <i>Cantidad y Tipos de Luminarias Instaladas en el Ecuador</i> .....	10
<b>Tabla 3.</b> <i>Comparación entre luminarias LED y VSAP</i> .....	11
<b>Tabla 4.</b> <i>Consumo energético en Ecuador 2018</i> .....	12
<b>Tabla 5.</b> <i>Tipos de luminarias instaladas en Ecuador</i> .....	13
<b>Tabla 6.</b> <i>Costo de la mano de obra</i> .....	16
<b>Tabla 7.</b> <i>Costo de Uniformes y EPP</i> .....	17
<b>Tabla 8.</b> <i>Costo de maquinaria y equipos</i> .....	17
<b>Tabla 9.</b> <i>Costo de transporte</i> .....	18
<b>Tabla 10.</b> <i>Coste de luminarias</i> .....	19
<b>Tabla 11.</b> <i>Costo total</i> .....	19
<b>Tabla 12.</b> <i>Ahorro mensual por cambio de luminaria</i> .....	20
<b>Tabla 13.</b> <i>Amortización aproximada de la inversión</i> .....	20
<b>Tabla 14.</b> <i>Características Principales de la vía Ilumán - Agato</i> .....	26
<b>Tabla 15.</b> <i>Medidas de iluminación en tramo de la vía Ilumán Agato</i> .....	28
<b>Tabla 16.</b> <i>Costo Total del Estado Actual del Sistema</i> .....	29
<b>Tabla 17.</b> <i>Datos para Optimización de Luminaria de Vapor de Sodio</i> .....	34
<b>Tabla 18.</b> <i>Datos para Optimización de Luminarias LED</i> .....	36
<b>Tabla 19.</b> <i>Pseudocódigo de Algoritmo Multicriterio Basado en Ponderaciones</i> .....	39
<b>Tabla 20.</b> <i>Características de Sistemas Ganadores para Ambas Luminarias</i> .....	44

<b>Tabla 21.</b> <i>Resultados de Iluminación en Dialux del Escenario 5 – Vapor de Sodio</i> .....	46
<b>Tabla 22.</b> <i>Resultados de Eficiencia Energética en Dialux para Escenario 5</i> .....	46
<b>Tabla 23.</b> <i>Resultados Luminotécnicos Obtenidos por el Software Dialux en Escenario 3 - LED</i> .....	48
<b>Tabla 24.</b> <i>Resultado de Consumo de Energía en Luminaria LED - Escenario 5 - Dialux</i> .	48
<b>Tabla 25.</b> <i>Parámetros de Consumo y Costo de los Escenarios Ganadores</i> .....	49
<b>Tabla 26.</b> <i>Resultados de Eficiencia y Ahorro de Luminarias LED</i> .....	52

## RESUMEN

Actualmente, la eficiencia energética en el alumbrado público ha permitido el desarrollo de modelos de optimización destinados a mejorar las instalaciones correspondientes a este tipo de sistemas. En este estudio, se ha diseñado un modelo matemático para determinar el tipo de luminaria óptimo para la vía Ilumán - Agato, ubicada en la provincia de Imbabura, Ecuador. Se realizó un análisis, tanto económico como técnico, de diversas opciones de luminarias, considerando sus parámetros y la normativa aplicable en la región. Asimismo, se crearon escenarios de prueba utilizando el software Dialux, evaluando dos tipos de luminarias: vapor de sodio de 150W y LED de 102W. Mediante la extracción de datos, se evaluaron criterios como el nivel de iluminación, costo, factor de uniformidad, deslumbramiento y eficiencia de cada luminaria. Utilizando MATLAB, se generaron ponderaciones para determinar el escenario de prueba con mejores condiciones o que cumplan con cada uno de los criterios. Posteriormente, se implementó un segundo modelo utilizando el software AMPL, que optimizó el costo del sistema de alumbrado en ambos modelos. Los resultados indicaron que las luminarias LED minimizaban la función objetivo del sistema, generando un ahorro de 71,680 kWh y \$7,16.

# CAPÍTULO I

## 1. GENERALIDADES

### 1.1. Antecedentes

La eficiencia energética en el alumbrado público se ha convertido en un estudio de impacto a nivel internacional debido a los beneficios ambientales y económicos. Con el incremento de la concientización por la sostenibilidad, los países han adoptado medidas para reducir el consumo energético y las emisiones de carbono asociadas al alumbrado. En Ecuador, se han implementado diversas iniciativas para mejorar la eficiencia del alumbrado público, incluyendo la introducción de tecnologías LED y la actualización de infraestructuras obsoletas. Estas iniciativas permiten la reducción de los costos operativos, así como, incentivan a generar entornos más seguros y sostenibles para los ciudadanos. Sin embargo, la situación actual de las luminarias en el país enfrenta una serie de obstáculos, como la desactualización de equipos y la falta de mantenimiento adecuado, lo que limita su eficiencia y confiabilidad a largo plazo.

EMELNORTE es una empresa pública ubicada en el norte del país, su área de cobertura son 5 provincias de las tres regiones del país, Esmeraldas, Sucumbíos, Pichincha, Carchi e Imbabura, sirven a 269 252 abonados con una extensión de 11 862,1 km. Los usuarios que se benefician de este servicio son de diferentes etnias como indígenas, afro ecuatorianos, mestizos y awá, una parte de esta población viven en lugares de difícil acceso lo cual dificulta brindar el servicio de energía eléctrica a toda el área de cobertura. Pero implementar nuevas fuentes de energía nos permite alcanzar los objetivos que se plantean en IRENA 2021 para el año 2050, en donde se manifiesta que la electricidad será el principal proveedor energético. Todo ecuatoriano tiene la facultad para solicitar este servicio y la empresa distribuidora debe buscar las soluciones necesarias para satisfacer la necesidad. Al tener una necesidad presente en esta problemática se le puede definir como un problema social.

EMELNORTE al prestar el servicio de alumbrado público debe cumplir con las responsabilidades establecidas en la regulación Nro. ARCERNNR 007/23, por lo cual deberá: planificar, administrar, operar, mantener y expandir el servicio de alumbrado público general a fin de cubrir la demanda en su área de servicio, en coordinación con los GAD, el

MTOP, Policía Nacional o Autoridad de Tránsito Competente, en los casos que corresponda; cumplir y reportar a la ARCERNNR los índices de calidad y continuidad de la prestación del servicio de alumbrado público general, de conformidad a lo señalado en la presente regulación; otra condición establecida por el organismo de control es recaudar el valor correspondiente por concepto del servicio de alumbrado público general de forma mensual (Ministerio de Energía y Recursos del Ecuador, 2022).

Al cumplir la regulación que establecen los organismos de control, en el Art. 413 de la Constitución de la República del Ecuador determina que se debe garantizar un servicio con conciencia ambiental que permita la reducción de la emisión de dióxido de carbono CO<sub>2</sub> y consumo de energía.

La tarifa que los usuarios pagan por el alumbrado público, no se ha incrementado. La ARCERNNR ha realizado un análisis de tarifas y de cobertura de costos y, por primera vez, ha establecido un pliego tarifario para este servicio, considerando criterios de equidad, eficiencia energética y sostenibilidad. Con ello se busca que quienes más consumen, paguen más por este servicio.

EMELNORTE tiene un 98,40% de cobertura de servicios de toda su área de concesión con 115 837 luminarias instaladas de dos tipos led y sodio que suman en su totalidad una potencia de 16 270,02 kW. La potencia consumida representa el problema social y energético que se desea resolver a través de la eficiencia energética que hoy en día brinda beneficios económicos y ambientales con respecto la generación de energía eléctrica.

Todos los usuarios al consumir energía gozan de este beneficio porque cancelan su planilla cada mes, pero no se analiza que el valor pagado de alumbrado público representa un consumo de energía que a corto y largo plazo afecta al medio ambiente y a la eficiencia energética del sistema eléctrico (Ministerio de Energía y Recursos del Ecuador, 2022).

Las empresas distribuidoras de energía eléctrica deberían contar con una eficiencia energética o encaminarse a mejorar los sistemas de distribución para que los resultados en cualquier actividad sean empleando la menor cantidad de recursos energéticos. Existe un elevado consumo de energía del Alumbrado Público por la falta de implementación de otras fuentes de energía incorporadas para incentivar el ahorro de energía.

## 1.2. Problemática

La problemática asociada al análisis de optimización en el alumbrado público se centra en la necesidad de reducir el consumo de energía eléctrica sin comprometer la calidad de la iluminación, un aspecto esencial para brindar seguridad y comodidad a la población. Esta problemática se intensifica al considerar que el servicio de alumbrado público impacta tanto en la calidad de vida de la población Otavaleña como en el cuidado del medio ambiente. Aunque se reconoce la importancia de transitar hacia tecnologías más eficientes como las luminarias LED, persiste la dificultad en implementar esta transición debido a barreras económicas y a la falta de conciencia social y compromiso para adoptar medidas que promuevan la eficiencia energética. En estudios como en el de Tapia (2024), se analizan los aspectos técnicos y económicos para determinar la viabilidad del cambio de luminarias convencionales por LED en la provincia de Cotopaxi, obteniendo como resultados que exista un ahorro a lo largo de la operación considerando 25 años, para el cambio de luminarias de 125W y 400W, sin embargo, para otras potencias no se compensa la transición.

Esta investigación busca generar conciencia social acerca del impacto negativo de un alto consumo de energía en el medio ambiente, al contribuir con emisiones de gases de efecto invernadero y afectar la calidad de vida. Se destaca la importancia de mejorar la eficiencia en el uso de energía en el alumbrado público, no solo para ahorrar dinero y reducir la demanda energética, sino también para mitigar la contaminación ambiental dentro de la economía del país. Esto se alinea con dos de los Objetivos de Desarrollo Sostenible en su Agenda 2023; el primero indica en el objetivo 7 que indica “Garantizar el acceso a energía asequible, fiable, sostenible y moderna para todos”; mientras que el objetivo 13 indica que se debe “Adoptar medidas urgentes para combatir el cambio climático y sus efectos”.

A pesar de los esfuerzos gubernamentales por incentivar la eficiencia energética, persiste la falta de compromiso social en la implementación de programas y proyectos destinados a optimizar el uso de energía. Esto plantea un desafío adicional en la transición hacia un sistema de alumbrado público más eficiente y sostenible, ya que se requiere una mayor conciencia colectiva y compromiso por parte de la sociedad para adoptar medidas que promuevan una transición energética efectiva.

### **1.3. Objetivos**

#### **1.3.1. Objetivo General**

Determinar la tecnología lumínica más eficiente y adecuada, entre luminarias LED y de vapor de sodio, mediante técnicas de optimización matemática para la vía Ilumán-Agato, ubicada en la ciudad de Otavalo.

#### **1.3.2. Objetivos Específicos**

- Caracterizar las técnicas de cada luminaria mediante la búsqueda de información de proveedores y regulaciones.
- Analizar costos a largo plazo de operación para ambas tecnologías lumínicas
- Desarrollar un modelo matemático que evalúe la tecnología más eficiente en la vía Ilumán-Agato.

### **1.4. Alcance**

El alcance de este análisis exhaustivo se centra en comparar la eficiencia energética entre las luminarias LED y las de vapor de sodio para el alumbrado público, Para ello, se empleará una función objetivo que maximice la eficiencia en el uso de la energía eléctrica, considerando aspectos de costos, consumo y durabilidad. Las ecuaciones que representan la función objetivo y las restricciones estarán diseñadas para cuantificar la eficiencia y determinar la mejor opción en términos de uso sostenible de energía eléctrica.

La función objetivo estará orientada a maximizar la eficiencia energética, minimizando el consumo de energía total a lo largo de la vida útil de las luminarias. Esta función se expresará como una combinación ponderada de los costos totales, el consumo de energía y los costos de mantenimiento de las luminarias LED y de vapor de sodio. Se utilizarán ecuaciones que modelen la relación entre estos factores para obtener una métrica cuantitativa de eficiencia energética.

Las restricciones se fundamentarán en criterios rigurosos, incluyendo límites máximos de consumo energético permitido, presupuestos disponibles para la adquisición e instalación de las luminarias, así como la exigencia de una vida útil mínima requerida para garantizar la durabilidad de las luminarias. Se plantearán restricciones matemáticas precisas que

permitan comparar los resultados obtenidos con los estándares de eficiencia energética y las regulaciones vigentes en el campo de la electricidad.

Para lograr este análisis, se emplearán modelos matemáticos complejos que integren la función objetivo y las restricciones planteadas. Estos modelos serán elaborados teniendo en cuenta la interrelación entre los diferentes parámetros, considerando las especificidades técnicas y las tendencias actuales en la eficiencia energética en el campo de la iluminación pública. El objetivo es proporcionar una evaluación profunda y precisa que contribuya al desarrollo de estrategias sostenibles en el uso de la energía eléctrica para el alumbrado público.

Por esta razón se plantea el desarrollo del presente estudio, planteando conseguir un beneficio para las entidades encargadas de la distribución e instalación de luminaria pública, en este caso EMELNORTE, logrando mejorar el sistema actual que poseen e incentivan la transición hacia fuentes de luz con mayor eficiencia. Así también, se considera como beneficiarios directos los habitantes de la zona que une la vía Ilumán-Agato, así como los conductores usuarios de la vía en mención. Este estudio permitirá conseguir beneficios económicos y sociales que ayudarán al desarrollo sostenible de la región.



# **CAPÍTULO II**

## **2. METODOLOGÍA**

### **2.1. Tipo y Diseño de Investigación**

#### **2.1.1. Tipo de Investigación**

Para la investigación sobre la optimización y análisis técnico - económico en el alumbrado público de la vía Ilumán - Agato en el cantón Otavalo, se empleará un enfoque metodológico mixto que combine tanto métodos cuantitativos como cualitativos. En la fase cuantitativa, se llevará a cabo un análisis exhaustivo de datos financieros y técnicos relacionados con la implementación y operación del sistema de alumbrado público. Esto incluirá evaluaciones detalladas de costos de instalación, mantenimiento y consumo energético utilizando herramientas de análisis económico. En la fase cualitativa, se realizarán una búsqueda de información comparativa con proyectos similares para identificar factores comunes y así lograr evaluar el modelo obtenido. La combinación de estos tipos de investigación permitirá obtener resultados sólidos que servirán como base para la interpretación de los resultados de la optimización del alumbrado público generada.

#### **2.1.2. Diseño de Investigación**

El diseño de investigación se basa en un enfoque cuasi experimental con un diseño de grupo único pre y post optimización. En la fase pre experimental, se delimita el área de estudio y se identifican las variables importantes para el modelo matemático. La fase experimental implica la implementación del nuevo sistema de alumbrado, seguido de la recopilación de datos de la situación actual. Posteriormente, en la fase post experimental, se obtienen datos de la optimización para evaluar cambios y mejoras en el sistema. El análisis comparativo de estos datos permitirá evaluar la eficacia y eficiencia del nuevo sistema, para posteriormente realizar las fases analítica e interpretativa, mismas que involucrarán un análisis estadístico y cualitativo de los resultados obtenidos en la optimización. Finalmente, se realizarán las conclusiones y recomendaciones que se basan en los hallazgos para estructurar las posibles mejorar y futuras optimizaciones del alumbrado público en la mencionada vía. Este diseño integral busca ofrecer una perspectiva completa que incorpore tanto aspectos técnicos como económicos para la empresa encargada del servicio.

