ANÁLISIS MULTICRITERIO PARA EL DISEÑO ÓPTIMO DE ALUMBRADO PÚBLICO CON RESTRICCIONES DE EFICIENCIA, COSTOS Y CALIDAD DE LA ILUMINACIÓN

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE QUITO

CARRERA:
INGENIERÍA ELÉCTRICA

Trabajo de titulación previo a la obtención del título de
INGENIERO ELÉCTRICO

TEMA:

ANÁLISIS MULTICRITERIO PARA EL DISEÑO ÓPTIMO DE ALUMBRADO PÚBLICO CON RESTRICCIONES DE EFICIENCIA, COSTOS Y CALIDAD DE LA ILUMINACIÓN

AUTOR:
JIMA CÓNDOR ALEX FABRICIO

TUTOR:
ALEXANDER ÁGUILA TÉLLEZ

Quito D.M., febrero 2022

. Datos de Catalogación Bibliográfica .

ALEX FABRICIO JIMA CÓNDOR
ANÁLISIS MULTICRITERIO PARA EL DISEÑO ÓPTIMO DE ALUMBRADO PÚBLICO CON RESTRICCIONES DE EFICIENCIA, COSTOS Y CALIDAD DE LA ILUMINACIÓN
Universidad Politécnica Salesiana, Quito – Ecuador 2022
Ingeniería Eléctrica

Breve reseña histórica e información de contacto.

ALEX FABRICIO JIMA CÓNDOR (Y'1996 – M'11). Realizó sus estudios de nivel secundario en el Colegio Central Técnico de la cuidad de Quito. Egresado de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Politécnica Salesiana. Su trabajo se basa en un análisis multicriterio para el diseño óptimo de alumbrado público. ajima@est.ups.edu.ec

Dirigido por:

ALEXANDER ÁGUILA TÉLLEZ (Y'1981-M'09). Recibió el título de Ingeniero Eléctrico y el de Máster en Eficiencia Energética en los años 2005 y 2010 respectivamente. Doctor en Ingeniería en la Universidad Pontificia Bolivariana - Colombia-Medellín año 2021. Director de la carrera de Ingeniería Eléctrica, miembro del Grupo de Investigación GIREI. Sus principales intereses de investigación incluyen la compensación VOLTVAR en redes de distribución eléctrica, redes inteligentes, minimización de pérdidas de energía, las energías renovables y la eficiencia energética. Es profesor investigador de la Universidad Politécnica Salesiana Ecuador aaguila@ups.edu.ec

Todos los derechos reservados:

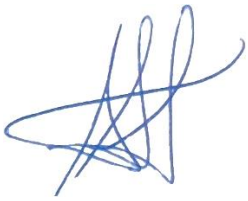
Queda prohibida, salvo excepción prevista en la ley, cualquier forma de reproducción, distribución, comunicación pública y transformación de esta obra para fines comerciales, sin contar con la autorización de los titulares de propiedad intelectual. La infracción de los derechos mencionados puede ser constitutiva de delito contra la propiedad intelectual. Se permite la libre difusión de este texto con fines académicos o investigativos por cualquier medio, con la debida notificación a los autores.

DERECHOS RESERVADOS©2022
Universidad Politécnica Salesiana
QUITO – ECUADOR

DECLARATORIA DE COAUTORÍA DEL DOCENTE TUTOR

Yo, Alexander Águila Téllez declaro que bajo mi dirección y asesoría fue desarrollado el trabajo de titulación Análisis Multicriterio Para El Diseño Óptimo De Alumbrado Público Con Restricciones De Eficiencia, Costos y Calidad De La Iluminación realizado por Alex Fabricio Jima Cóndor, obteniendo un producto que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana para ser considerado como trabajo final de titulación.

Quito D.M., febrero 2022



…….

Alexander Águila Téllez

C.C.: 1755983184

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

Yo, Alex Fabricio Jima Cóndor, con documento de identificación N° 1722739966, manifiesto mi voluntad y cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor del trabajo de grado/titulación intitulado: Análisis Multicriterio Para El Diseño Óptimo De Alumbrado Público Con Restricciones De Eficiencia, Costos y Calidad De La Iluminación, mismo que 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 aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en mi condición de autor me reservo los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribo este documento en el momento que hago entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito D.M., febrero 2022

…….

Alex Fabricio Jima Cóndor
C.C.: 1722739966

ÍNDICE GENERAL

1. Introducción 2
2. Marco Teórico 3
2.1 Alumbrado Público 4
2.1.1 Lámparas 5
2.1.2 Luminarias 6
2.1.3 Características técnicas de cada tipo de lámpara 6
2.1.4 Factor de Uniformidad de Iluminación 7
2.1.5 Factor de Uniformidad de Iluminancia 7
2.1.6 Deslumbramiento 7
2.1.7 Pérdidas de Potencia en el alumbrado público 7
2.2 Disposición de las Luminarias en el Sistema de Alumbrado Público 8
2.2.1 Unilateral 8
2.2.2 Central Doble 8
2.2.3 Pareada 8
2.2.4 Tresbolillo 8
2.3 Disposición en curvas, redondeles y cruces 9
2.3.1 Curvas 9
2.3.2 Cruces 9
2.3.3 Redondeles o Glorietas 9
2.4 Optimización para el sistema de Alumbrado Público 9
2.5 Métodos de Cálculo para el Alumbrado Público 9
2.5.1 Factor de Utilización 9
2.5.2 Cantidad de Luminarias 10
2.5.3 Flujo Luminoso 10
2.6 Contaminación Lumínica 10
2.6.1 Características del flujo luminoso en lámparas 11
2.6.2 Poco contaminantes 11
2.6.3 Medianamente contaminantes 11
2.6.4 Muy contaminantes 11
2.6.5 Impactos en el medio ambiente 11

3. Metodología 11
3.1 Planteamiento Matemático 11
3.1.1 Análisis de las funciones objetivos (Criterios) 12
3.2 Casos de estudio 14
3.2.1 Caso de estudio 1 14
3.2.2 Caso de estudio 2 15
4. Análisis de Resultados 15
4.1.1 Análisis de resultados casos de estudio 1 y 2 15
4.1.2 Análisis de los resultados individuales de cada variable (criterio) 17
5. Conclusiones 20
6. Futuros Trabajos 20
7. Referencias 20
7.1 Matriz de Estado del Arte 24
7.2 Resumen de Indicadores 27

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Disposición Unilateral 8
Figura 2. Disposición Central Doble 8
Figura 3. Disposición Pareada 8
Figura 4. Disposición Tresbolillo 8
Figura 5. Calle urbana 15
Figura 6. Carretera 15
Figura 7. Criterios normalizados para escenarios de alumbrado público (caso de estudio 1) 15
Figura 8. Criterios normalizados para escenarios de alumbrado público (caso de estudio 2) 16
Figura 9. Sumas ponderadas para cada escenario de alumbrado público (caso 1) 16
Figura 10. Sumas ponderadas para cada escenario de alumbrado público (caso 2) 16
Figura 11. Alternativa Ganadora (caso 2) 17
Figura 12. Alternativa Ganadora (caso 1) 17
Figura 13. Alternativa ganadora considerando costos (caso 1) 17
Figura 14. Alternativa ganadora considerando costos (caso 2) 18
Figura 15. Alternativa ganadora considerando nivel de iluminación (caso 1) 18
Figura 16. Alternativa ganadora considerando nivel de iluminación (caso 2) 18
Figura 17. Alternativa ganadora considerando eficiencia (caso 1) 18
Figura 18. Alternativa ganadora considerando eficiencia (caso 2) 18
Figura 19. Alternativa ganadora considerando factor de uniformidad (caso 1) 18
Figura 20. Alternativa ganadora considerando factor de uniformidad (caso 2) 19
Figura 21. Alternativa ganadora considerando deslumbramiento (caso 1) 19
Figura 22. Alternativa ganadora considerando deslumbramiento (caso 2) 19
Figura 23. Resumen e indicador de la temática - Estado del arte 27
Figura 24. Indicador de formulación del problema - Estado del arte 28
Figura 25. Indicador de solución - Estado del arte 29

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Vida útil y eficiencia de los tipos de lámparas 6
Tabla 2. Tipos de lámparas de iluminación y eficiencia energética [7]. 6
Tabla 3. Máxima potencia en luminarias [26]. 7
Tabla 4. Altura de postes y luminosidad [7]. 10
Tabla 5. Tipos de vía e iluminancia para alumbrado público [28]. 10
Tabla 6. Variables del algoritmo de toma de decisiones multicriterio 14
Tabla 7. Algoritmo de Decisión Multicriterio 14
Tabla 8. Alternativa ganadora aplicando el método multicriterio (1) 16
Tabla 9. Alternativa ganadora aplicando el método multicriterio (2) 17
Tabla 10. Alternativas ganadoras por cada variable criterio (caso de estudio 1) 19
Tabla 11. Alternativas ganadoras por cada variable criterio (caso de estudio 2) 19
Tabla 12. Matriz estado del arte 24

ANÁLISIS MULTICRITERIO PARA EL DISEÑO ÓPTIMO DE ALUMBRADO PÚBLICO CON RESTRICCIONES DE EFICIENCIA, COSTOS Y CALIDAD DE LA ILUMINACIÓN

Resumen

Esta investigación se basa en un algoritmo de optimización multicriterio que permite potenciar el sistema de alumbrado público y mejorar la eficiencia y calidad de iluminación. El método multicriterio propone entre un conjunto de soluciones individualmente posibles elegir la solución óptima, todo esto con base en el análisis de cada una de las variables criterio. Dicho algoritmo fue desarrollado dentro del programa Matlab, el cual analiza las variables criterio costos, nivel de iluminación, eficiencia, factor de uniformidad y deslumbramiento; obteniendo el resultado óptimo para una calle urbana y carretera; casos de estudio que son propuestos en esta investigación. Los resultados obtenidos determinan el escenario correcto para el tipo de luminarias y el tipo de distribución que se realizará en el sistema de alumbrado público. Se llegó a la conclusión de que el método de análisis ayuda notablemente a cualquier problemática que se pueda presentar dentro de la ingeniería eléctrica.

Palabras Clave: Optimización, Análisis Multicriterio, Costos, Factor de Uniformidad, Nivel de iluminación, Eficiencia, Variables, Alumbrado Público.

Abstract

This research is based on a multi-criteria optimization algorithm that enhances the public lighting system and improves the efficiency and quality of lighting. The multi-criteria method proposes a set of individually possible solutions to choose the optimal solution, based on the analysis of each of the criterion variables. This algorithm was developed within the MATLAB program, which analyzes the criterion variables cost, lighting level, efficiency, uniformity factor, and glare, obtaining the optimal result for an urban street and highway, case studies that are proposed in this research. The results were obtained to determine the correct scenario for the type of luminaires and the type of distribution to be implemented in the public lighting system. It was concluded that the analysis method helps significantly to any problem that may arise in electrical engineering.

Keywords: Optimization, Multicriteria Analysis, Costs, Uniformity Factor, Lighting Level, Efficiency, Variables, Street Lighting.

1. Introducción

Thomas Alva Edison creó la luz eléctrica el 22 de octubre de 1879, construyendo la primera lámpara incandescente de filamento, desde entonces se ha incluido este artefacto en el alumbrado público general, invento que fue empleado en años pasados y hoy en día ya no se utiliza este tipo de tecnología. Actualmente, con el crecimiento acelerado poblacional, tanto en nuevas calles de circulación, tanto urbano y rural, han generado grandes aumentos de demanda energética [1], por lo que se han pensado nuevas maneras artificiales de iluminar las calles, carreteras y obtener un servicio eficiente en el tránsito de peatones y vehículos.

En tal sentido, el desarrollo tecnológico motivó a generar nuevas fuentes de iluminación; esto ha supuesto un gran paso adelante en el ámbito del alumbrado público en beneficio de la sociedad, en especial a disminuir el consumo de energía en la iluminación urbana, lo que ha generado una trascendencia representativa en el ámbito energético y económico de varias ciudades [2].

A nivel mundial, el alumbrado público es una causa importante de consumo de electricidad; actualmente el 3.19 % de la generación global de energía eléctrica se usa para este fin. Dicho porcentaje es sumamente alto y es muy superior a la producción de las centrales hidroeléctricas o nucleares del mundo, además de que es equivalente a la generación xxx de gas natural [3].

En relación con la iluminación externa, esta mantiene un costo bastante alto, en donde los puntos económicos, energéticos y estéticos tienen que ser analizados. Siendo notable considerar el nivel del luminosidad en la vía y tránsito en la misma [4].

Cabe mencionar que el sistema de alumbrado público en gran mayoría emplea VSAP (vapor de sodio a alta presión); esta tecnología ayuda a reducir de manera correcta el consumo de electricidad por medio de su iluminación [5].

En tanto, los estudios del sistema de alumbrado público presentan como finalidad, entender los conceptos básicos de iluminación en avenidas, parques, calles, autos y en lugares de recreación pública para realizar acciones de forma adecuada [6].

Pero, hoy en día, esos sistemas presentan algunos inconvenientes en los mantenimientos preventivos, pues frecuentemente su nivel de reparación es alto en costos, debido a que el diseño de la iluminación es erróneo o existe una mala distribución de circuitos, por eso se busca una optimización para mejorar la eficiencia energética. Por ejemplo, se plantea el uso de una red eléctrica inteligente, con sensores de luz y tecnología de regulación, donde se obtiene mayor eficiencia y los gastos de energía se reducen significativamente, así como las emisiones de carbono.

Es decir que, con estas nuevas tecnologías el sistema de alumbrado público obtiene mejor eficiencia energética, minimizando la reposición de luminarias y menos mantenimiento a la red eléctrica [7]. Su entrada en operación inicia a las 18:00 y termina a las 6:00 del día siguiente; el funcionamiento generalmente es activado por foto controles de manera individual o generando una activación múltiple, todo esto por medio de un interruptor automático [8].

La tecnología LED se ha introducido con el paso de los años y el sistema de alumbrado público no ha sido la excepción. Este recurso presenta mayor tiempo de vida útil, menor fatiga de

visualización, menor emisión de calor, gran variedad de colores y aun gran ahorro de consumo de energía [9].

Dicho todo lo anterior, la alternativa que se plantea en esta investigación es basada en la implementación de un método de optimización multicriterio [10]–[12], este permite mejorar simultáneamente varios criterios de decisión: costos, eficiencia, nivel de iluminación, factor de uniformidad y deslumbramiento.

La investigación consta inicialmente de una introducción para dar paso a su sección dos, un marco teórico sobre el tema mencionado, donde se analiza la explicación del tema, los tipos de lámpara y luminarias, los métodos de iluminación que se han implementado en el alumbrado público, tablas de comparación entre los diferentes tipos de lámparas, entre otros temas relevantes.

Luego, en la parte tres, se describe el planteamiento de la metodología y la formulación del problema, así como el concepto de optimización multicriterio con teoría de decisión y dentro de esta sección los casos de estudio.

En la sección cuatro se explica el análisis de los resultados alcanzados a través del algoritmo de optimización.

Posteriormente en la parte cinco se describe las conclusiones derivadas de los análisis de cada uno de los resultados. Para terminar en la sección seis se encuentra una propuesta para trabajos a futuro.

2. Marco Teórico

A medida que se desarrollan la economía y la sociedad, el problema entre la energía y el medio ambiente se ha vuelto más importante; es así que, con la construcción de nuevas ciudades inteligentes se logra minorizar el consumo energético y perfeccionar la eficiencia energética de las instalaciones públicas. A razón de esto, el tema se ha vuelto importante para el sector urbano [13].