## 2.2. Variables y Operacionalización

Para poder realizar la presente investigación de análisis y optimización de alumbrado público se han considerado las siguientes variables:

- Dependiente: Costos de implementación, consumo energético.
- Independiente: Análisis Técnico Económico del Sistema.

**Tabla 1.**

*Operacionalización de Variables*

Variables	Definición		Dimensiones	Indicadores
	Conceptual	Operacional		
Análisis Técnico Económico del Sistema (Independiente)	Se refiere a la iluminación de espacios y áreas públicas, como calles, plazas, parques y otros lugares de acceso común, con el propósito de proporcionar visibilidad y seguridad durante las horas de oscuridad.	Implica la implementación práctica y medible del sistema de alumbrado para su estudio o aplicación específica dentro del contexto analizado, es decir tomando en cuenta las variables del sistema.	Costos de Instalación Consumo Energético Costos de Mantenimiento	Inversión Vatio hora Gastos Operativos
Optimización del Sistema (Dependiente)	Consiste en mejorar y perfeccionar un sistema existente para que funcione de	Se refiere a la comparación de los diferentes tipos de luminarias, considerando costos, tecnología y	Costo Total Diferencias Técnicas	Cantidad Relación de Consumo

	manera más eficiente, efectiva o económica, para lograr un rendimiento óptimo en relación con ciertos criterios y objetivos específicos.	características técnicas dentro del sistema de alumbrado analizado.	Eficiencia de Recursos	Retorno de Inversión
--	--	---	------------------------	----------------------

## 2.3. Población y Muestra

### 2.3.1. Población

La selección de los postes de alumbrado público como la población de interés para el presente estudio se fundamenta en la necesidad de focalizar la investigación en los componentes esenciales del sistema lumínico a lo largo de la vía Ilumán - Agato. La cantidad de 3,23 kilómetros de vía se considera como una muestra manejable que, a su vez, permite la evaluación detallada de la infraestructura actual. Al enfocarse en estos como la población de estudio, se busca obtener información específica sobre la tecnología de iluminación utilizada, la distribución geográfica, los costos de operación y otros factores relevantes que impactan directamente en la optimización del sistema lumínico en la vía Ilumán - Agato.

### 2.3.2. Muestra

Se selecciona una muestra representativa de estos 3,23 kilómetros, considerando la distribución geográfica a lo largo de la vía y cualquier variabilidad en términos de tecnología, antigüedad u otros factores relevantes. Como los postes ubicados en este kilometraje de vía ocupan la misma tecnología y la cantidad no referente a la población no es muy alta se considera a la población igual que la muestra es decir 3,23 kilómetros. Al considerar en la población y muestra de kilómetros, postes y luminarias de la vía en su totalidad, se puede obtener información específica sobre cada elemento del sistema de alumbrado público, permitiendo realizar un análisis más detallado y específico.

## **2.4. Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos**

Para llevar a cabo la recolección de datos sobre la optimización y análisis técnico económico en el alumbrado público de la vía Ilumán - Agato, se utilizan diversas técnicas e instrumentos como son los siguientes:

- **Observación Directa:** Observaciones en el sitio para recopilar datos sobre el estado actual de los postes, la distribución de la iluminación, y posibles problemas operativos. Se puede utilizar una lista de verificación estructurada para registrar observaciones específicas sobre cada poste.
- **Análisis de Documentos:** Se Revisan documentos técnicos, informes de mantenimiento y registros financieros para obtener datos sobre los costos operativos y el rendimiento del sistema. Se puede aplicar una lista de control para identificar y registrar información relevante en los documentos analizados.
- **Medición de Parámetros Técnicos:** Se utilizan equipos de medición para evaluar parámetros técnicos como el consumo de energía, la intensidad lumínica y la eficiencia de los postes. Estos equipos son medidores de energía, luxómetros u otros dispositivos de medición técnica.

## **2.5. Análisis Comparativo de Luminarias**

### **2.5.1. Iluminación LED**

La tecnología LED se basa en la excitación de elementos semiconductores llamados diodos emisores de luz (LED), de manera que estos desprendan fotones y por consiguiente se consigue una generación de luz directa.

Este tipo de tecnología no se compone únicamente con uno solo de estos diodos emisores de luz ya que estos mismos son una fuente de luz de baja intensidad por lo mismo lo que se emplea son arreglos de varios de estos componentes de manera que se genere una mayor intensidad luminosa (Otorongo, 2021).

**Figura 1.** *Luminaria LED para alumbrado público.*



Fuente: (Otorongo, 2021).

Los sistemas de Alumbrado Público con LED, están conformados por distintos componentes integrados en la luminaria los cuales son:

- **Chip**

Es el elemento principal de la tecnología LED ya que este mismo define algunas características principales de la luminaria como lo son: la calidad, durabilidad y consumo energético. (Otorongo, 2021)

**Figura 2.** *Chip de luminaria LED.*



Fuente: (Otorongo, 2021).

- **Driver**

Los diodos emisores de luz que permiten la generación de fotones, funcionan con corriente directa (DC), mientras que la alimentación normal de los sistemas de iluminación es de corriente alterna (AC), es necesaria la implementación de un dispositivo de conversión que en este caso es el driver, otra de las ventajas de este dispositivo es que permiten mantener voltaje constante y evitar las atenuaciones.

Este es el elemento que produce pérdidas en forma de calor ya que la conversión de los tipos de voltaje normalmente ocupa elementos que absorben calor. Pero se busca que estos elementos tengan la menor cantidad de pérdidas y que se tenga una eficiencia lo más cerca al 100%. (Otorongo, 2021)

**Figura 3.** *Driver de luminaria LED.*



Fuente: (Otorongo, 2021).

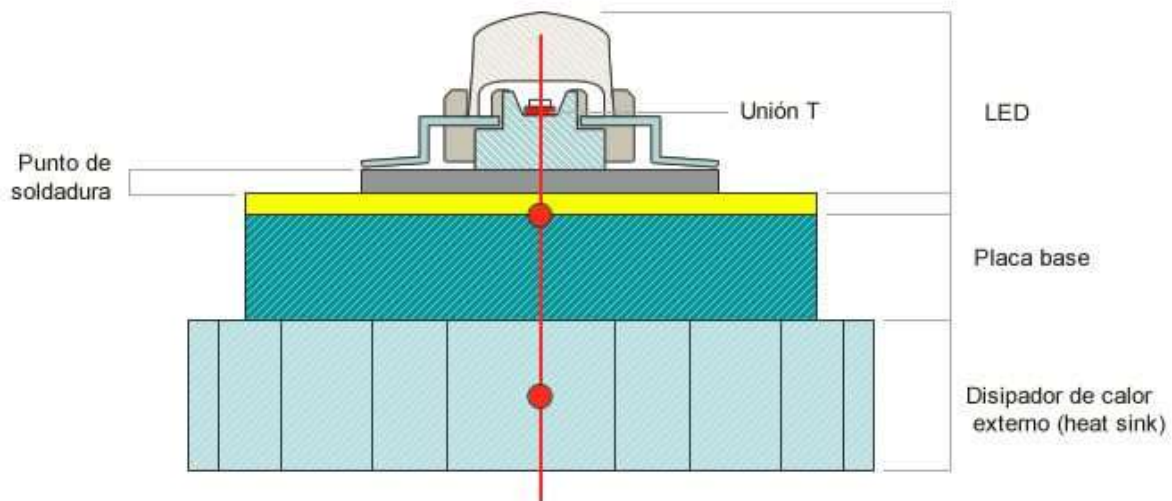
- **Placa Base**

Se llama de esta manera a la zona de conexiones donde se encuentran conectados todos los elementos tanto del chip, como del driver, además de que el sistema de disipación de calor se encuentra también adjunta a esta.

- **Sistema de disipación de calor**

Es un sistema mecánico que sirve para reducir el calor producido por los elementos que conforman a la luminaria led.

**Figura 4.** *Composición de una luminaria LED.*



Fuente: (Otorongo, 2021).

- **Conjunto óptico**

Es un sistema que mejora la eficiencia de la luminaria a través de fenómenos físicos de reflexión y refracción, usando lentes que permitan modificar el haz de luz original de modo que este se amplifique y que la luminaria pueda cumplir con las características de iluminación requeridas en proyectos de Alumbrado público. (Otorongo, 2021)

**Figura 5.** *Conjunto óptico para luminaria LED.*



Fuente: (Otorongo, 2021).

Entre las principales pérdidas que se generan en este tipo de tecnología, corresponde al uso de componentes como balastos o electrónica de control, que son indispensables para

el correcto funcionamiento de este tipo de luminarias. Este tipo de pérdidas son constantes y son provocadas por el efecto Joule que consiste en la circulación de corriente dentro de la bobina del balastro.

Según la Regulación Nro. ARCERNNR 006/20 elaborada por la misma entidad, se indica que las instituciones, entidades, consumidores y usuarios del alumbrado público, deben obligatoriamente instalar equipos que cumplan con las políticas, consideraciones de eficiencia energética y la normativa de homologación entregada por el ministerio correspondiente. Por este tipo de regulaciones, las empresas encargadas de la distribución eléctrica se rigen a los valores regulados de máximo de pérdidas que constan en la ficha técnica de cada tipo de luminaria.

En tiempos más recientes se busca la migración a esta tecnología en varios sectores públicos y privados, debido a su alta eficiencia y a que presenta una mayor vida útil de alrededor de 50 000 horas o más.

En el alumbrado público se generan diversos tipos de pérdidas, mismas que se pueden identificar como técnicas y no técnicas, siendo las primeras las que dependen del tipo de luminaria que se encuentre en funcionamiento, en donde se considera la tecnología LED como las que presentan un porcentaje de pérdidas menor que otro tipo de luminarias. Luminarias de Vapor de Sodio.

En la Ciudad de Quito a través de la Empresa Eléctrica Quito se encuentran realizando proyectos para realizar la sustitución de las luminarias actualmente instaladas, se plantea el proceso de reemplazo de 41 500 luminarias de VSAP de 150W por luminarias de tecnología LED. Este tipo de cambio se realiza al tomar en consideración aspectos como la eficiencia de este tipo de tecnología, y reducir costos tanto en mantenimiento como por el consumo general de energía. (Empresa Eléctrica Quito, 2023)

### **2.5.2. Luminarias de Vapor de Sodio**

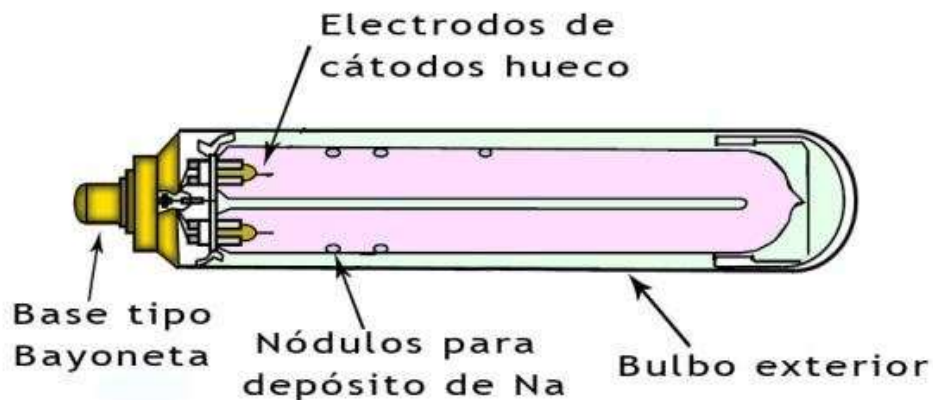
Son las luminarias más utilizadas para sistemas de alumbrado público y de estacionamientos, debido a que presentan una gran eficiencia  $\text{lm/W}$  (lumen por vatio). Existen dos tipos de luminarias de Vapor de Sodio:

Vapor de Sodio a baja presión: Su funcionamiento se produce debido al paso de corriente eléctrica por un tubo de vapor de sodio a baja presión, estas lámparas presentan



principalmente un color amarillento y esto es uno de los principales motivos por el cual no es tan utilizada, ya que tiene una pobre reproducción cromática y un rendimiento de colores muy bajo. (J. Wolf, 2013) (Córdor, 2018) (M. Quichimbo, 2012)

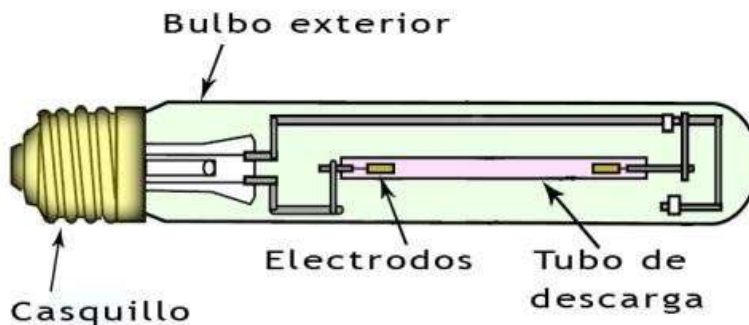
**Figura 6.** *Luminaria de vapor de sodio a baja presión.*



Fuente: (Córdor, 2018).

Vapor de Sodio de alta presión (VSAP): Estas lámparas tienen una eficiencia menor que las de baja de presión, pero lo compensan con una reproducción cromática mayor, esto la permite que se pueda usar en mayores aplicaciones, y también es lo que permite que se pueda usar en aplicaciones de alumbrado público. A pesar de su disminución en rendimiento siguen teniendo de los rendimientos más altos a comparación de otras tecnologías de iluminación. (J. Wolf, 2013) (Córdor, 2018) (M. Quichimbo, 2012)

**Figura 7.** *Luminaria de vapor de sodio de alta presión.*



Fuente: (Córdor, 2018).

En el año 2017 ARCONEL, indica que existen 1 412,685 luminarias, de las cuales el 90,6% son de vapor de sodio y el 0.9% corresponden a luminarias Led tal y como se observa en la **Tabla 2** (M. Quichimbo, 2012).

**Tabla 2.**

*Cantidad y Tipos de Luminarias Instaladas en el Ecuador*

Tipo de Luminaria	Potencia	Cantidad (U)	Participación (%)	Potencia Total (kW)	Participación (%)
Vapor de Mercurio	100 W	288	0,0%	33	0,0%
	125 W	23288	1,6%	3275	1,3%
	175 W	22671	1,6%	4613	1,8%
	250 W	3153	0,2%	921	0,4%
	400 W	1498	0,1%	673	0,3%
Otros		3259	0,2%	450	0,2%
<b>Subtotal</b>		54157	3,7%	9965	4,0%
Vapor de Sodio	70 W	147791	1,5%	12437	4,8%
	100 W	482387	34,1%	56601	21,8%
	150 W	349429	24,7%	59569	22,9%
	175 W	33	0,0%	7	0,0%
	250 W	232366	16,4%	66896	25,7%
	400 W	72633	5,1%	32693	12,6%
Otros		128	0,0%	10	0,0%
<b>Subtotal</b>		1284767	90,8%	228213	87,8%
LED	50 W	455	0,1%	25	0,0%
	60 W	385	0,1%	24	0,0%
	70 W	811	0,1%	61	0,0%
	90 W	1504	0,1%	147	0,1%
	100 W	745	0,1%	80	0,0%
	114 W	3175	0,2%	366	0,1%
	150 W	512	0,1%	81	0,0%
	180 W	1021	0,1%	203	0,1%
Otros		4752	0,3%	141	0,1%
<b>Subtotal</b>		13360	1,2%	1128	0,3%
Otras Tecnologías		60462	4,3%	20532	7,9%
<b>TOTAL</b>		1412746	100,0%	259838	100,0%

*Nota. (Cóndor, 2018)*

### 2.5.3. Comparación de Luminarias

A continuación, se muestra una comparativa entre las luminarias de alumbrado público, donde se muestra la tecnología más utilizada en Ecuador que es de VSAP, en contra de la tecnología a la cual se desee migrar la cual es la LED, considerando factores como la potencia, vida útil, temperatura de funcionamiento, eficiencia, etc. (Montero, 2016). En la **Tabla 3** se muestra la información técnica entre las luminarias LED y las VSAP utilizadas en alumbrado público. La diferencia de potencia es de 150 W, generando un menor consumo la tecnología LED, así como una mayor cantidad de horas de vida útil para esta tecnología. Por otro lado, la tecnología VSAP posee una mayor temperatura de funcionamiento, así como una mayor eficiencia con un rango de 80 a 130 lúmenes por watt.

**Tabla 3.**

*Comparación entre luminarias LED y VSAP.*

<b>Luminarias para alumbrado público</b>		
<b>Características/Tipo de tecnología</b>	<b>LED</b>	<b>VSAP</b>
<b>Potencia nominal (W)</b>	100	250
<b>Potencia Consumida (W)</b>	100	300
<b>Factor de potencia</b>	0,98	0,92
<b>Temperatura de funcionamiento (°C)</b>	40	350
<b>Vida útil (horas)</b>	>50 000	10 000-28 000

<b>Tiempo de encendido (min)</b>	0	5-10
<b>Eficiencia (lm/W)</b>	>60	80-130

*Nota.* (Montero, 2016)

#### 2.5.4. Gastos Energéticos

En lo que respecta a gastos energéticos no se tiene un valor preciso del costo real del alumbrado público, pero a través de información pública como la cantidad de energía utilizada por los diferentes sectores públicos, se tiene un valor de GWh consumidos en Alumbrado Público. (Ministerio de Energía y Recursos del Ecuador, 2022)

**Tabla 4.**

*Consumo energético en Ecuador 2018.*

<b>Consumo de Energía para Servicio Público</b>		<b>GWh</b>	<b>%</b>
<b>Consumo de Energía a Nivel Nacional</b>	<b>Residencial</b>	7400,27	31,17%
	<b>Comercial</b>	3831,65	16,14%
	<b>Industrial</b>	6142,01	25,87%
	<b>A. Público</b>	1310,36	5,52%
	<b>Otros</b>	2367,71	9,97%
<b>Total</b>		21052,00	88,67%

*Nota.* (Ministerio de Energía y Recursos del Ecuador, 2022)

De los 1 310,36 GWh destinados al alumbrado público a través del precio normal de la energía eléctrica en Ecuador que es de 8,58 cUSD/kWh, se puede obtener una estimación del gasto energético durante el año 2018, con un valor de aproximadamente \$152 722,61 USD. (Ministerio de Energía y Recursos del Ecuador, 2022)

En la siguiente tabla se muestra las cantidades y las tecnologías de las luminarias publicas instaladas en Ecuador hasta el año 2020. Donde entre lo más relevante a destacar se encuentra que en su mayoría se utiliza tecnología VSAP, para el alumbrado público, lo cual directamente incide en un incremento del costo energético ya que estas luminarias tienen

una menor eficiencia a largo plazo, además de tener una vida útil más corta. (R. A. Ayala, 2020)

**Tabla 5.**

*Tipos de luminarias instaladas en Ecuador.*

Empresa	Tipo de Luminaria						Total
	Metálico Halógeno	Inducción	Led	Mercurio	No Existe DN	Sodio	
CNEL Bolívar	1	0	198	1417	0	17797	19413
CNEL El Oro	3050	0	3486	3162	0	76612	86310
CNEL Esmeraldas	0	0	873	939	2421	44458	48691
CNEL Guayaquil	5880	0	1688	16755	0	150999	175322
CNEL Guayas Los Ríos	118	0	799	1687	0	94657	97261
CNEL Los Ríos	0	0	655	1167	11	29686	31519
CNEL Manabí	0	0	948	9287	38	92266	102539
CNEL Milagro	240	0	1436	3267	0	41935	46878
CNEL Sta. Elena	0	0	206	421	11	44924	45562
CNEL Sto. Domingo	27	0	3470	1649	0	69834	74980
CNEL Sucumbíos	15	0	541	139	0	48229	48924
EE Ambato	103	0	6331	1380	0	113614	121428
EE Azogues	232	0	829	785	0	15040	16886
EE Centrosur	782	0	6486	2229	0	134438	143935
EE Cotopaxi	13	0	536	3971	0	46375	50895
EE Galápagos	0	755	1923	94	240	1604	4616

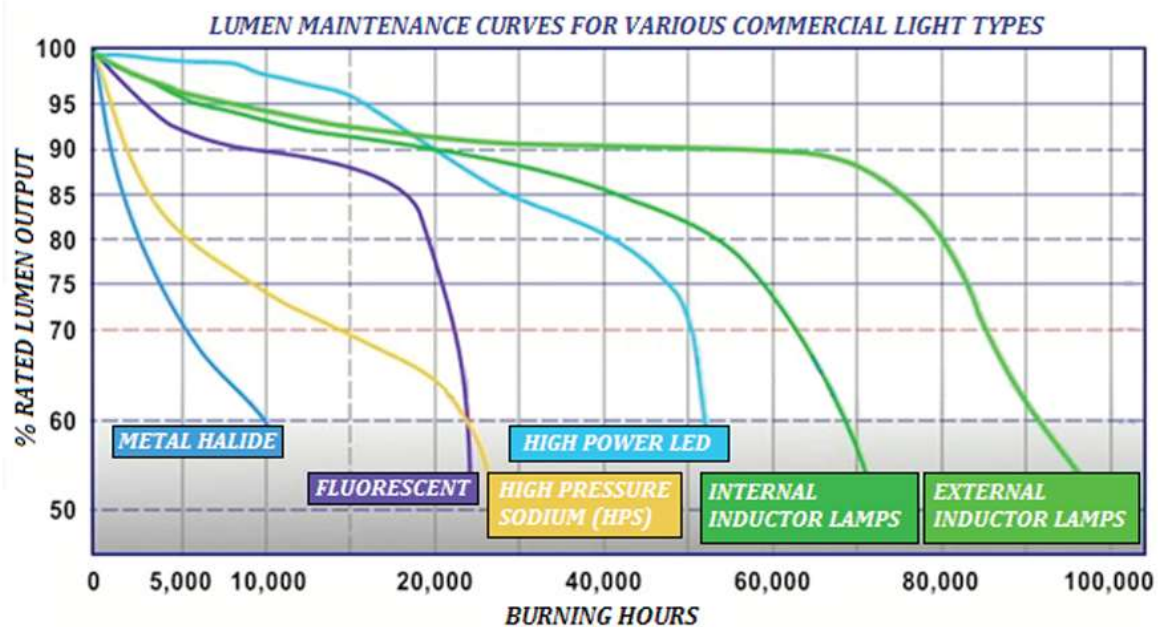
EE Norte	40	0	5635	6124	0	85613	97412
EE Quito	9440	92	5112	1627	0	266598	282869
EE Riobamba	221	0	2576	428	0	57347	60572
EE Sur	607	0	6515	993	0	56903	65018
<b>Total</b>	<b>20769</b>	<b>847</b>	<b>50243</b>	<b>57521</b>	<b>2721</b>	<b>1488929</b>	<b>1621030</b>

Nota. (R. A. Ayala, 2020)

### 2.5.5. Mantenimiento de Alumbrado Público

Toda tecnología de iluminación se desgasta con su uso y la iluminación que es emitida por estas mismas se va reduciendo, en la **Figura 8** se muestra curvas de mantenimiento para algunos tipos de luces comerciales, donde por debajo del 60% de iluminación ya se debe considerar realizar el mantenimiento en cada uno de estos tipos de tecnologías. (M. Rivadeneira, 2015)

**Figura 8.** Curvas de mantenimiento de luminarias comerciales.



Fuente: (M. Rivadeneira, 2015).

El mantenimiento para alumbrado público se encuentra normado por el Reglamento Técnico Ecuatoriano RTE INEN 069 “Alumbrado Público” indica que: “Todas las

instalaciones de alumbrado público deben contar con un plan de mantenimiento que garantice el mantenimiento de los niveles de eficiencia energética y los parámetros de iluminación (INEN, 2014)".

En estos mantenimientos se debe considerar tanto limpieza como el cambio de las luminarias, y el aseguramiento de estas mismas. Se realizan generalmente dos tipos de mantenimientos en el alumbrado público.

### ***Mantenimiento preventivo***

Este tipo de mantenimiento se realiza a modo de monitoreo periódico para encontrar fallas que puedan producir una desconexión del servicio, de esta manera se prolonga la vida útil de los equipos y se reducen los tiempos muertos en el servicio de alumbrado. (M. Quichimbo, 2012)

A continuación, se detallan algunas de las actividades más comunes realizadas para este tipo de mantenimientos:

- Realizar inspecciones periódicas a los diferentes componentes de la luminaria ya que esta tiene tanto partes eléctricas como estructuras mecánicas que pueden presentar fallos. Esto se realiza como una inspección visual de equipos.
- Revisar mediciones eléctricas en diferentes puntos de la red eléctrica, de modo que se pueda asegurar que se tiene una cierta calidad en la energía que llega a las luminarias, monitoreando valores de armónicos y otros parámetros en la red eléctrica que puedan derivar en una parada inesperada en el servicio.

### ***Mantenimiento correctivo***

Este tipo mantenimiento se realiza a diferencia del anterior ante la presencia de alguna falla que haya supuesto una parada inesperada del servicio o que presente una reducción en la calidad del servicio. Para realizar este mantenimiento se requiere de un conocimiento profundo del equipo para realizar tanto la corrección como el diagnóstico del mismo. (M. Quichimbo, 2012)

Algunas acciones comunes en este tipo de mantenimientos son:

- Limpieza de las luminarias, tanto bombillas como del conjunto óptico.
- Reemplazo de las luminarias (bombillas o componentes de la lámpara).
- Realizar mantenimiento eléctrico y mecánico a las luminarias.

### 2.5.6. Análisis de costos

En el caso de cambio de luminarias se realiza el siguiente análisis donde se considerará tanto mano de obra, uniformes y EPP, maquinaria y equipos, transporte, además del coste de luminarias (Rosas, 2017). Para determinar la factibilidad de implementación en cada caso. En la **Tabla 6** se puede observar el coste de mano de obra para la instalación de luminarias, en donde se tiene un subtotal de 81,12 dólares, siendo el gasto más representativo las horas del Jefe de Obra con un total de \$ 41,82.

**Tabla 6.**

*Costo de la mano de obra*

Descripción	Cantidad	Horas	Precio unitario (USD)	Total (USD)
<b>Jefe de obra</b>	1	8	5,24	41,92
<b>Operario</b>	1	8	2,77	22,16
<b>Ayudante</b>	1	8	2,13	17,04
			<b>Subtotal</b>	81,12

*Nota.* (Rosas, 2017)

Para lograr una implementación de las luminarias dentro de un proyecto, se debe tomar en cuenta materiales de protección y uniformes, para cada uno de los miembros del personal de instalación. En la **Tabla 7** se muestra el costo de los Uniformes, Kit básico de Herramientas para los Operarios, Jefe y Ayudante que ronda el costo de 8,08 dólares total, considerando un trabajo diario de 8 horas.



**Tabla 7.***Costo de Uniformes y EPP*

Descripción	Cantidad	Horas	Precio unitario (USD)	Total (USD)
Uniforme, EPP y Kit básico de herramientas para jefe de obra	1	8	0.26	2.08
Uniforme, EPP y Kit básico de herramientas para Operario	1	8	0.55	4.40
Uniforme, EPP y Kit básico de herramientas para Ayudante	1	8	0.2	1.60
			<b>Subtotal</b>	8.08

*Nota. (Rosas, 2017)*

Otro costo para tomar en cuenta para la realización de un proyecto de cambio de luminarias son las maquinarias y equipos necesarios, en donde se incluyen Máquina de soldar, Taladro, entre otros. En la **Tabla 8** se muestran los costos de los equipos mencionados, en donde se presenta un valor mayor el alquiler de la máquina de soldar inalámbrica con \$ 12,12 por día, obteniendo un valor total de equipos de \$31,38.

**Tabla 8.***Costo de maquinaria y equipos*

Descripción	Cantidad	Horas	Precio unitario (USD)	Total (USD)
Nextel	3	24	0,11	2,64
Amoladora de mano	1	Eq/día	4,04	4,04
Cizalla manual	1	Eq/día	2,02	2,02

<b>Máquina de soldar inalámbrica</b>	1	Eq/día	12,12	12,12
<b>Taladro de mano</b>	1	Eq/día	4,04	4,04
<b>Trozadora de metal</b>	1	Eq/día	4,04	4,04
<b>Kit de equipos para obras</b>	1	8	0,31	2,48
			<b>Subtotal</b>	31,38

*Nota.* (Rosas, 2017)

En la **Tabla 9** se muestra el costo de transporte de los equipos móviles necesarios para la instalación en donde se incluye una Grúa Hiab 175 con un valor por hora de \$26,94 y el costo de la camioneta de transporte de personal con un valor de \$4,73 dólares por hora, generando un Costo Total por este rubro de \$253,36 por una jornada de trabajo de 8 horas.

**Tabla 9.**

*Costo de transporte*

<b>Descripción</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Horas</b>	<b>Precio unitario (USD)</b>	<b>Total (USD)</b>
<b>Camioneta 4x2</b>	1	8	4,73	37,84
<b>Grua Hiab 175</b>	1	8	26,94	215,52
			<b>Subtotal</b>	253,36

*Nota.* (Rosas, 2017)

Uno de los valores más importantes que se debe tomar en cuenta al momento de la instalación es el costo de cada una de las luminarias. Para el caso de estudio actual se considera una Luminaria Philips BGP383 1Xgrn120/830 DM que posee un costo unitario de 94,3 dólares, generando un valor total para 60 luminarias de \$5 658 tal y como se observa en la **Tabla 10**.