El alumbrado público pasa hacer una infraestructura relevante en las ciudades inteligentes, cuentan con conexión a internet e inteligencia artificial, estas se han convertido en un campo de investigación dentro y fuera del país [13].

Cabe indicar que el alumbrado público es un servicio municipal y se debe considerar como un derecho de las personas, al tener gran impacto en el presupuesto económico y energético a nivel mundial, su uso es requerido en las horas nocturnas para tener mayor seguridad en movilidad [14].

Sobre esto es posible afirmar que las ciudades requieren iluminación de forma autónoma para lugares de circulación como las vías públicas y centros de recreación como parques, y que su función principal sea proporcionar una visibilidad básica.

Las lámparas más utilizadas para el efecto son las VSAP(vapor de sodio a alta presión), VSBP (vapor de sodio a bajar presión) y las lámparas de mercurio [14]. Para utilizar estas lámparas, los sistemas de iluminación vial deben cumplir requisitos tanto cuantitativos como cualitativos que garanticen una observación rápida y cómoda en las condiciones ambientales más desfavorables, de esta manera se incrementa la seguridad de las personas y grupos. Su eficiencia energética está probada en situaciones en las que la potencia mínima proporciona un criterio de rendimiento lumínico igual al criterio de confort visual [15].

Es así que se deben garantizar excelentes resultados en esta práctica, aplicando sistemáticamente los conocimientos y los métodos adecuados para lograr la eficiencia energética. Cabe

indicar que además se debería llevar a cabo y utilizar tecnología para grupos de trabajo, recursos humanos, procesos y procedimientos de administración, control e idealización, que mejoren su manejo [16].

El alumbrado público, ha mostrado grandes avances tecnológicos; la implementación y sustitución de tecnologías más antiguas ha tenido un impacto positivo en la eficiencia energética, sobre todo en términos de deslumbramiento y reducción de costos. En la iluminación artificial se espera una gran representación de ahorro de energía eléctrica, pues alrededor del 30% de esta, en todo el mundo se utiliza para iluminación artificial [17].

No solo se toma en cuenta a las lámparas del alumbrado público por los términos de luz emitida por vatio de energía consumida, así mismo se toman en cuenta los colores de acuerdo con las especificaciones para las cuales se utilizan. El alumbrado participa en el diseño de diversos tipos de iluminación y establece el flujo luminoso de lámparas y otras propiedades técnicas en relación con la luminosidad de carreteras y parques.

Debido a que se ha identificado a este sistema como un área de uso intensivo de energía existe la premisa de que se introduzcan nuevas fuentes de luz económicas y eficientes que pueden resultar en ahorros significativos [18].

2.1 Alumbrado Público

Es sabido que el ahorro energético y la protección ambiental se han convertido en temas de alta trascendencia [19].

En tal sentido, es una de las características más relevantes de la ciudad, esto se debe a que proporciona un entorno más seguro y cómodo para los transeúntes, usuarios en carreteras, centros de diversión y lugares públicos donde se permiten acciones nocturnas [20]. A nivel general este servicio representa una gran cantidad de facturación porque cumple varios índices de seguridad, confiabilidad y eficiencia [21]. sin embargo, buena parte del sistema utiliza tecnología obsoleta, como son las lámparas de mercurio de alta presión, mismas que por lo general permanecen encendidas toda la noche, provocando un gran consumo de energía [3], [21].

Por otra parte, los sistemas de control de alumbrado público se emplean para controlar la iluminación, otorgando un grado de luminosidad adecuado para automóviles y peatones, así también encienden y apagan el alumbrado público y monitorean el estado operativo de las lámparas. Sobre esto Jia y Guo expusieron tres tipos fundamentales: sistema de control de línea, sistema de autocontrol y sistema de control inalámbrico [20].

Siendo que su objetivo principal es tener una mayor eficiencia lumínica en las noches, esto permite a los peatones o conductores realizar sus actividades con normalidad y evitar accidentes de tránsito o robos en las calles; según estudios, un buen diseño de alumbrado ayuda a reducir un 20% de la delincuencia en los lugares públicos [22].

En tanto que, reducir el consumo de electricidad en un 40% puede disminuir significativamente el consumo de electricidad en la iluminación, entre el 20% al 11%, esto genera muchas ventajas, por ejemplo, no construir nuevas centrales eléctricas y ayudar a disminuir la emisión de carbono, lo que representa un menor calentamiento global [22].

Una actividad frecuente que se utiliza para monitorear el alumbrado público es la contratación de un operador, este suele

armar rutas programadas y observa el estado de las luminarias. Cabe indicar que este método carece de escalabilidad y fiabilidad técnica [23].

Antes, en la mayoría de las ciudades el sistema se controlaba únicamente de forma manual, es decir que cada alumbrado tenía un interruptor de control, por lo que abrir y cerrar el circuito de la lámpara era un problema. Alternativamente, se usaba un método de control de luz para configurar el circuito, mismo que constaba de un sensor de luz para cambiar la resistencia, de modo que las lámparas automáticamente se enciendan en la noche y se apaguen por la mañana; pero la baja confiabilidad del método, produjo un alumbrado público en las noches demasiado brillante, que genera un desperdicio de energía, entre demás problemas [24].

Otro sistema de control de alumbrado público, consiste en el método de control de tiempo. Este se reconoce como la segunda generación de control, y logró minimizar la intensidad de la luminosidad, reduciendo los costos de mano de obra y mejorando la eficiencia energética [24].

Sin embargo, aun así, el sistema de alumbrado público es deficiente porque muchas de las lámparas se controlan por la estrategia de luces de medianoche (foto control) y el ahorro de energía es bajo, ya que en ciertas horas no transitan muchos vehículos.

En este contexto es importante señalar que, para realizar proyectos de alumbrado público, se debe tomar en cuenta el tipo de luminaria a instalar, es decir sus propiedades como flujo luminoso, eficiencia, durabilidad, potencia, costo de las luminarias y la distancia y altura optima entre postes. Además, para desarrollar un óptimo diseño se toma en consideración varios factores; entre ellos, visibilidad, economía, estética, ambiente y características de los equipos [14]. Además, durante el desarrollo del diseño de alumbrado público, también se toma en cuenta la elección de la vía a iluminar, los valores en la iluminación, luminaria, lámpara, arreglo geométrico y cálculos [14].

2.1.1 Lámparas

Las lámparas son dispositivos que emiten una fuente de luz artificial; su función es brindar iluminación por medio de una luminaria a una zona específica [14].

La vida útil de la lámpara está determinada por la temperatura que alcanza el filamento durante las operaciones de encendido; cuanto mayor es la temperatura mayor es el flujo luminoso y existe una mayor tasa de evaporación de los materiales que componen el filamento [14]. En la medida en que se usen, existen varios parámetros para conocer su vida útil:

- **Vida individual:** La cantidad de tiempo que transcurre antes de que la lámpara se apague en condiciones normales.
- **Vida promedio:** Momento que, en determinadas condiciones, un conjunto de lámparas comienza a presentar fallos.
- **Vida útil:** Número de horas de funcionamiento establecidas, sin embargo, por razones de economía y eficiencia lumínica, es recomendable cambiar las lámparas de una instalación antes de que lleguen a su número de horas útil.

  En este sentido, la vida útil de la lámpara es importante porque ayuda a determinar sus tiempos de recambio.

En el alumbrado público las lámparas son organizadas acorde al sitio de su

instalación, vida útil, tipo de tecnología, potencia, nivel de iluminación, deslumbramiento, rendimiento, y por su utilidad como: iluminación de carreteras, urbana y rural, y de zonas de recreación [22].

En la tabla uno se describen los grupos de lámparas empleadas para el diseño de iluminación, incluyendo su vida útil y eficiencia.