**Tabla 10.***Coste de luminarias.*

Descripción	Cantidad	Precio unitario (USD)	Total (USD)
Philips BGP383 1xGRN120/830 DM	60	94,3	5658,00
Subtotal			5658,00

*Nota. (Rosas, 2017)*

El costo total generado tomando en cuenta cada uno de los rubros mencionados con anterioridad se puede observar en la **Tabla 11**, con un total de \$ 8 682,09 para el presente proyecto, siendo el costo más representativo el costo de las luminarias.

**Tabla 11.***Costo total.*

Descripción	Cantidad	Precio unitario (USD)	Total (USD)
Costo total por el cambio de luminaria	1	1677,00	1677,00
Análisis de ingeniería	1	1347,09	1347,09
Philips BGP383 1xGRN120/830 DM	1	5658,00	5658,00
Subtotal			8682,09

*Nota. (Rosas, 2017)*

También se analizó el ahorro mensual estimado por el cambio de luminarias para las entidades correspondientes, tomando en cuenta las Luminarias de Vapor de Sodio y Luminarias LED. Como se observa en la **Tabla 12**, el consumo energético para el primer caso es de 986,07 kWh en contra de 549,61 kWh, generando un ahorro mensual de 212,56 dólares.

**Tabla 12.***Ahorro mensual por cambio de luminaria*

<b>Tipos de luminarias</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Energía Kwh</b>	<b>Costo (USD)</b>
<b>Luminarias de vapor de sodio</b>	60	986,07	480,22
<b>Luminarias LED</b>	60	549,61	267,66
<b>AHORRO</b>		<b>436,46</b>	<b>212,56</b>

*Nota. (Rosas, 2017)*

Finalmente, se considera que el costo total y el ahorro mensual derivan en una amortización de la presente inversión. En la **Tabla 13** se observa el tiempo estimado en meses para cubrir la inversión con el ahorro calculo que corresponde a 41 meses lo que equivale a 4 años.

**Tabla 13.***Amortización aproximada de la inversión.*

<b>Costo Total de M.O y materiales</b>	8682,09
<b>Ahorro Mensual</b>	212,56
<b>Cantidad de meses para cubrir la inversión</b>	41
<b>Años aproximados</b>	4

*Nota. (Rosas, 2017)*

## **2.6. Marco Legal**

### **2.6.1. Legislación Internacional**

El aspecto normativo Internacional tiene una amplia variedad de referencias relevantes que muestran la regulación y parámetros técnicos para el servicio de alumbrado público. Una de las conocidas y que posee gran adopción por parte de los organismos reguladores de

cada país es la norma CIE-115. Esta entidad es la encargada de la regulación internacional de luz, iluminación y espacios de color. La norma CIE-115 especifica recomendaciones que estudian los requisitos mínimos para implementar un sistema de iluminación en espacios públicos, de calles o avenidas de áreas residenciales e industriales.

Por otro lado, dentro de la Agenda 2030 de la ODS, se menciona en el objetivo 7 el Garantizar el acceso a energía asequible, sostenible, fiable moderna para todos; en donde menciona que la energía es un servicio indispensable para la empleabilidad, la seguridad y el cambio climático, lo que permite transformar el estilo de vida de la población, así como la economía y el cuidado del planeta. En esto se considera como una meta el lograr hasta el 2030 duplicar la tasa mundial de mejora en la eficiencia energética, tomando en cuenta indicadores clave como la proporción de energía renovable en el consumidor final total de energía (CEPAL, 2023).

### **2.6.2. Legislación Nacional**

La normativa legal que regula el servicio del alumbrado público dentro del Ecuador Agencia de Regulación y Control de Energía y Recursos Naturales No Renovables. Dentro de la RESOLUCIÓN Nro. ARCERNNR – 029/2020 REGULACIÓN Nro. ARCERNNR 006/20, la cual muestra para normar los parámetros técnicos y comerciales que otorguen a las empresas encargadas de la distribución eléctrica brindar un servicio de alumbrado público de calidad y tomando en cuenta la eficiencia energética.

Dentro de la presente regulación se presentan parámetros como los estándares de infraestructura del alumbrado público general, el método de obtención del Factor de Utilización de Alumbrado, el Flujo Luminoso, la Iluminancia, entre otros. Dentro del Artículo 8, denominado CLASES DE ALUMBRADO Y PARÁMETROS FOTOMÉTRICOS POR VÍAS, se muestran las consideraciones más importantes como el tipo de iluminación dependiendo de la cantidad de tránsito vehicular que circulado por dicha autopista, que van desde M1 a M4. También se presentan los datos de Luminancia Promedio, Factor de Uniformidad y Relación de alrededores en cada una de las Clases de Iluminación identificadas (ARCERNNR, 2020).

# CAPÍTULO III

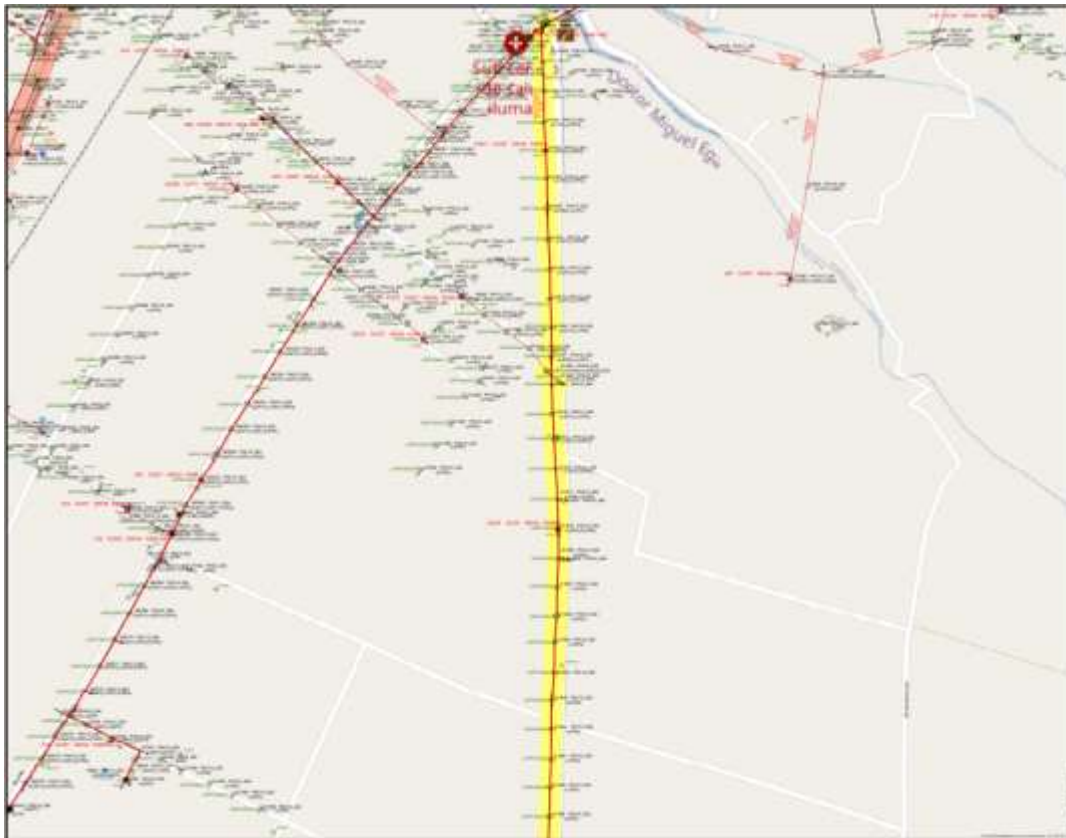
## 3. DESARROLLO Y RESULTADOS

### 3.1. ANÁLISIS TÉCNICO Y ECONÓMICO DEL SISTEMA ACTUAL

La vía Ilumán – Agato es una vía que se encuentra en la provincia de Imbabura al norte del país. Esta vía es de gran importancia debido al impacto que ha generado el reciente crecimiento de la interconexión y mejoramiento rural. En la **Figura 9**, **Figura 10**, **Figura 11**, se puede observar la dimensión total de la vía, en donde se identifican los principales componentes tanto de distribución eléctrica, como de iluminación.

El tramo 1 que se observa en la **Figura 9**, está compuesto por 29 luminarias mismas que entregan el servicio de alumbrado al tramo compuesto por 1,14 km.

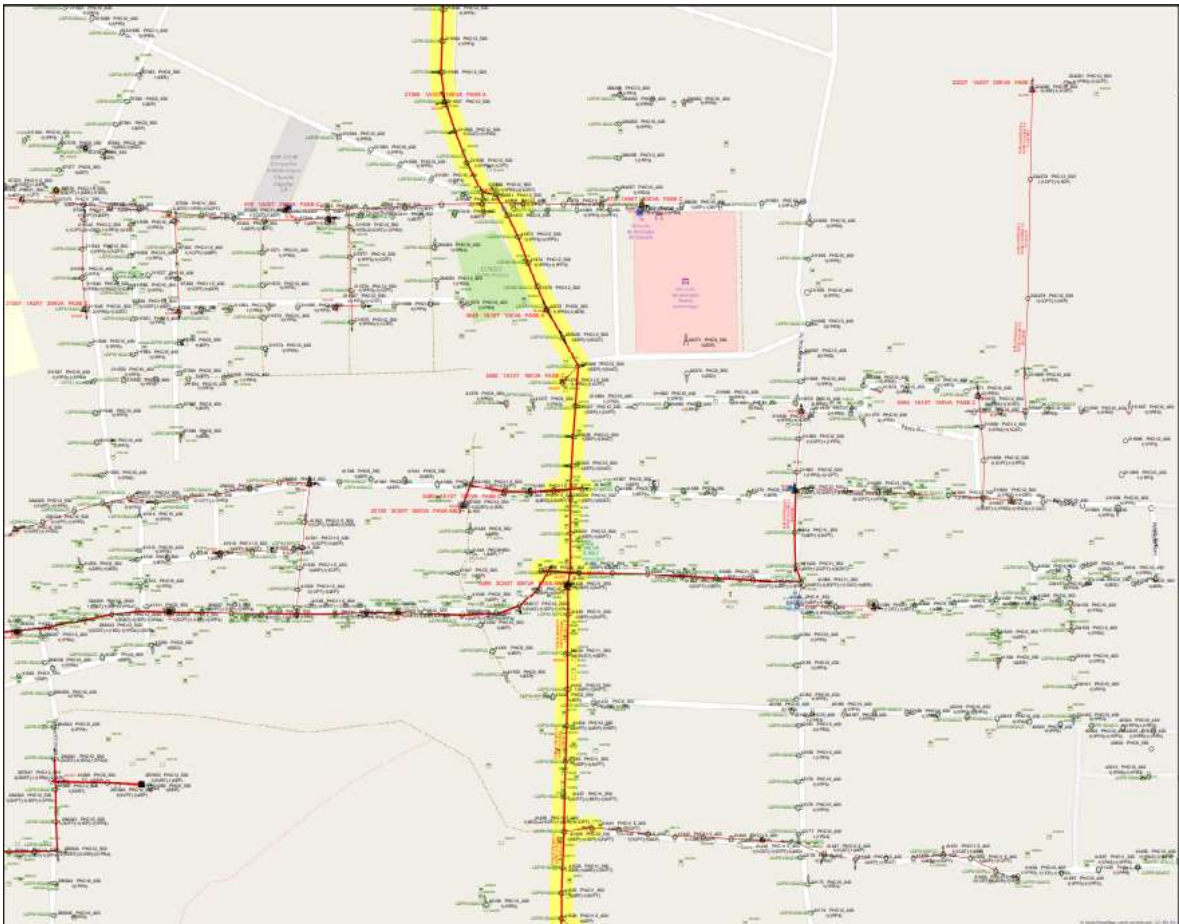
**Figura 9.** Tramo 1 - Vía Ilumán – Agato



Fuente: Autor.

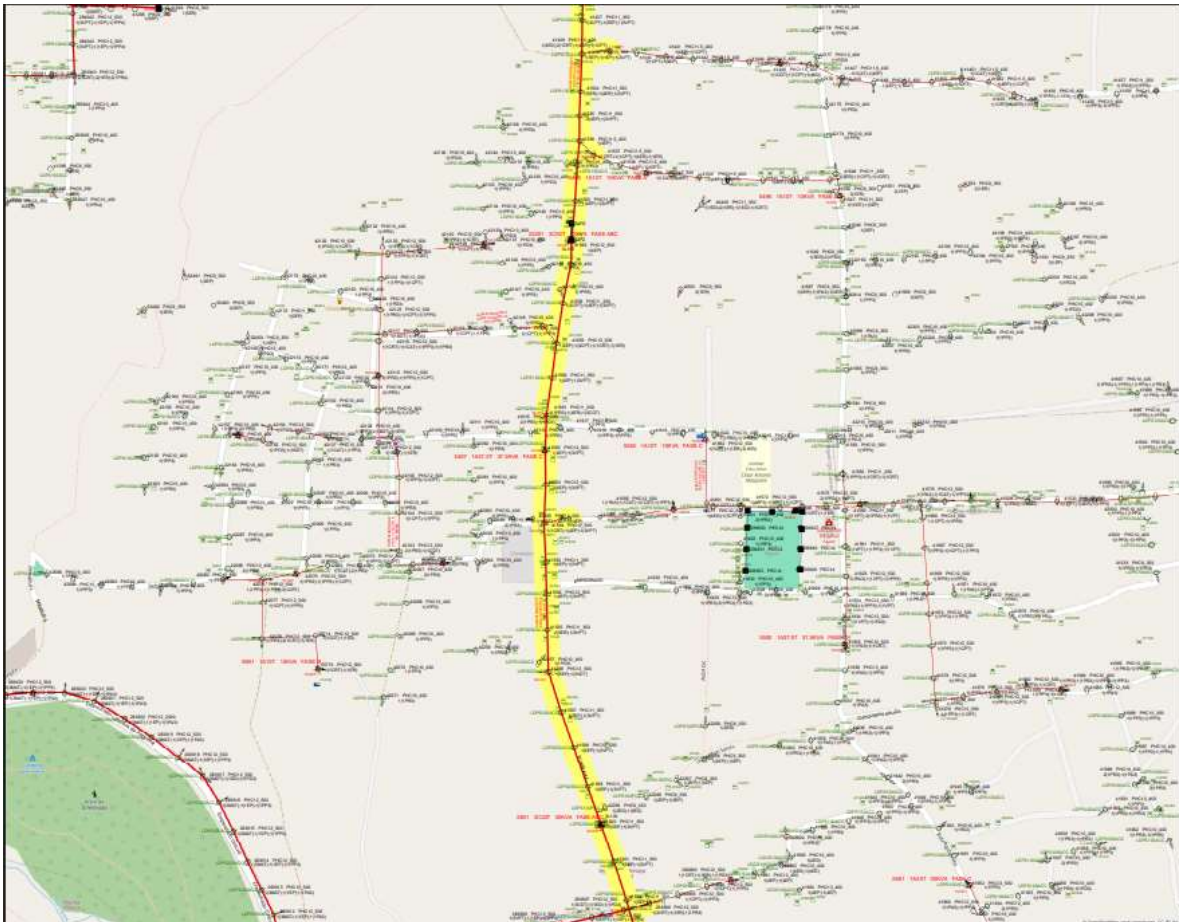
Así también, en la **Figura 10** se puede observar el segundo tramo de la vía, mismo que se encuentra compuesto por 28 luminarias que ofrecen el servicio de iluminación a esta arteria vial con un total de 1,05 kilómetros.