Tabla 1. Vida útil y eficiencia de los tipos de lámparas

Tipo de lámpara	Lúmenes (watt-J/s)	Vida útil (horas)
Incandescente	8-26	1000-2000
Fluorescente	60-400	10000-24000
Vapor de sodio de alta presión	45-110	10000-28000
Vapor de sodio de baja presión	80-180	10000-20000
VMPA	60-100	6000-14000
Haluro Metálico (HM)	60-600	8000-16000
Luz mezcla (LM)	20-60	3000-6000
LED	28-79	25000-100000

2.1.2 Luminarias

Se define luminaria a la unidad de luz que es destinada para albergar una o varias lámparas y son módulos que tienen características mecánicas y eléctricas [25]. Dichas luminarias deben cumplir con varios requisitos.

1. Servir como apoyo y conexión eléctrica para las lámparas.
2. Fácil mantenimiento e instalación
3. Buena estética.
4. Mantener la temperatura de la lámpara dentro de los límites especificados.
5. Tener un control de la luz emitida para las lámparas.

Comúnmente su diseño e instalación permiten situarlos en columnas, postes metálicos, postes de madera u otros materiales, en donde estas deberán ser fijadas o suspendidas a lo largo de una vía, carretera, parque, plaza etc. [26].

2.1.3 Características técnicas de cada tipo de lámpara

En la Tabla 2 se presentan las distintas lámparas que se usan en el alumbrado público.

Tabla 2. Tipos de lámparas de iluminación y eficiencia energética [8].

Lámparas de vapor de sodio				
Potencia (Watt)	**Flujo Luminoso**	**Eficiencia (Lm/Watt)**	**Vida Útil Horas**	**Costo**
100	10700	107	28700	31
150	18000	117	32000	33
250	33000	130	36000	35
400	58400	138	36000	35
Lámparas de haluros metálicos				
Potencia (Watt)	**Flujo Luminoso**	**Eficiencia (Lm/Watt)**	**Vida Útil Horas**	**Costo**
100	71000	110	28700	350
150	8500	81.7	32000	77
250	20500	82	36000	154
400	36000	90	36000	175
Lámparas de luz mezcla				
Potencia (Watt)	**Flujo Luminoso**	**Eficiencia (Lm/Watt)**	**Vida Útil Horas**	**Costo**
100	1100	11	6000	7
160	3150	20	6000	15
250	5000	25	6000	29
500	5550	30	10000	74
Lámparas LED				
Potencia (Watt)	**Flujo Luminoso**	**Eficiencia (Lm/Watt)**	**Vida Útil Horas**	**Costo**
60	6600	110	50000	180
90	9900	110	50000	270
150	16500	110	50000	410
220	24200	110	50000	600

Cabe indicar que las luminarias tienen un alto nivel de importancia en la cotidianidad y por ello mantenerlas en buen estado y en excelente

funcionamiento ayudará a controlar los costos excesivos derivados de su mantenimiento y operación [27]. Cada espacio o lugar, tiene una lámpara y luminaria adecuada de forma específica de acuerdo con modelo, vida útil, eficiencia, flujo luminoso y la emisión de colores en el lugar donde se va a iluminar [28].

2.1.4 Factor de Uniformidad de Iluminación

Este factor consiste en la relación entre la iluminancia mínima y la iluminancia media sobre una misma área [25]. Se calcula con la Ecuación (1).

$$E_1 = \frac{E_{MIN}}{E_{MED}} \qquad (1)$$

También se puede considerar la relación entre la iluminancia mínima y la iluminancia máxima sobre una misma área [25]. Se calcula con la Ecuación (2).

$$E_1 = \frac{E_{MIN}}{E_{MAX}}, \qquad (2)$$

2.1.5 Factor de Uniformidad de Iluminancia

Consiste en la relación entre la luminancia mínima y la iluminación media sobre una misma área [25]. Se calcula con la Ecuación (3)

$$U_1 = \frac{L_{MIN}}{L_{MED}}, \qquad (3)$$

2.1.6 Deslumbramiento

El deslumbramiento está relacionado con el resplandor, pero no depende de él, si no de la diferencia de resplandor [25]. Esta situación se presenta al tener iluminados varios objetos con grandes diferencias de brillo. Algunos de los problemas que causa son:

- Cansancio visual
- Tener un mal aspecto en los objetos a iluminar
- Forzar la vista
- Disminución al alcance visual

2.1.7 Pérdidas de Potencia en el alumbrado público

Por lo general, la pérdida de energía en el alumbrado público es causada por el balasto de la lámpara, además existen perdidas no técnicas debido a fallas en la red o fallas en el sistema de control [29].

También se originan por la incorrecta facturación; cuando no es facturado el total de la energía generada por su concepto. Esta situación forma parte de las pérdidas no técnicas en el gasto [29], [30].

Al respecto, el Reglamento Arconel N°006/18 establece que la “Prestación de los Servicios Generales de Alumbrado Público” tiene por objeto “ establecer las condiciones técnicas que permitan a las empresas distribuidoras prestar dichos servicios”. Servicio de alumbrado público de alta calidad y eficiencia [29].

La Tabla 3 a continuación describe los valores máximos de consumo de los accesorios para el sistema de iluminación.

Tabla 3. Máxima potencia en luminarias [26].

Potencia (W)	Potencia máxima en VSPA (%)	Potencia máxima en LED (%)
P≤70	16	10
70<P≤100	15	
100<P≤150	13	
P>150	12	

En tal sentido, en los sistemas de alumbrado público, el tiempo de

ejecución se controla mediante un sistema de reloj o fotocélula. En el primer caso, esta funcionará durante 12 horas, en el segundo, según el nivel de iluminación. Sin embargo, se toma en cuenta solamente 12 horas como tiempo de operación, más no las horas en que funciona la fotocélula.

Para implantar los límites permitidos de pérdidas en el servicio general de alumbrado público, se tiene como base de análisis a las próximas normativas y referencias que están dentro del cita número [31] .

2.2 Disposición de las Luminarias en el Sistema de Alumbrado Público

En las carreteras o calles con una sola calzada se conocen cuatro disposiciones fundamentales: unilateral, bilateral tresbolillo, centrada y bilateral pareada. Según el ancho de la vía que se va a iluminar se deberá escoger el mejor arreglo geométrico [14].

2.2.1 Unilateral

Esta disposición se aplica cuando la altura de la luminaria supera el ancho de la calle y la luz se instala únicamente a un lado de la calzada. Esto se puede ver en la Figura 1.

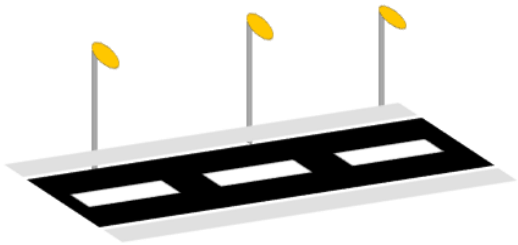


Figura 1. Disposición Unilateral

2.2.2 Central Doble

Esta disposición se utiliza cuando se presentan carriles dobles con una vereda en la mitad que no debe ser menor a 1.5m de ancho. Su formato se evidencia en la Figura 2.

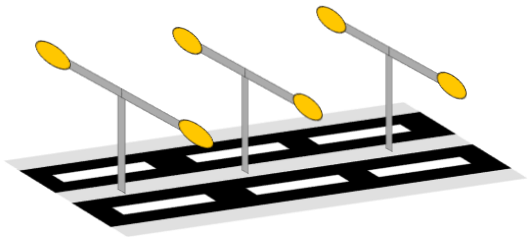


Figura 2. Disposición Central Doble

2.2.3 Pareada

Se usa mucho cuando se tiene un ancho de la calzada mucho más grande que la altura de instalación de la luminaria. Esto se aprecia de manera gráfica en la Figura 3.

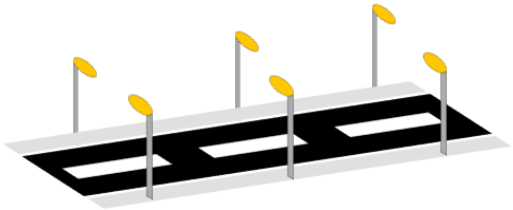


Figura 3. Disposición Pareada

2.2.4 Tresbolillo

Se aplica cuando se tiene un ancho de la vía poco superior a la altura de instalación de la luminaria, por lo que se la puede instalar en forma de zigzag, tal como se evidencia en la Figura 4.

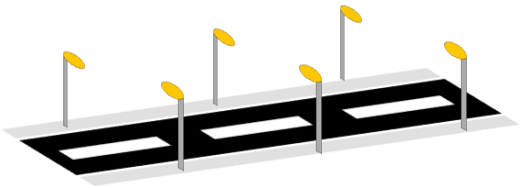


Figura 4. Disposición Tresbolillo

2.3 Disposición en curvas, redondeles y cruces

2.3.1 Curvas

Para mantener una eficiente iluminación se debe disminuir la distancia entre luminarias. Comúnmente, estas se instalan en el lado exterior de las curvas conservando una distancia entre luminarias del 70%; pero, si existe una curva cerrada la distancia entre las luminarias será del 50% [14].

2.3.2 Cruces

La posición de las luces debe ser tal que el conductor pueda reconocer obstáculos en el área iluminada o en el área iluminada contrastada. Por ejemplo, en una sección de cruce de peatones, las luminarias deben colocarse detrás de este para crear un contraste entre el cuerpo no iluminado del peatón y la vía iluminada [14].

2.3.3 Redondeles o Glorietas

La posición de las luminarias debe colocarse por cada vía concurrente y por las vías que el automóvil abandona el redondel. Si es posible, se debe colocar una luminaria en su parte central [14].

2.4 Optimización para el sistema de Alumbrado Público

Una optimización es realizar una búsqueda para encontrar la mejor solución entre varias posibles [32]. Para resolver un problema de optimización se debe tener en cuenta.

- ✓ Función Objetivo: Es la ecuación optimizada que tendrá límites o restricciones definidas y tendrá variables que requerirán ser maximizadas o minimizadas utilizando programación lineal o no lineal.
- ✓ Variables: Afectan el valor de la función objetivo y representan las decisiones que se pueden tomar, se dividen en dependientes e independientes.
- ✓ Restricciones: Representadas por ecuaciones o inecuaciones, se toman en cuenta para resolver la función objetivo.

2.5 Métodos de Cálculo para el Alumbrado Público

2.5.1 Factor de Utilización

El método determina el tipo de luminaria, la eficiencia de la luminaria y como se va a disponer a lo largo de la instalación, teniendo en cuenta las características individuales del área a iluminar [33]. Se calcula mediante las siguientes ecuaciones.

$$E_1 fu = \frac{\phi util}{\phi lámpara} > 0.25 \qquad (4)$$

Donde:

fu	factor de utilización.
$\phi util$	flujo útil, de una iluminancia en la superficie requerida (lúmenes).
$\phi lámpara$	flujo de la lámpara (lúmenes).

Ecuación de la Utilancia (U).

$$U = \frac{Fu}{\eta} \qquad (5)$$

Donde:

fu	factor de utilización.

n	rendimiento de acuerdo por la lámpara y luminaria.
U	utilancia.

Rendimiento (η)

$$\eta = \frac{\phi luminaria}{\phi lámpara} \quad (6)$$

Donde:

$\phi luminaria$	flujo luminoso de la luminaria (lúmenes)
$\phi lámpara$	flujo luminoso de la lámpara (lúmenes).

2.5.2 Cantidad de Luminarias

$$N = \frac{L}{D} + 1 \quad (7)$$

Donde:

N	número de luminarias.
L	largo de la vía a iluminar.
H	altura del punto de iluminación con relación a la calle
R	correlación entre separación/altitud.
D	$R * H$ separación entre los puntos de largo de la calle a alumbrar.

A continuación, en la Tabla 4, se aprecia la base para conocer el tipo de lámpara (lúmenes), y altura de instalación según el área donde se va a iluminar.

Tabla 4. Altura de postes y luminosidad [8].

Altitud del Poste (m)	Luminosidad (Lm)
6-8	3000 a 10000
8-10	10000 a 20000
10-12	20000 a 40000
12-14	40000

2.5.3 Flujo Luminoso

Se calcula mediante la iluminancia media al analizar la cantidad que irradia la lámpara en la vía, mediante la Ecuación (8).

$$Em = \frac{\eta * fm * \varphi L}{A * d} \quad (8)$$

Donde:

Em	iluminación media
n	rendimiento
fm	factor de mantenimiento
φL	luminosidad
A	amplitud de la calle
d	separación de los postes.

A continuación, en la Tabla 5, se presenta el nivel de iluminancia media. Los valores que se indican se clasifican de acuerdo con la clase de vía, pavimento y tráfico.

Tabla 5. Tipos de vía e iluminancia para alumbrado público [28].

Vía	Iluminancia media (Lux)
Tipo A	35
Tipo B	35
Tipo C	30
Tipo D	28
Tipo E	25

2.6 Contaminación Lumínica

La contaminación lumínica es un destello de luz en el cielo, creado en las noches por el reflejo de la luz artificial y la dispersión de gases y partículas mediante el uso de la luz. Todo eso es producido

por el mal apantallamiento de la iluminación en exteriores [25].

2.6.1 Características del flujo luminoso en lámparas

Cada tipo de lámpara tiene un efecto diferente; cuanto mayor es el área espectral que emite , mayor es su efecto contaminante [25].

A continuación, se describen las lámparas de acuerdo con su grado de contaminación.

2.6.2 Poco contaminantes

Vapor de sodio de baja presión: Su luz se emite en una pequeña región del espectro, y es de color amarillento y monocromático. Su uso es para alumbrados de seguridad y vías no urbanas, son eficientes y no contiene muchas sustancias nocivas y peligrosas [25].

Vapor de sodio de alta presión: Su luz se emite en el espectro visible; es ligeramente amarillenta con una eficiencia del 80% al 20%. Se utiliza para todo tipo de alumbrado exterior [25].

2.6.3 Medianamente contaminantes

Lámpara incandescente: Su luz es ligeramente amarilla, tiene una reproducción cromática del 100%. No se utiliza para iluminación exterior, sino solo para detalles decorativos, su eficiencia es baja [25].

Lámpara incandescente halógena: Su rango de eficiencia es un poco mejor comparado con las incandescentes.

Lámpara de mercurio a baja presión: Su luz blanca y el rendimiento está entre el 40% y el 90%. Se utiliza para la iluminación de peatones y parques.

2.6.4 Muy contaminantes

Lámpara de mercurio a alta presión: Su luz es blanca y la eficiencia es inferior al 60%. Se utiliza en parques y lugares peatonales, las luces de descarga son menos efectivas [25].

Lámpara de halogenuro metálico: Luz blanca azulada y eficiencia del 60% al 90%. Utilizado en eventos deportivos y grandes áreas donde se requiere un alto rendimiento; son efectivas pero de corta duración [25].

2.6.5 Impactos en el medio ambiente

El impacto ambiental de la contaminación lumínica no verificada se aplica a los ambientes oscuros afectados por la luz artificial del cielo [25]. En caso de impacto donde se encuentran las luces es por deslumbramiento y exceso de luz, vialidad insegura, pérdida de energía, robo y falta de visualización [25].

3. Metodología

En esta sección se describe matemáticamente el algoritmo que se será empleado para el diseño optimo del alumbrado público, con base a una optimización multicriterio.

3.1 Planteamiento Matemático

El alumbrado público ha sido analizado principalmente como un problema de optimización; destacando que actualmente se están utilizando nuevas tecnologías y luminarias. En este problema coexisten diferentes variables que tienen un grado de importancia en la solución.

Se determina una única función con varios criterios de decisión como son los costos de instalación, nivel de

iluminación, eficiencia, factor de uniformidad y deslumbramiento. Se desarrolla un modelo de optimización con una técnica multicriterio con teoría de decisión, donde n serán los números de escenarios y k las funciones objetivo para la optimización [34].