**Figura 10.** Tramo 2 Vía Ilumán – Agato



Fuente: Autor.

Finalmente, el tercer tramo de esta vía que se observa en la **Figura 11**, tiene una longitud total de 1,04 kilómetros y se encuentra conformado por un total de 23 luminarias que ofrecen el servicio de alumbrado. Con esto se conforma un eje vial que recorre una distancia de 3,23 kilómetros y con una totalidad de 80 luminarias.

**Figura 11** Tramo 3 - vía Ilumán - Agato.

Fuente: Autor.

Entre las principales características de esta arteria vial se encuentra que el tipo de iluminación es unilateral, que iluminan la vía que tiene dos carriles, uno de ida y uno de regreso cada uno con una dimensión de 3,5 metros de ancho, dando un total de 7 metros de ancho para toda la calzada. Otras de las características que se destacan se pueden observar en la **Tabla 14**.



**Tabla 14.***Características Principales de la vía Ilumán - Agato*

<b>Característica</b>	<b>Valor</b>
<b>Potencia de la Luminaria</b>	150 W
<b>Tensión Nominal de la Luminaria</b>	220 V
<b>Tipo de Apoyo</b>	Poste de Hormigón de 12 m
<b>Altura de Montaje</b>	8,5 m
<b>Disposición de las Luminarias</b>	Unilateral
<b>Interdistancia entre Luminarias</b>	43 metros
<b>Ancho de Calzada</b>	7 metros
<b>Característica de la Superficie</b>	R1 – Superficie de Asfalto, 15% de materiales reflectivos
<b>Clase de Iluminación</b>	P1 – Vía de Gran Importancia

*Nota. Autor.*

Se ha implementado el tipo de luminaria de vapor de sodio, específicamente de la Marca LUMEC LUM OLIMPIA I de 150 W, misma que se puede observar en la utilizada en varias vías del país como la vía Daule, vía Durán – Yaguachi, vía de ingreso a Latacunga, en varias vías urbanas de Quito, Ibarra, Guayaquil, así como en urbanizaciones debido a que son elaboradas en el país y poseen una relación calidad precio deseable. En la **Figura 13**

se puede observar las principales características técnicas de este tipo de luminaria, destacando que posee una protección IP 65 y está diseñada para cumplir con la regulación de ARCONEL 006/18 que da los parámetros fotométricos para la evaluación de las luminarias, e indicando que es perfecta para vías de tipo M1 – M2 – M3 – M4.

**Figura 12.** Luminaria Lumec Lum Olympia 1 de la vía Ilumán Agato.



Fuente: (INPROEL, 2023)

**Figura 13.** Ficha Técnica de las Luminarias de la vía Ilumán Agato.

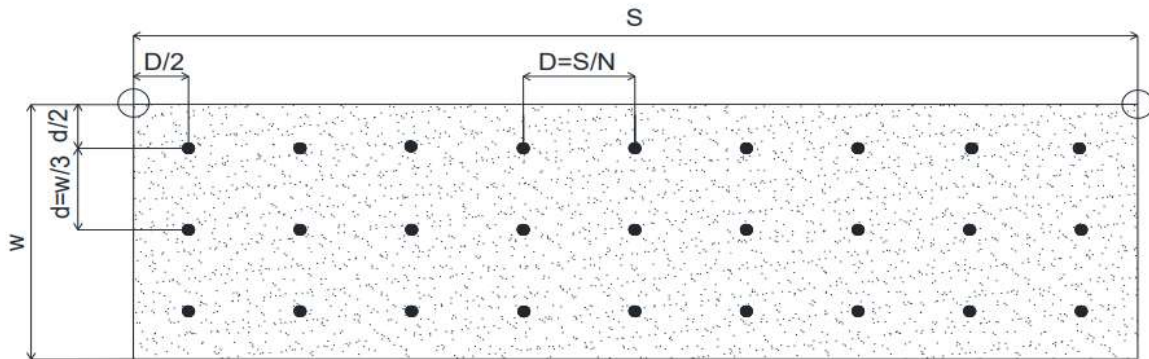


Fuente: Autor.

Para determinar experimentalmente la situación actual en la cual se encuentran las luminarias se realizaron inspecciones del tipo de luminaria y los niveles de iluminación que se encuentran en cada uno de los 80 postes que conforman la vía. Mediante el esquema

que presenta la norma IEC 140 – 2000, en donde se seleccionó un tramo recto de la vía para realizar la cuadrícula que indica la norma tomando en cuenta las distancias tal y como se observa en la **Figura 14**, para lo cual se utilizó como equipo de medición el LUXÓMETRO, EXTECH HD450 DIGITAL LIGHT METER.

**Figura 14.** Cuadrícula de Medición de Iluminación Vial IEC 140 – 2000



Fuente: Autor.

De esto se obtuvieron los siguientes datos que se observan en la **Tabla 15**, mismos que son un total de 42 mediciones, debido al tamaño de la vía actual. Con esto se pudo obtener la iluminancia promedio y la uniformidad de la iluminancia que se observan en las Ecuaciones 1 y Ecuaciones 2, destacando que se tiene una cantidad de 12,34 luxes.

**Tabla 15.**

*Medidas de iluminación en tramo de la vía Ilumán Agato*

19,2	16,6	11,9	8,9	7,1	5,5	5,1	5,6	6,8	8,9	10,9	15,9	21,8	25,2	CALZADA
23,3	19,2	13,9	10,5	7,7	5,8	4,8	4,9	6,9	9,4	11	17,3	25,8	29,9	
20,1	17,3	12,2	9,4	6,3	4,8	3,7	3,7	4,8	6,8	10,4	13,9	21,4	23,8	

$$E_{prom} = \frac{\sum_{i=1}^n E_i}{n} = 12.34 \text{ luxes} \quad (1)$$

$$U_E = \frac{E_{min}}{E_{prom}} = 0.30 \quad (2)$$

Finalmente, para realizar determinar el precio actual del sistema instalado, se toma como referencias los precios del mercado que se analizaron en secciones anteriores, en donde

consideran puntos como el mantenimiento, equipo, personal y costo de iluminación para determinar el precio final del proyecto a largo plazo. En este caso se obtuvieron los resultados que se observan en la **Tabla 16**, indicando que se tiene un costo total de \$ 9264,94 sin considerar los impuestos del 12% del régimen tributario del Ecuador, lo que daría un costo total con IVA de \$10 376,73 considerando las luminarias actuales de vapor de sodio que se encuentran instaladas.

**Tabla 16.**

*Costo Total del Estado Actual del Sistema*

Descripción	Cantidad	Precio unitario (USD)	Total (USD)
LUMEC LUM OLIMPIA I de 150 W	80	94,3	7544,00
Análisis de Ingeniería	1	1347,00	1347,00
Mano de Obra	1	81,12	81,12
Equipamiento e Instrumentos	1	39,46	39,46
Transporte	1	253,36	253,36
		<b>Total</b>	9264,94

*Nota. Autor.*

### 3.2. MODELO MATEMATICO

El alumbrado público ha sido examinado de manera común desde una perspectiva de optimización de funciones, generando la utilización y análisis de nuevas tecnologías y luminarias que existen en la actualidad. En este contexto, se encuentran diversas variables que poseen un nivel de relevancia en la resolución del problema.

Para esto, se debe establecer una función o modelo matemático único que considere la cantidad de criterios que permiten la decisión u optimización del sistema final, tales como los costos de instalación, el nivel de iluminación, la eficiencia, el factor de uniformidad y el deslumbramiento. De esta forma, se construye un modelo de optimización que emplea una técnica multicriterio mediante la teoría de decisión, donde  $n$  representa el número de escenarios y  $k$  indican las funciones objetivo para la optimización.

De esta forma se puede expresar la función matemática de la siguiente forma:

$$F(x) = [F_1(x), F_2(x), \dots, F_k(x)]$$

$$e(x) = [e_1(x), e_2(x), \dots, e_n(x)] \geq 0$$

Donde

$$x = [x_1, x_2, \dots, x_n] \in X$$

$$X^* = \min\{F(x) \in X_{pond}\}$$

Para definir de manera más eficiente, se requiere definir una variable  $x$  que se conoce como vector de decisión, y una función  $X^*$  que representará el vector que tiene los valores óptimos, siendo este caso uno que considera o se orienta hacia la minimización de los resultados basado en los impactos que genera cada criterio mediante un análisis ponderado en el vector  $x$ . El presente problema de optimización implica encontrar un valor de  $x$  que optimice la función  $F(x)$ , para lo cual se establece un conjunto de restricciones  $e(x) \geq 0$ , las cuales generarán un conjunto de soluciones viables en  $X$  y un conjunto de vectores óptimos  $x$ . Como resultado de esta operación, se concluye que, para obtener un conjunto de soluciones viables, se genera un vector óptimo  $X^*$  que cumple con un conjunto de restricciones  $e(x) \geq 0$ .

Para poder determinar cómo se aplica el modelo de optimización al sistema, se debe tener en cuenta las métricas que se pueden medir. Para asignar puntajes, las opciones deben ser evaluadas según su relevancia para cada uno de los criterios, ya sean cualitativos o cuantitativos. El paso final implica una matriz que determina la solución óptima, abarcando criterios de decisión en todo el ámbito de búsqueda.

Dentro del estudio, las funciones objetivo-definidas se adaptan de manera que puedan ser utilizadas en problemas de optimización como funciones que buscan ser minimizadas. Entre las funciones que se van a analizar en la optimización multicriterio se encuentran las siguientes:

**FO1 Nivel de Iluminación:**  $F_{01} = \Phi * \text{Cantidad de Luminarias}$

**FO2 Factor de Uniformidad:**  $E_2 = \frac{E_{MIN}}{E_{PROM}}$

**FO3 Eficiencia de Luminaria:** *Se considera de Acuerdo con la Ficha técnica.*

**FO4 Deslumbramiento:**  $Lv = 10 * \sum \left( \frac{Eg}{\theta^2} \right)$

**FO5 Costo de Luminaria:**  $F05 = Costo Individual * Cantidad de Luminarias$

Donde:

$Lv$  es la luminancia en  $cd/m^2$ .

$Eg$  iluminancia con respecto al ojo humano.

$\theta$  se considera como el ángulo formado entre la dirección de transmisión de la luz hacia el ojo y la dirección de observación con dimensión de grados.

Con lo que se obtiene el sistema a ser optimizado y se expresa de la siguiente manera:

$$\text{Minimizar } F = [F01, F02, F03, F04, F05]$$

Las funciones objetivas previamente definidas se representan como F01, F02, F03, F04, F05. Para lograr resultados efectivos en el diseño óptimo del alumbrado público, la matriz de decisión o matriz de alternativas ganadoras se formula en la siguiente ecuación:

$$X \begin{bmatrix} X_{11} & X_{12} & X_{13} & X_{14} & X_{15} & X_{16} & \dots & X_{1n} \\ X_{21} & X_{22} & X_{23} & X_{24} & X_{25} & X_{26} & \dots & X_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ X_{i1} & X_{i2} & X_{i3} & X_{i4} & X_{i5} & X_{i6} & \dots & X_{in} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ X_{m1} & X_{m2} & X_{m3} & X_{m4} & X_{m5} & X_{m6} & \dots & X_{mn} \end{bmatrix}$$

Donde las columnas de esta matriz presentan los criterios definidos por las variables analizadas como funciones objetivas, mientras que las filas muestran los posibles escenarios para todas las alternativas de análisis y respuesta de los criterios de optimización. De esta manera, al elegir la mejor alternativa, se consideran los criterios de decisión establecidos, y se eliminan todas las soluciones inferiores mediante el criterio de superioridad utilizado en el algoritmo. Al tener en cuenta el vector de la columna  $X$ , se aborda la problemática de optimización en búsqueda de la solución óptima entre todas las alternativas disponibles.

Tras la evaluación de todos los escenarios considerados y la obtención de resultados, es decir la recolección de datos, se requiere normalizar matemáticamente cada una de estas

condiciones de análisis. En este proceso, se emplea una normalización basada en el rango (utilizando el método del valor mínimo y máximo), tal como se indica en la ecuación.

$$X_{iNorm} = \frac{X_i - X_{min}}{X_{max} - X_{min}}$$

Otro proceso necesario para determinar los mejores valores en los diferentes escenarios es la implementación de la ponderación de los criterios utilizando el método *CRITIC*, tomando en consideración y asignando los pesos de las soluciones de las variables en los diferentes escenarios de análisis. El método *CRITIC* asigna puntajes para obtener el peso de cada criterio de decisión, tal como se describe en la ecuación:

$$W_i = S_i \sum (1 - r_{ij})$$

Donde:

$W_i$  es el peso o ponderación del criterio  $i$ .

$S_i$  es la desviación estándar de los datos dentro de cada criterio  $i$ .

$r_{ij}$  es el coeficiente de correlación entre la fila  $i$  y la columna  $j$ .

Una vez que se ha identificado el vector de solución óptima, se presentará la solución preferida determinada por el tipo, distribución y características de las luminarias, con el propósito de mejorar la visibilidad y la eficiencia del sistema de alumbrado público. El vector de decisión se calcula sumando los pesos de cada alternativa, lo cual se logra multiplicando cada vector de fila por su respectivo peso y sumando los resultados. Dado que todas estas variables se buscan minimizar, la solución más deseable se identificará con el valor más bajo en el vector de suma ponderada, se calcula mediante la siguiente relación:

$$Pond_i = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (W_i * X_{ij})$$

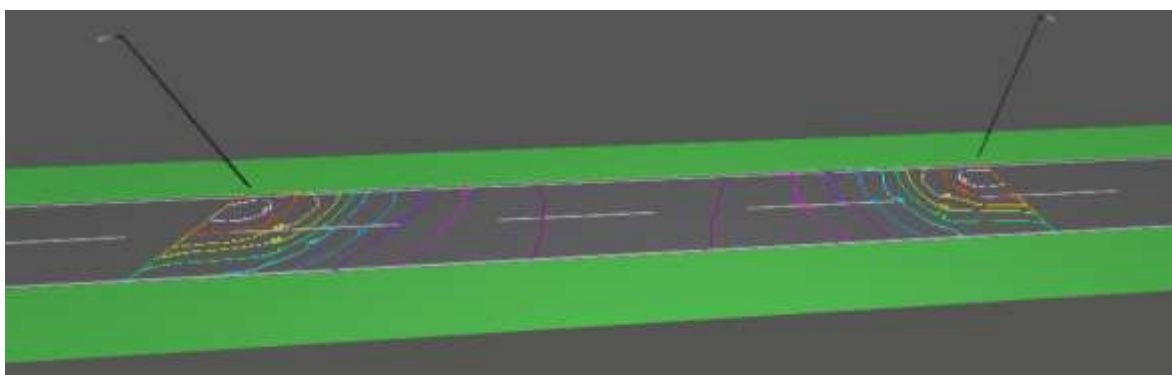
Finalmente, se completa la matriz de decisión para elegir el escenario que resulte victorioso, la cual incluye todas las variables y criterios analizados. Posteriormente se requiere la implementación del modelo planteado en el Software Matlab, lo cual se analizará en la siguiente sección.