Lo mencionado se la expresa de la siguiente manera:

$$F(x) = [F1\ (x), F2\ (x), \dots, Fk\ (x)] \quad (9)$$
$$e(x) = [e1\ (x), e2\ (x), \dots, es(x)] \geq 0 \quad (10)$$
$$\text{Donde } x = [x1, x2, \dots, xn] \in X \quad (11)$$
$$X^* = \min\{F(x) \in x_{pond}\} \quad (12)$$

Para definir de manera óptima se tiene en cuenta una variable x que se denomina como un vector de decisión y una X^* que tendrá el vector ganador, en este caso será para minimizar según los impactos que tenga cada criterio mediante un análisis ponderado en el vector x. Este problema de optimización consiste en encontrar una x que tenga la mejor función x, para ello se tendrá un conjunto de restricciones $e(x) \geq 0$ el cual permitirá tener un grupo de soluciones favorables en X y un grupo de vectores favorables x. Como consecuencia se concluye que para tener un grupo de soluciones se genera un vector optimo X^* que debe convencer a un conjunto de restricciones $e(x) \geq 0$ [35].

Se requiere una definición precisa para aplicar este método, considerado sus métricas medibles. Para calificar, las alternativas deben evaluarse en función de su importancia para cada uno de los criterios cualitativos o cuantitativos. El último paso, la matriz que decide la solución óptima que incluye criterios de decisión en todo el espacio de búsqueda.

3.1.1 Análisis de las funciones objetivos (Criterios)

En este apartado se tiene como variables (criterios) a los costos, el nivel de iluminación, la eficiencia, y factor de uniformidad y deslumbramiento; todas estas fueron detalladas en el capítulo dos.

Para la resolución se utiliza DIAlux, que permite obtener los resultados de cada variable (criterio) para luego llevarlas a la matriz de decisión.

Las funciones objetivo establecidas se ajustan de tal forma que puedan ser aplicadas a problemas de optimización como funciones minimizadas.

FO1: Costo de luminarias

$$F01 = \#\text{ de luminarias } * \text{costo invidual} \quad (13)$$

FO2: Nivel de iluminación

$$F02 = \Phi * \#\text{de luminarias} \quad (14)$$

FO3: Eficiencia de la luminaria

Para esta función objetivo se considera la eficiencia de acuerdo a la ficha técnica.

FO4: Factor de uniformidad

$$E_1 = \frac{E_{MIN}}{E_{MED}} \quad (15)$$

FO5: Deslumbramiento

$$Lv = 10 * \sum\left(\frac{Eg}{\theta^2}\right) \quad (16)$$

Donde:

Lv es la luminancia en cd/m^2

Eg iluminancia sobre el ojo humano.

θ el ángulo en grados entre la dirección de transmisión de la luz al ojo y la dirección de observación.

$\sum$ sumatorio que se extiende a todas las luminarias instaladas.

$$\text{Minimizar F} = [\text{FO1}, \text{FO2}, \text{FO3}, \text{FO4}, \text{FO5}, \text{FO6}] \quad (17)$$

Donde $F01, F02, F03, F04, F05$ representan las funciones objetivas (criterios) previamente definidas.

Para obtener resultados útiles en el diseño óptimo de alumbrado público, la matriz de decisión se expresa en la ecuación (18). Las columnas de esta matriz muestran los criterios definidos por las variables analizadas como una función objetivo, y las filas muestran los escenarios posibles para todas las alternativas de análisis y respuesta de los criterios de optimización. De esta forma, a la hora de elegir la mejor alternativa se tienen en cuenta los criterios de decisión establecidos, y todas las soluciones inferiores a otras son eliminadas por el criterio de superioridad utilizado en el algoritmo.

Alternativas Ganadoras

$$X\begin{bmatrix} X11 & X12 & X13 & X14 & X15 \dots X1n \\ X21 & X22 & X23 & X24 & X25 \dots X2n \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \quad \vdots \\ Xi1 & Xi2 & Xi3 & Xi4 & Xi5 \dots Xin \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \quad \vdots \\ Xm1 & Xm2 & Xm3 & Xm4 & Xm5 \dots Xmn \end{bmatrix} \quad (18)$$

Considerando el vector de la columna X, se resuelve este problema de optimización buscando la mejor solución de todas las alternativas posibles.

Después de evaluar todos los escenarios posibles y obtener los resultados, los escenarios se pueden normalizar matemáticamente, en cuyo caso se usa una normalización de rango (método del valor menor y mayor) como se muestra en la ecuación (19).

$$\text{X}_{\text{iNorm}} = \frac{\text{Xi} - \text{Xmin}}{\text{Xmax} - \text{Xmin}} \quad (19)$$

Para obtener la alternativa ganadora se debe realizar la ponderación de los criterios, utilizando el método CRITIC [36], con base en los pesos de las soluciones de las variables en los escenarios de análisis.

El método CRITIC determina el puntaje para obtener el peso para cada criterio de decisión que se puede resolver como se muestra en la ecuación (20).

$$\text{Wi} = \text{Si}\sum\left(1 - \text{r}_{\text{ij}}\right) \quad (20)$$

Donde:

Wi es el peso o ponderación del criterio i.
Si es la desviación estándar de los datos sustitutos para el criterio i.
rij es el coeficiente de correlación entre la fila i y la columna j.

Una vez seleccionado el vector de solución optimo, se mostrará la solución ganadora determinada por el tipo de luminaria, distribución de luminaria y tipo de luminaria para mejorar la visibilidad y la eficiencia del sistema de alumbrado público.

El vector de decisión se obtiene por la suma de los pesos de cada de cada alternativa, lo cual se hace multiplicando cada vector fila por su peso y luego sumando estos resultados. Todas estas variables se minimizan, por lo que la solución ganadora se marcará con el valor más bajo en el vector de suma ponderada, calculado de la siguiente manera.

$$Pond_i = \sum_{i=1}^{m} \sum_{j=1}^{n} (Wi * Xij) \quad (21)$$

Como paso final se escribe la matriz de decisión, para seleccionar el escenario ganador, misma que tiene todas las variables criterios analizadas.

Para tomar una decisión multicriterio sobre la mejor alternativa para el alumbrado público, se empleó el método llamado suma ponderada, teniendo en cuenta el peso de cada variable. Luego, se procede a elegir la alternativa ganadora tomando en cuenta la resolución del caso, es decir, si era un caso a minimizar o maximizar. En este estudio se trabajó con la intención de minimizar cada uno de los criterios considerados. La Tabla 6 indica la descripción de cada una de las variables utilizadas.

Tabla 6. Variables del algoritmo de toma de decisiones multicriterio

Simbología	Variable
win_case	Caso ganador
Cost	Costos de luminarias
Nivel_Ilu	Nivel de Iluminación
Efi	Eficiencia de las lámparas
F_Uni	Factor de Uniformidad (Uo)
Deslum	Deslumbramiento (R)
Cost_Pond	Ponderación del costo de luminarias
Nivel_Ilu_Pond	Ponderación del nivel de iluminación
Efi_Pond	Ponderación de la Eficiencia
F_Uni_Pond	Ponderación de factor de uniformidad
Deslum_Pond	Ponderación del deslumbramiento

Por otra parte, en la Tabla 7 se indica el Algoritmo de Decisión Multicriterio, que es utilizado para el caso de estudio número uno y dos, con un total de 28 escenarios.

Tabla 7.Algoritmo de Decisión Multicriterio

Algoritmo Multicriterio
datos='Escenarios.xlsx';% archivo de Excel
matriz_norm=xlsread(datos,1,'W18:AL22');
matriz_norm
Desviacion_estandar=std(matriz_norm);
Desviacion_estandar
R=corrcoef(matriz_norm);%Coeficiente de correlación
Ponderacion=Desviacion_estandar.*sum(1-R);
Ponderacion
A=sum(Ponderacion)
Ponderacion_normalizada=Ponderacion/A
%Ponderacion normalizada
Para todo i=1:1:16
Para todo j=1:1:5
v=Ponderacion_normalizada(i).*matriz_norm(j,i);
matriz_ponderada(j,i)=[v];
Fin para todo;
Fin para todo;
matriz_ponderada % muestra la matriz ponderada
Para todo i=1:1:16
v3=0;
Para todo j=1:1:5
v3=v3+ matriz_ponderada(j,i);
sumas_ponderadas(i)=[v3]
Fin para todo;
Fin para todo;
sumas_ponderadas %vector de sumas ponderadas
win_case=min(sumas_ponderadas)

Los datos son llamados mediante Xlsread que contiene toda la matriz normalizada resuelta en Excel, igualmente se lo hizo para el caso de estudio uno.

3.2 Casos de estudio

3.2.1 Caso de estudio 1

Como primer caso de estudio se propone una calle urbana de dos carriles con velocidades de 30 km/h a 60 km/h. En este caso se utiliza cuatro tipos de iluminación como son lámparas LED, mercurio de alta presión, sodio de alta y baja presión. Tres tipos de disposición de luminarias: unilateral, tresbolillo y pareada.

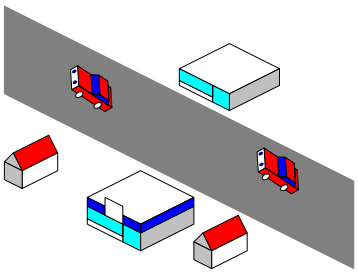


Figura 5.Calle urbana

3.2.2 Caso de estudio 2

Para el segundo caso de estudio, se tiene una carretera de 4 carriles con zona verde a los lados y con velocidad de 60 km/h en adelante, en este escenario se usan los cuatro tipos de iluminación que en el primer caso de estudio y los tipos de disposición de luminarias incluyendo la disposición centrada.

En tal sentido, el primer caso de estudio está compuesto por 12 escenarios, mientras que el segundo tiene 16.

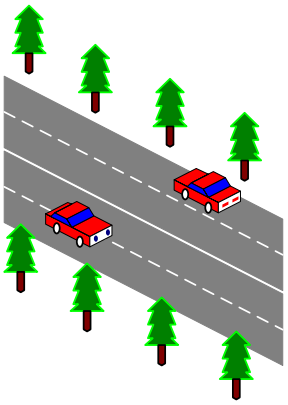


Figura 6.Carretera

4. Análisis de Resultados

En este capítulo se implementaron los escenarios propuestos y se analizaron los resultados obtenidos, teniendo en consideración los diversos criterios que se utilizaron en la optimización.

Cada escenario de los dos casos de estudio fue simulado en el programa DI Alux para obtener los valores de cada una de las variables (criterio) de decisión que fueron tomadas en cuenta para este problema de optimización multicriterio para el alumbrado público.

4.1.1 Análisis de resultados casos de estudio 1 y 2

Una vez aplicada la metodología propuesta empleando la solución multicriterio para encontrar la solución óptima tanto en; disposición de luminaria y tipo de iluminación, se obtienen varios resultados.

La Figura 7 indica los resultados unitarios normalizados de las variables (criterio) para cada uno de los 12 escenarios del primer caso de estudio, por medio de la matriz normalizada. En este estudio se obtiene varias similitudes en cada variable, pero no todas cumplen con exactitud.

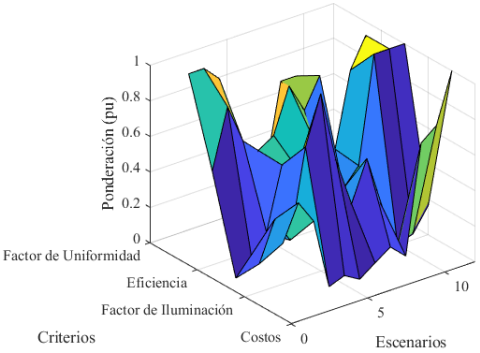


Figura 7. Criterios normalizados para escenarios de alumbrado público (caso de estudio 1)

En cuanto a la Figura 8, esta indica los criterios normalizados de las variables (criterios) para 16 escenarios que corresponden al caso de estudio dos.

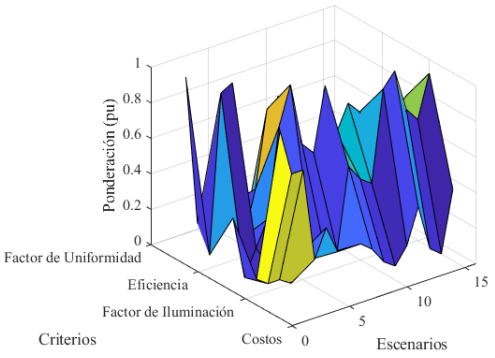


Figura 8. Criterios normalizados para escenarios de alumbrado público (caso de estudio 2)

Una vez normalizada la matriz para cada uno de los escenarios de alumbrado público se realiza el cálculo de las sumas ponderadas mencionadas anteriormente en la metodología. Para esto se suma cada uno de los criterios unitarios normalizados de cada variable (criterio) generando un vector de sumas ponderadas, en este se encuentra finalmente el criterio ponderado por cada escenario.

En las Figuras 9 y 10 se visualiza el resultado del vector de sumas ponderadas y la alternativa ganadora, que para este caso será el (valor mínimo) que corresponde al escenario nueve del caso de estudio número uno que está compuesto por una disposición unilateral, lámpara de sodio a baja presión con eficiencia del 77%.

Para el caso de estudio número dos la alternativa ganadora es el escenario cuatro: disposición centrada, lámpara LED con eficiencia de 81%.

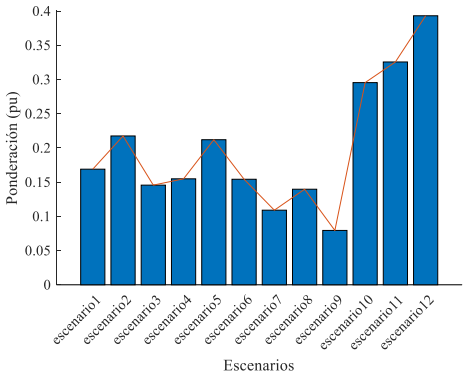


Figura 9. Sumas ponderadas para cada escenario de alumbrado público (caso 1)

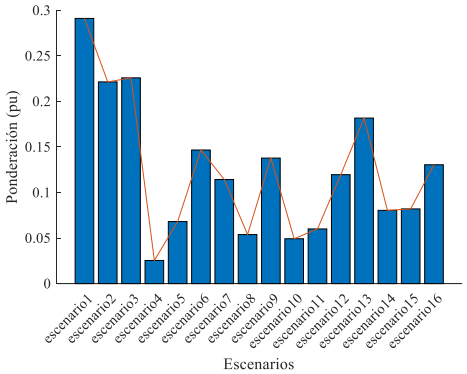


Figura 10. Sumas ponderadas para cada escenario de alumbrado público (caso 2)

Encontrada la alternativa ganadora de forma multicriterio tanto para el caso de estudio 1 y 2, se hace una evaluación de cada una de las variables (criterio) considerando los resultados de forma individual. En la tabla 8 se presentan los resultados de la alternativa ganadora tanto para el caso de estudio 1 y 2.