### 3.3. ALGORITMOS DE OPTIMIZACION DEL SISTEMA

Una vez establecidos todos los parámetros del modelo matemático para la optimización de luminarias, se requiere la obtención de datos para poder identificar las diferentes soluciones posibles para la correcta optimización. Para esto se usó el software Dialux, mismo que permite la obtención de variables como el factor de utilización, el nivel de iluminación y el factor de deslumbramiento en el proyecto vial Ilumán Agato.

Como primer punto se evaluó bajo las mismas condiciones actuales que se encuentra el sistema para lo cual se procedió a colocar la distancia entre postes la distribución de luminarias dentro del simulador y así obtener la respuesta de los datos necesarios para las funciones objetivo. En la **Figura 15** se puede observar el modelo en 3D del sistema vial diseñado mismo que consta con una distancia de 43 m entre postes, una distancia de 8m para la instalación de las luminarias en Disposición Unilateral del Sistema obteniendo 12,81 lx de nivel de iluminación.

**Figura 15.** Simulación de Iluminación Vial en Dialux



Fuente: Autor.

De la misma manera para obtener los datos necesarios para generar la optimización hoy se realizó la variación de parámetros como la distancia entre postes disposición de luminarias hora y altura de la luminaria con el fin de obtener una base de datos lo suficientemente amplia para identificar el mejor escenario posible. Para analizar correctamente el sistema se utiliza una misma luminaria de 150 W de vapor de sodio tal y como se encuentra el sistema actual de la vía, mismo que posee una eficiencia de 79 lúmenes por watt. En la **Tabla 17** se puede observar los datos obtenidos para cada uno de los escenarios de prueba, los cuales son un total de 9.



Tabla 17.

Datos para Optimización de Luminaria de Vapor de Sodio



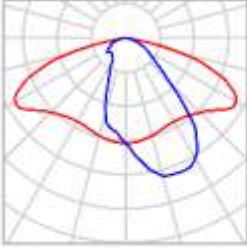
	Nivel de Iluminación (lx)	Factor de Uniformidad	Eficiencia de Luminaria (lm/w)	Deslumbramiento	Costo de Luminaria	Parámetros
Escenario	F01	F02	F03	F04	F05	
Escenario 1	12,81	0,16	79	2	\$7 544,00	Distancia entre Postes 43 m - Disposición Unilateral Inferior - 150 W - Altura 8 metros
Escenario 2	27,61	0,61	79	2	\$15 088,00	Distancia entre Postes 20 m - Disposición Unilateral Inferior - 150 W - Altura 8 metros
Escenario 3	12,81	0,16	79	2	\$7 544,00	Distancia entre Postes 43 m - Disposición Unilateral Superior - 150 W - Altura 8 metros
Escenario 4	27,61	0,61	79	2	\$15 088,00	Distancia entre Postes 20 m - Disposición Unilateral Superior - 150 W - Altura 8 metros
Escenario 5	10,87	0,19	79	2	\$7 544,00	Distancia entre Postes 43 m - Disposición

						Unilateral Inferior - 150 W - Altura 10 metros
<b>Escenario 6</b>	0,81	23,5	79	2	\$15 088,00	Distancia entre Postes 20 m - Disposición Unilateral Superior - 150 W - Altura 10 metros
<b>Escenario 7</b>	47	0,87	79	2	\$15 088,00	Distancia entre Postes 20 m - Disposición Bilateral en Alternancia - 150 W - Altura 10 metros
<b>Escenario 8</b>	21,77	0,78	79	2	\$7 544,00	Distancia entre Postes 43 m - Disposición Bilateral en Alternancia - 150 W - Altura 10 metros
<b>Escenario 9</b>	37,18	0,56	79	2	\$8 487,00	Optimizaci3n Dialux - Distancia 36 metros - Disposición Bilateral en Alternancia - 150 W - Altura 6 metros

*Nota. Autor.*

Una vez obtenido los datos para las luminarias de vapor de sodio se procede a realizar el mismo procedimiento cambiando el tipo de luminaria en este caso a led. Para esto se escogi3 la luminaria LUG Light Factory URBANO LED que posee una potencia de 102W y cuyas caracter3sticas se pueden observar en la **Figura 16**.

**Figura 16.** Características de la Luminaria LED LUG.

			
Fabricante	LUG Light Factory	P	102.0 W
N° de artículo	130195.5L32.1121	$\Phi_{\text{Luminaria}}$	15300 lm
Nombre del artículo	URBANO LED 102W 15300lm 4000K IP66 O52 - for town roads Regulation -15° ... 0° (O50, O51, O52, O53, O54, O55 optics) graphite I		
Lámpara	1x LED ED 102W 15300lm 4000K IP66 O52 I class graphite		

Una vez seleccionada la luminaria led para el diseño de iluminación vial se procede a crear los diferentes escenarios de prueba para obtener la base de datos correspondiente. De la misma manera se varió parámetros como la distancia entre postes la altura de la luminaria y la disposición de las luminarias. Para lo cual se plantearon 9 escenarios de prueba tal y como se observa en la **Tabla 18**, verificando que la eficiencia de la luminaria para este caso es de 138 lúmenes por watt.

**Tabla 18.***Datos para Optimización de Luminarias LED*

	Nivel de Iluminación (lx)	Factor de Uniformidad	Eficiencia de Luminaria (lm/w)	Deslumbramiento	Costo de Luminaria	Parámetros
Escenario	F01	F02	F03	F04	F05	
<b>Escenario 1</b>	21,1	0,20	138	1	\$9 200,00	Distancia entre Postes 43 m - Disposición Unilateral Inferior - 102 W - Altura 8 metros
<b>Escenario 2</b>	45,41	0,64	138	1	\$18 400,00	Distancia entre Postes 20 m - Disposición Unilateral Inferior - 102 W - Altura 8 metros
<b>Escenario 3</b>	21,1	0,2	138	1	\$9 200,00	Distancia entre Postes 43 m - Disposición Unilateral Superior - 102 W - Altura 8 metros
<b>Escenario 4</b>	45,41	0,64	138	1	\$18 400,00	Distancia entre Postes 20 m - Disposición Unilateral Superior - 102 W - Altura 8 metros

<b>Escenario 5</b>	18,11	0,33	138	1	\$9 200,00	Distancia entre Postes 43 m - Disposición Unilateral Inferior - 102 W - Altura 10 metros
<b>Escenario 6</b>	38,98	0,77	138	1	\$18 400,00	Distancia entre Postes 20 m - Disposición Unilateral Superior - 102 W - Altura 10 metros
<b>Escenario 7</b>	77,95	0,84	138	1	\$18 400,00	Distancia entre Postes 20 m - Disposición Bilateral en Alternancia - 102 W - Altura 10 metros
<b>Escenario 8</b>	36,26	0,75	138	1	\$9 200,00	Distancia entre Postes 43 m - Disposición Bilateral en Alternancia - 102 W - Altura 10 metros

<b>Escenario 9</b>	40,08	0,71	138	1	\$17 250,00	Optimizaci ón Dialux - Distancia 21 metros - Disposición Bilateral en Alternancia - 102 W - Altura 9 metros
------------------------	-------	------	-----	---	----------------	--

*Nota. Autor.*

Una vez generada la base de datos correspondiente a luminarias led y a luminarias de vapor de sodio para la optimización se procede a la implementación del modelo dentro del software MATLAB. Para esto se implementó el pseudocódigo que se observa en la **Tabla 19**.

**Tabla 19.**

*Pseudocódigo de Algoritmo Multicriterio Basado en Ponderaciones*

<b>Algoritmo Multicriterio de Ponderación</b>
<pre> datos='datos.xlsx'; %Lectura de Datos de Excel matriz_entrada=xlsread(datos,1, 'A1:F10') %Selección Rango de la Tabla matriz_norm=normc(matriz_entrada) % Normalización de Matriz Desviacion_estandar=std(matriz_norm) %Calculo de Desviación Estándar R=corrcoef(matriz_norm); %Coeficiente de Correlación Ponderacion=Desviacion_estandar.*sum(1-R); %Generación de Poderaciones Ponderación %Muestra Matriz de Ponderación A=sum(Ponderacion) %Suma de Ponderaciones Asignadas Ponderacion_normalizada=Ponderacion/A % Ponderación Normalizada     % Ponderacion normalizada     Para Todo i=1:1:9     Para todo j=1:1:5 v=Ponderacion_normalizada(j).*matriz_norm(i,j); %Calculo de Valor Ponderado matriz_ponderada(i,j)=[v]; %Asignación de Valor en Matriz     Fin     Fin matriz_ponderada %Muestra Matriz Ponderada     Para todo i=1:1:9 v3=0; %Calcula Factor de Ponderación     Para todo j=1:1:5 v3=v3+matriz_ponderada(i,j); % Suma de Factore sumas_ponderadas(i)=[v3] %Almacenamiento de Ponderaciones en Vector     Fin </pre>

```

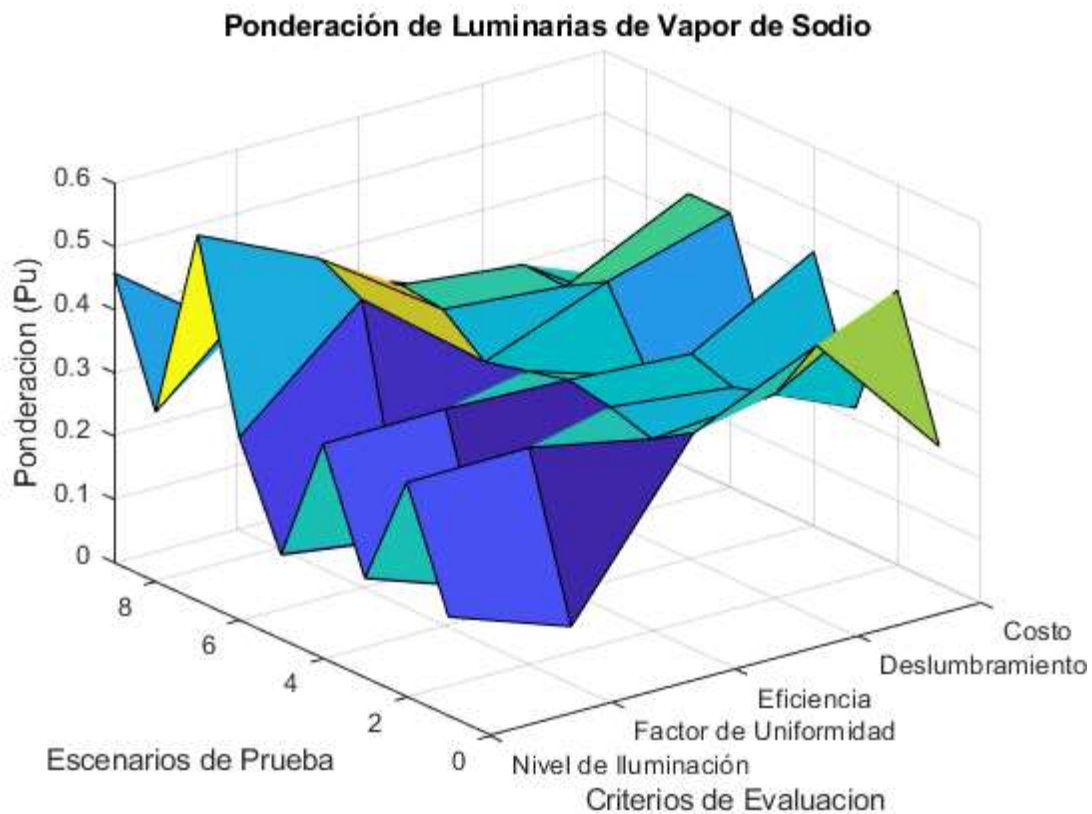
Fin
sumas_ponderadas %Muestra Vector de Sumas Ponderadas
win_case=min(sumas_ponderadas) % Selecciona Caso Ganador

```

Nota. Autor.

Una vez ingresados los datos del archivo de Excel donde se tiene la evaluación de cada una de las luminarias en los diferentes escenarios de prueba se procede a realizar el cálculo de ponderación para cada una de las variables en los diferentes escenarios de prueba obteniendo una matriz de ponderación. En la **Figura 17** se puede observar el gráfico de la matriz de ponderación para las luminarias de vapor de sodio en dónde se muestra que el nivel iluminación y el costo son los factores con mayor ponderación para el sistema de optimización, considerando los escenarios 8 y 6 con mayores cálculos de ponderación.

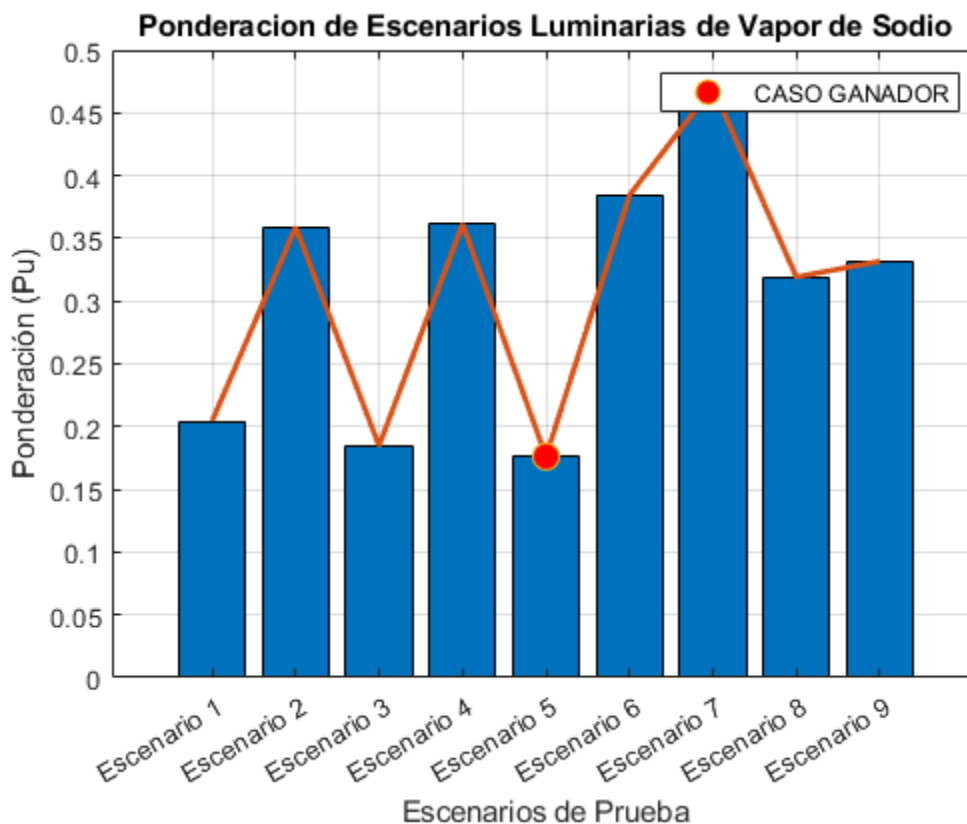
**Figura 17.** Diagrama de Ponderación por Escenarios de Prueba en Vapor de Sodio.



Fuente: Autor.

Una vez realizados los cálculos correspondientes para las ponderaciones en cada una de las iteraciones del algoritmo se procede a la estimación de la suma ponderada para cada uno de los nueve escenarios. Con la obtención de esta variable se procede a obtener la optimización de los parámetros encontrando el mínimo posible para el sistema, que será el valor óptimo y que permitirá identificar el escenario de prueba para las luminarias de Vapor de Sodio. En la **Figura 18** se puede observar el diagrama de barras que corresponde a los valores de la sumatoria ponderada de cada escenario de prueba planteado. Se puede identificar que el caso 7 es el que posee una mayor ponderación lo que produce que sea el peor sistema para tomar en cuenta. Por otro lado, se puede observar que el Caso Ganador obtenido para las Luminarias de Vapor de Sodio es el Escenario de Prueba 5, teniendo de cerca al Escenario de Prueba 1 y 3, esto debido a que son los que menor cantidad de inversión económica requiere.

**Figura 18.** Diagrama de Barras de Suma Ponderadas para Luminarias de Vapor de Sodio.

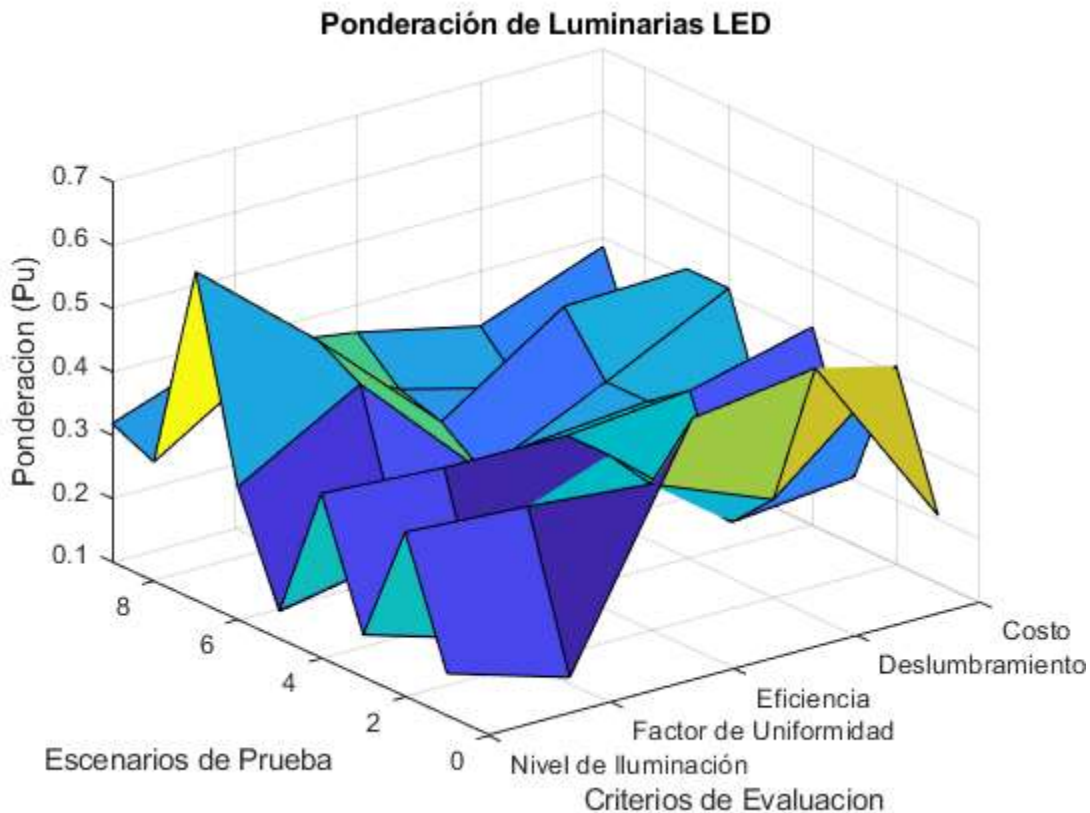


Fuente: Autor.



Una vez obtenido el caso ganador para las luminarias de vapor de sodio se procede a aplicar el mismo procedimiento y algoritmo para generar la matriz de ponderaciones para el caso de los escenarios de prueba de las luminarias Led. En la **Figura 19** se puede observar los datos ponderados obtenidos de la matriz que contiene la información de los escenarios de prueba para Luminarias LED. Dentro de este gráfico se verifica que en los Escenarios 5, 4 y 3 se tienen las menores ponderaciones con respecto a nivel de iluminación y factor de uniformidad; mientras que el costo y la eficiencia en los Escenarios 8 y 7 se tiene una ponderación de mayor valor.

**Figura 19.** Diagrama de Matriz de Ponderaciones del Sistema de Iluminación LED.

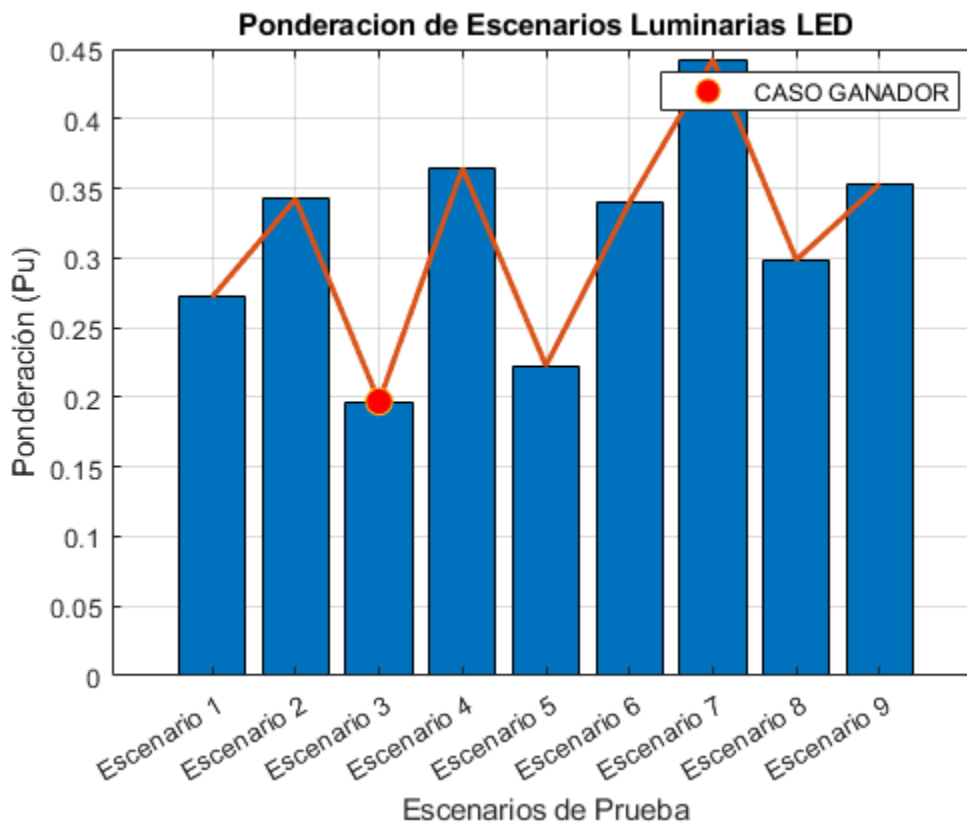


Fuente: Autor.

Finalmente se procede a realizar todos los cálculos por medio del algoritmo diseñado para obtener la ponderación y sumatoria de cada uno de los parámetros evaluados en los escenarios de prueba de luminarias led. En la **Figura 20** se puede observar el diagrama de barras obtenido de cada una de las sumatorias ponderadas para todos los 9 escenarios de evaluación en este tipo de luminarias. Se pudo identificar que el caso ganador se encuentra

en el escenario de prueba 3, seguido del escenario de prueba 5 y 1 con los mejores resultados para este tipo de luminarias; mientras que el caso número 7, 4 y 2 al tener una ponderación demasiado alta se descartan para cualquier tipo de implementación.

**Figura 20.** Diagrama de Barras De Sumatoria Ponderada para Luminarias LED.



Fuente: Autor.

Finalmente se procede a identificar las características principales del Escenario 5 para las luminarias de vapor de sodio y el Escenario 3 para las luminarias led. En la **Tabla 20** se puede observar cada uno de los parámetros obtenidos en estos escenarios y las condiciones de implementación en las que fueron evaluadas para su comparación y selección de la más óptima por medio del Software AMPL.

**Tabla 20.***Características de Sistemas Ganadores para Ambas Luminarias*

Escenario	Luminaria	Nivel de Iluminación	Factor de Uniformidad	Eficiencia	Deslumbramiento	Costo
<b>Escenario 5</b>	Vapor de Sodio	10,87	0,19	79	2	\$7.544,00
Distancia entre Postes 43 m - Disposición Bilateral – Luminaria con Potencia Nominal de 150 W - Altura de Luminaria 10 metros						
<b>Escenario 3</b>	LED	21,1	0,2	138	1	\$9.200,00
Distancia entre Postes 43 m - Disposición Unilateral Superior – Luminaria LED con Potencia Nominal de 102 W - Altura de Luminarias 8 metros						

*Nota. Autor.*

### 3.4. COMPARACIÓN DE RESULTADOS

Para poder evaluar cada uno de los escenarios conseguidos como casos ganadores tanto para luminarias led como para luminarias de vapor de sodio, se procederá a evaluar y comparar cada uno de los parámetros obtenidos mediante el software Dialux así como un análisis económico del consumo energético para posteriormente hacer una simulación de función objetivo y así determinar cuál de los 2 escenarios obtenidos para cada una de las luminarias es el más eficiente en cuestiones de consumo energético.

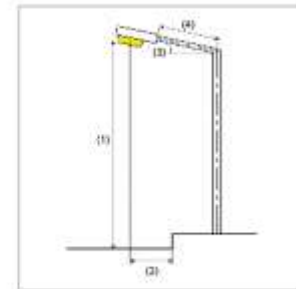
En la **Figura 21** se puede observar cada una de las características que posee el Escenario 5 correspondiente al caso ganador de las luminarias de vapor de sodio, mismo que consta como una distancia entre postes de 43m, como el caso actual lo que genera un total de 80 luminarias. Se tiene una distancia al punto de luz de 10m, con una inclinación del brazo de 0° y una longitud de 0,350m. Se observa también que tiene una cantidad de 4000 horas de trabajo anuales a un 100% de la potencia máxima 163W. Se considera como una clase de

potencia lumínica G4, un índice de deslumbramiento D4 y un factor de mantenimiento de 0,80.

**Figura 21.** Parámetros de Luminaria de Vapor Escenario 5

EFL540 [S70] IP66:HST-X4 150W/E40 Pos. 1 (unilateral abajo)

Distancia entre mástiles	43.000 m
(1) Altura de punto de luz	10.000 m
(2) Saliente del punto de luz	0.000 m
(3) Inclinación del brazo	0.0°
(4) Longitud del brazo	0.350 m
Horas de trabajo anuales	4000 h: 100.0 %, 163.0 W
Vatios / recorrido	3749.0 W/km
ULR / ULOR	0.00 / 0.00
Intensidad lumínica máx Respectivamente en todas las direcciones que forman los ángulos especificados con las verticales inferiores (con luminarias instaladas aptas para el funcionamiento).	≥ 70°: 461 cd/klm ≥ 80°: 57.8 cd/klm ≥ 90°: 0.00 cd/klm
Clase de potencia lumínica Los valores de intensidad lumínica en [cd/klm] para el cálculo de la clase de potencia lumínica se refieren al flujo luminoso de luminaria conforme a EN 13201:2015.	G*4
Clase de índice de deslumbramiento	D.4
MF	0.80



Fuente: Autor.

Una vez establecidos los parámetros del escenario de la luminaria de vapor de sodio se procedió a observar los resultados de iluminación obtenidos dentro del Software Dialux, dentro del cual en la **Tabla 21** se indica en la verificación que el nivel de iluminación medio y el nivel de iluminación mínimo cumplen con los parámetros luminotécnicos requeridos para el proyecto con un 21,77 lx y 16,93 lx.

**Tabla 21.**

*Resultados de Iluminación en Dialux del Escenario 5 – Vapor de Sodio*

	Tamaño	Calculado	Nominal	Verificación
Via Iluman - Agato (P1)	$E_{ill}$	21.77 lx	[15.00 - 22.50] lx	✓
	$E_{min}$	16.93 lx	$\geq 3.00$ lx	✓
	$E_{scotm}$	2.93 lx	$\geq 5.00$ lx	✗
	$E_{cmin}$	2.68 lx	$\geq 5.00$ lx	✗
	$TI^{(2)}$	3 %	-	

*Nota. Autor.*

Finalmente se observa el indicador de eficiencia energética para el Escenario 5, mismo que indica un consumo de energía de 1304 kWh/año por cada una, con respecto a la luminaria elegida para el proyecto tal y como se observa en la **Tabla 22**.

**Tabla 22.**

*Resultados de Eficiencia Energética en Dialux para Escenario 5*

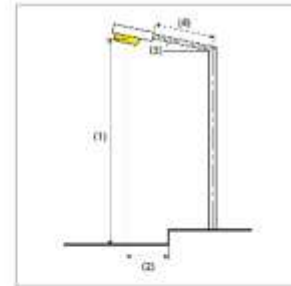
	Tamaño	Calculado	Consumo de energía
Via Iluman - Agato - Vapor de Sodio E5	$D_p$	0.050 W/lx*m <sup>2</sup>	-
EFL540 [S70] IP66:HST-X4 150W/E40 Pos. 1 (bilateral en alternancia)	$D_p$	4.3 kWh/m <sup>2</sup> año	1304.0 kWh/año

Por otro lado, en la **Figura 22** se puede observar cada una de las características que posee el Escenario 3 correspondiente al caso ganador de las luminarias LED, mismo que consta como una distancia entre postes de 43m, como el caso anterior lo que genera un total de 80 luminarias. Se tiene una distancia al punto de luz de 8m, con una inclinación del brazo de 0° y una longitud de 0,0m. Se observa también que tiene una cantidad de 4000 horas de trabajo anuales a un 100% de la potencia máxima 102W. Se considera como una clase de potencia lumínica G6, un índice de deslumbramiento D5 y un factor de mantenimiento de 0,80.

**Figura 22. Características del Escenario 3 para Iluminación LED Dialux.**

URBANO LED 102W 15300lm 4000K IP66 O52 - for town roads Regulation -15° ... 0° (O50, O51, O52, O53, O54, O55 optics) graphite I (unilateral arriba)

Distancia entre mástiles	43.000 m
(1) Altura de punto de luz	8.000 m
(2) Saliente del punto de luz	0.000 m
(3) Inclinación del brazo	0.0°
(4) Longitud del brazo	0.000 m
Horas de trabajo anuales	4000 h; 100.0 %, 102.0 W
Vatios / recorrido	2346.0 W/km
ULR / ULOR	0.00 / 0.00
Intensidad luminica máx Respectivamente en todas las direcciones que forman los ángulos especificados con las verticales inferiores (con luminarias instaladas aptas para el funcionamiento).	$\geq 70^\circ$ : 303 cd/klm $\geq 80^\circ$ : 32.2 cd/klm $\geq 90^\circ$ : 0.00 cd/klm
Clase de potencia luminica Los valores de intensidad luminica en [cd/klm] para el cálculo de la clase de potencia luminica se refieren al flujo luminoso de luminaria conforme a EN 13201:2015.	G*6
Clase de índice de deslumbramiento	D.5
MF	0.80



Fuente: Autor.

Una vez establecidos los parámetros del escenario de la luminaria LED se procedió a observar los resultados de iluminación obtenidos dentro del Software Dialux, dentro del cual en la **Tabla 23** se indica en la verificación que el nivel de iluminación medio y el nivel de iluminación mínimo cumplen con los parámetros luminotécnicos requeridos para el proyecto con un 21,10 lx y 4,28 lx.

**Tabla 23.**

*Resultados Luminotécnicos Obtenidos por el Software Dialux en Escenario 3 - LED*

	Tamaño	Calculado	Nominal	Verificación
Via Iluman - Agato (P1)	Tl	8 %	≤ 20 %	✓
	E <sub>in</sub>	21.10 lx	[15.00 - 22.50] lx	✓
	E <sub>min</sub>	4.28 lx	≥ 3.00 lx	✓
	E <sub>sc, min</sub>	0.21 lx	≥ 5.00 lx	✗
	E <sub>sc, max</sub>	0.12 lx	≥ 5.00 lx	✗

*Nota. Autor.*

Finalmente se observa el indicador de eficiencia energética para el Escenario 3, mismo que indica un consumo de energía de 1304 kWh/año por cada una, con respecto a la luminaria LED elegida para el proyecto tal y como se observa en la **Tabla 24**.

**Tabla 24.**

*Resultado de Consumo de Energía en Luminaria LED - Escenario 5 - Dialux*

	Tamaño	Calculado	Consumo de energía
Via Iluman - Agato - LED E3	D <sub>p</sub>	0.016 W/lx <sup>2</sup> m <sup>2</sup>	-
URBANO LED 102W 15300lm 4000K IP66 O52 - for town roads Regulation -15° ... 0° (O50, O51, O52, O53, O54, O55 optics) graphite I (unilateral arriba)	D <sub>c</sub>	1.4 kWh/m <sup>2</sup> año	408.0 kWh/año

*Nota. Autor.*

Identificadas todas las variables pertenecientes al consumo energético tomando en cuenta que el kWh de iluminación tiene un valor de \$ 0,10 se procede a formar la función objetivo para la definición del tipo de luminaria que posee un menor consumo energético, es decir genera un mayor ahorro, lo que conlleva a una mejor eficiencia energética. En la **Tabla 25** se pueden observar los datos tanto de ponderaciones obtenidas en el análisis por

escenario, así como los consumos totales por la cantidad de luminarias y su valor equivalente en dólares.

**Tabla 25.**

*Parámetros de Consumo y Costo de los Escenarios Ganadores*

<b>Escenario</b>	<b>Ponderación (Pu)</b>	<b>Consumo Energético por Año (kWh/año)</b>	<b>Costo Total por Año (\$)</b>
Vapor de Sodio	0,1761	104 320,00 kWh	\$ 10,432
LED	0,1969	32 640 kWh	\$ 3 264

*Nota. Autor.*

Con la información obtenida se procede a la definición de cada uno de los parámetros que serán ingresados dentro del software AMPL para la optimización y verificación de la mejor luminaria para obtener un ahorro energético y económico mayor. Para esto se definen los conjuntos parámetros función objetivo y restricciones cómo se muestra a continuación:

- **DEFINICIÓN DE CONJUNTOS**

*I = Conjunto de Costo por KW – indexado por i*

*J = Conjunto de Escenarios – indexado por j*

- **DEFINICIÓN DE PARÁMETROS**

*C<sub>e<sub>j</sub></sub> = Consumo Energético en Cada Escenario (kWh)*

*P<sub>j</sub> = Ponderación de Cada Escenario*

*V<sub>e<sub>i</sub></sub> = Costo por kWh de Iluminación (\$)*

- **VARIABLE DE DECISIÓN**



$G_{ij}$  Ponderación de Consumo Energético

- **FUNCIÓN OBJETIVO**

$$\text{MINIMIZAR FUNCION PONDERADA de Gasto Energético} = \sum_{j \in J} \sum_{i \in I} v_{e_i} * G_{ij} * C_{e_j}$$

- **RESTRICCIONES**

De Consumo de Energía

$$\sum_{j \in J} C_{e_j} > 0 \quad \forall j \in J$$

De Costo de Iluminación

$$\sum_{i \in I} v_{e_i} > 0 \quad \forall i \in I$$

De Ponderación

$$\sum_{j \in J} P_j > 0 \quad \forall j \in J$$

Basándose en las ecuaciones planteadas anteriormente se procede al ingreso de la información dentro del software AMPL en donde se crean 3 archivos tal y como se observa en la **Figura 23**, **Figura 24**, **Figura 25** los cuales contienen el modelo del sistema los datos y el archivo ejecución de la utilización.

**Figura 23.** Código AMPL de Datos luminarias.dat

```
data;
set Costos := CostoSodio CostoLED;
set Escenarios := VaporSodio LED;
param:      Cej      Pj      :=
  VaporSodio 104320 0.1761
  LED        32640  0.1969 ;
param:      Vei      :=
  CostoSodio 0.10
  CostoLED   0.11  ;
```

Fuente: Autor.

**Figura 24.** Código AMPL Modelo luminarias.mod

```

set Costos;
set Escenarios;
param Cej {Escenarios} > 0;
param Pj {Escenarios} >= 0;
param Vei {Costos} >= 0;
var Gj {j in Escenarios} >= Pj[j];
minimize Total_Cost:
sum {j in Escenarios, i in Costos} Cej[j] * Gj[j]*Vei[i];
subject to Total {i in Costos}:
    Vei[i] <= sum {j in Escenarios} Gj[j] <= 100000;

```

Fuente: Autor.

**Figura 25.** Código AMPL de Ejecución luminarias.run

```

model luminarias.mod
data luminarias.dat
option solver cplex;
solve;
display Gj;

```

Fuente: Autor.

Finalmente, al ejecutar la optimización se obtiene mediante el modelo matemático planteado el valor 5207,49 que se observa en la **Figura 26** correspondiente a la ponderación de costo por kWh de las luminarias LED, siendo el sistema más óptimo para la implementación de la vía Ilumán – Agato. Para el presente estudio se utilizó el optimizador CPLEX ya que permite la resolución de problemas de programación Lineal, que es el caso del estudio planteado. El resultado obtenido indica que la minimización del costo total obtenido 5207,48 es la menor para el caso de luminarias LED incluyendo su ponderación (Variable de Decisión) que se produce del producto del consumo por el costo de cada kWh.

**Figura 26.** Respuesta Óptima AMPL del Modelo de Luminarias

```

CPLEX 22.1.1.0: optimal solution; objective 5207.48928
0 dual simplex iterations (0 in phase I)
AMPL: display Total_Cost;
Total_Cost = 5207.49

```

Fuente: Autor.

Cómo se observa en la **Tabla 26** final de resultados se muestra que se tiene con la luminaria led un ahorro energía tico de 71680 kWh y un ahorro monetario de \$7,178 lo que muestra un resultado positivo de la implementación.

**Tabla 26.**

*Resultados de Eficiencia y Ahorro de Luminarias LED*

<b>Indicador</b>	<b>Resultado</b>
Consumo Energético Anual	32,640 kWh
Ahorro Energético Anual	71,680 kWh
Costo Anual	\$ 3,264
Ahorro Anual	\$7,168

*Nota. Autor.*

# CAPÍTULO IV

## 4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- Para determinar la tecnología lumínica más eficiente y adecuada, entre luminarias LED y de vapor de sodio, mediante técnicas de optimización matemática para la vía Ilumán-Agato, ubicada en la ciudad de Otavalo se planteó el modelo del sistema matemático evaluando los parámetros como eficiencia, consumo energético, nivel de iluminación, costo, precio de iluminación, deslumbramiento y factor de uniformidad generando un total de 9 escenarios de prueba para evaluar cada uno de estos criterios y así generar la base de datos que permitió identificar que la luminaria LED de 102W genera un ahorro energético anual de 71,680 kWh con un ahorro económico de \$7,168 con respecto a la luminaria de vapor de sodio actual que se encuentra en la instalación.
- Mediante la búsqueda de diversos proveedores y las regulaciones actuales que mantienen las Agencias Nacionales encargadas del control del servicio de alumbrado público, se identificaron dos tipos de luminarias las cuales se evaluaron en diversos escenarios de prueba y mediante el Software Dialux se evaluaron dentro de las características de la vía analizada, con esto se obtuvo que ambas luminarias cumplen con los parámetros técnicos para ser implementadas y así conseguir los datos para el posterior modelamiento matemático del sistema.
- Para determinar el costo de operación de ambas tecnologías lumínicas se evaluaron diversos aspectos dentro de la instalación para determinar el valor total que puede involucrar la instalación de cada una de las tecnologías. Dentro de esto se determinó que el costo de operación anual de luminarias LED es de \$3,264 con respecto al costo de luminarias de Vapor de Sodio con un valor de \$10,432, generando un mayor beneficio económico en operación para las luminarias LED.
- Se desarrolló un modelo matemático para evaluar la tecnología más eficiente en la vía Ilumán-Agato, para esto se utilizó cada uno de los escenarios de prueba de cada luminaria y sus respectivos criterios de evaluación para obtener la matriz de datos en cada tecnología. Se utilizó Matlab para determinar y evaluar mediante la ponderación de los criterios cuales poseen un mejor comportamiento para la vía analizada, obteniendo al Escenario 5 como ganador para Luminarias de Vapor de Sodio y al Escenario 3 como ganador para Luminarias LED. Con esto se procedió a evaluar y generar un nuevo modelo para determinar la eficiencia y costo relacionado

con el funcionamiento de ambos casos ganadores, para lo cual se utilizó el Software AMPL y se obtuvo mediante la optimización del sistema que las luminarias LED generan un menor costo de operación, lo que significa un ahorro energético y económico positivo para la empresa de alumbrado con un total de 32,640 kWh y \$ 3,264.

- Se recomienda plantear escenarios con otros tipos de luminaria y así determinar entre todas las posibles soluciones de un sistema de alumbrado cual solución se podría plantear como la más óptima considerando el total de posibles tipos de solución.
- Se recomienda hacer una evaluación de VAN y TIR para determinar el beneficio que se puede conseguir a largo plazo considerando la inversión total que se requiere para el reemplazo de luminarias de vapor de sodio que están actualmente en el sistema de alumbrado y colocar luminarias de tipo LED en base a los parámetros obtenidos y considerando el fabricante al cual se analizó.
- Se recomienda ampliar la base de datos de los escenarios obtenidos con diversas potencias de cada una de las luminarias y así obtener soluciones de mucho mayor ahorro sin despreciar la normativa y parámetros luminotécnicos necesarios para el correcto alumbrado de la vía Ilumán Agato.

## REFERENCIAS

- ARCERNNR. (2020). *RESOLUCIÓN Nro. ARCERNNR – 029/2020*.
- CEPAL. (2023). *La Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible Una oportunidad para América Latina y el Caribe*.
- Cóndor, J. (2018). *SELECCIÓN Y DIMENSIONAMIENTO ÓPTIMO DE LOS SISTEMAS DE ALUMBRADO PÚBLICO BASADO EN MÚLTIPLES CRITERIOS* . Quito: UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA .
- Empresa Eléctrica Quito. (03 de 03 de 2023). *EEQ. (EEQ) Recuperado el 28 de 12 de 2023*, de <https://www.eeq.com.ec/w/avanza-cambio-de-luminarias-con-tecnologia-led>
- INEN. (2014). RTE-069-1R. *INEN*, 1-11.
- INPROEL. (2023). *LUM OLYMPIA I SHP 150W240V C/FOCO LUMEC*. Obtenido de <https://inproel.spearhead.global/shop/product/l253001-lum-olympia-i-shp-100w240v-c-foco-lumec-22820?attrib=0-21#attr=>
- J. Wolf, H. H. (2013). *MONTAJE DE LA ILUMINACION TIPO LED EN SISTEMA DE ALUMBRADO PÚBLICO APLICADO AL USO RACIONAL DE LA ENERGIA EN LA INSTITUCIÓN UNIVERSITARIA PASCUAL BRAVO* . Medellín: INSTITUCIÓN UNIVERSITARIA PASCUAL BRAVO.
- M. Quichimbo, P. U. (2012). *Conservación y Administración de la Energía Eléctrica en el Sector de Alumbrado Público de Guayaquil 19 Resumen*.
- M. Rivadeneira, E. Z. (2015). Plan de Mejoramiento del Alumbrado Público de las Principales Avenidas de la Ciudad de Quito Mediante la Sustitución por Lámparas de Inducción. *Revista Técnica "energía"*. (11), 108-115.
- Ministerio de Energía y Recursos del Ecuador. (08 de 2022). *Recursos y energía*. (Ministerio de Energía y Recursos del Ecuador) Recuperado el 28 de 12 de 2023, de <https://www.recursosyenergia.gob.ec/plan-maestro-de-electricidad/>
- Montero, A. (2016). *Propuesta de alumbrado público con tecnología led en la Avenida José Gálvez, Chimbote 2016* . Chimbote: UNIVERSIDAD SAN PEDRO.

- Otorongo, M. (2021). *Análisis Técnico - Económico de factibilidad de implementación de sistemas de alumbrado público inteligente en Ecuador*. Quito: Escuela Politécnica Nacional.
- R. A. Ayala, P. O. (2020). Metodología de cálculo de pérdidas de potencia y energía en el sistema de alumbrado público del Ecuador. *Revista Técnica "energía"*, 1(17), 43-51.
- Rosas, J. (2017). *ANÁLISIS DE INGENIERÍA EN ALUMBRADO PÚBLICO CON LUMINARIAS LED APLICADO EN LA AVENIDA CENTRAL DEL DISTRITO DE VILLA EL SALVADOR*. VILLA EL SALVADOR: UNIVERSIDAD NACIONAL TECNOLÓGICA DE LIMA SUR.
- Tapia, G. (2024). *Análisis técnico económico para el cambio del alumbrado público convencional por tecnología led en la provincia de Cotopaxi*. [Tesis de Grado], Repositorio UTC.