Tabla 8. Alternativa ganadora aplicando el método multicriterio (1)

Caso de Estudio 1

Disposición Unilateral -Lámpara de sodio baja presión 150 W				
Costo	**Nivel de iluminación(lm)**	**Eficiencia (%)**	**Uniformidad (Uo)**	**Deslumbramiento (R)**
480 $	116000	77%	0.55	0.69

Tabla 9. Alternativa ganadora aplicando el método multicriterio (2)

Caso de Estudio 2

Disposición Centrada -Lámpara de sodio baja presión 161 W				
Costos	**Nivel de iluminación(lm)**	**Eficiencia (%)**	**Uniformidad (Uo)**	**Deslumbramiento (R)**
$1.230,00	116886	81	0.49	0.96

Para el primer caso de estudio la disposición de luminarias es unilateral, lámpara de sodio a baja presión con una potencia de 150 W con un nivel de iluminación de 14500 lúmenes, el número de postes y luminarias son ocho

Para el segundo caso la disposición es central doble, lámpara LED de 161 W con un nivel de iluminación de 19480 lúmenes, el número de postes y luminarias son 6. En la figura 11 se presenta la alternativa ganadora del caso de estudio dos en valores por unidad.

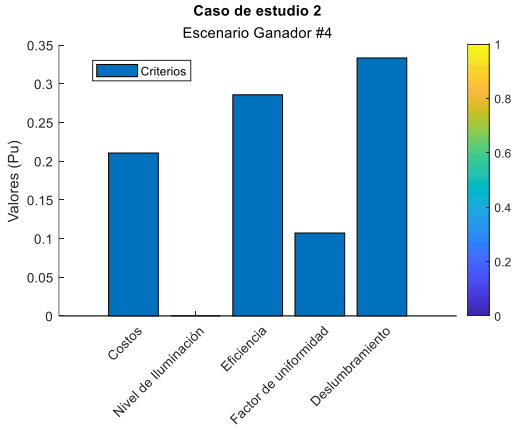


Figura 11. Alternativa Ganadora (caso 2)

En la figura 12 se presenta la alternativa ganadora del caso de estudio uno en valores por unidad.

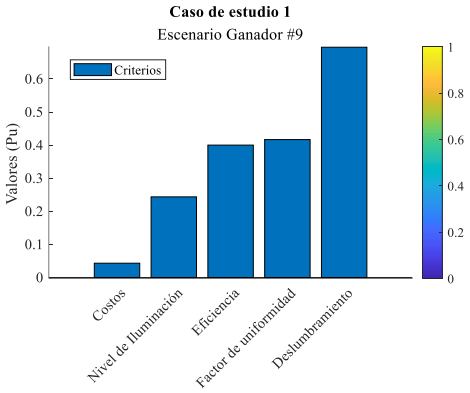


Figura 12. Alternativa Ganadora (caso 1)

4.1.2 Análisis de los resultados individuales de cada variable (criterio)

En este apartado se analizan los resultados individuales de cada uno de los criterios que fueron tomados en cuenta para la solución multicriterio En las Figuras 13 y 14 se muestra la selección ganadora (mínimo valor) considerando los costos para el caso uno y dos respectivamente.

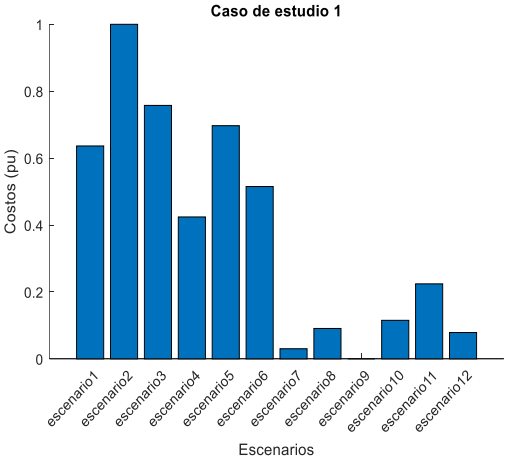


Figura 13. Alternativa ganadora considerando costos (caso 1)

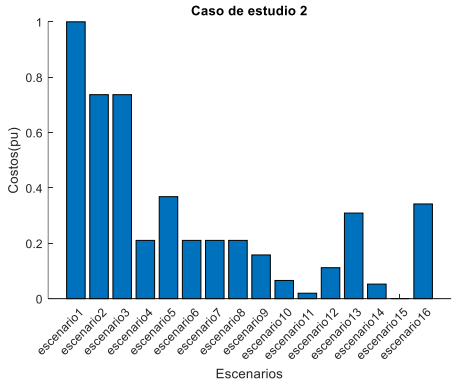


Figura 14. Alternativa ganadora considerando costos (caso 2)

En las Figuras 15 y 16 se muestra la alternativa ganadora (valor mínimo) considerando el nivel de iluminación para el caso uno y dos respectivamente

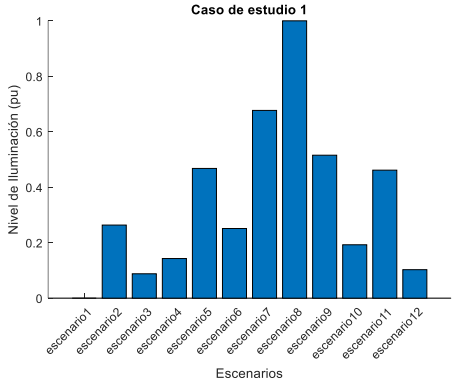


Figura 15. Alternativa ganadora considerando nivel de iluminación (caso 1)

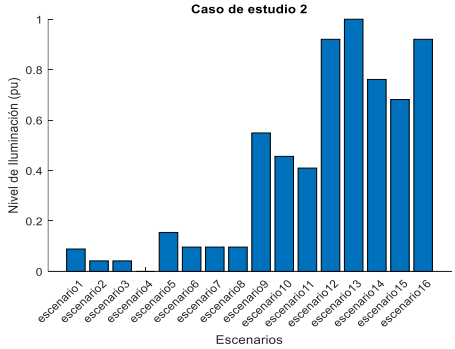


Figura 16. Alternativa ganadora considerando nivel de iluminación (caso 2)

En las Figuras 17 y 18 se muestra la alternativa ganadora (valor mínimo), considerando la variable eficiencia, caso uno y dos respectivamente.

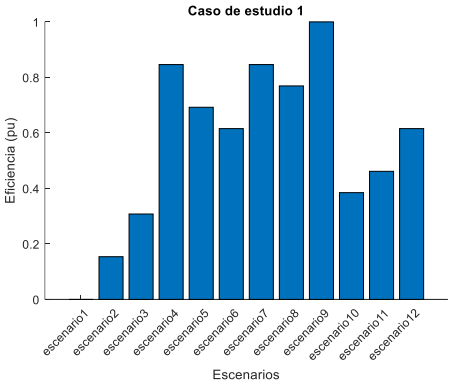


Figura 17. Alternativa ganadora considerando eficiencia (caso 1)

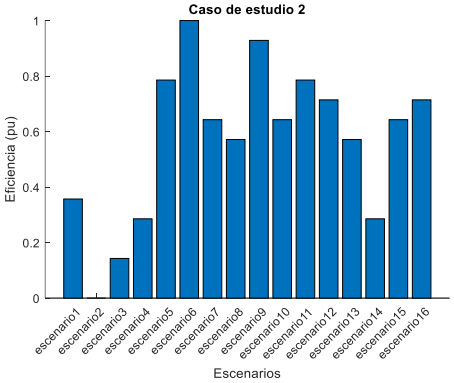


Figura 18. Alternativa ganadora considerando eficiencia (caso 2)

En las Figuras 19 y 20 se muestra la alternativa ganadora (valor mínimo), considerando la variable factor de uniformidad (Uo) en los casos uno y os respectivamente

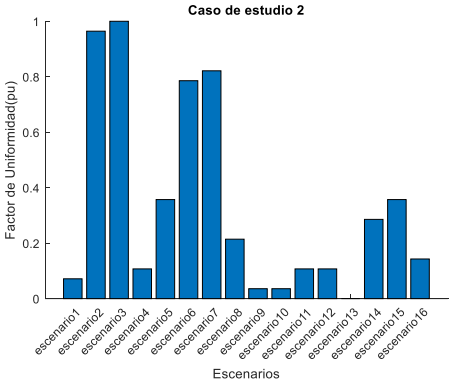


Figura 19. Alternativa ganadora considerando factor de uniformidad (caso 1)

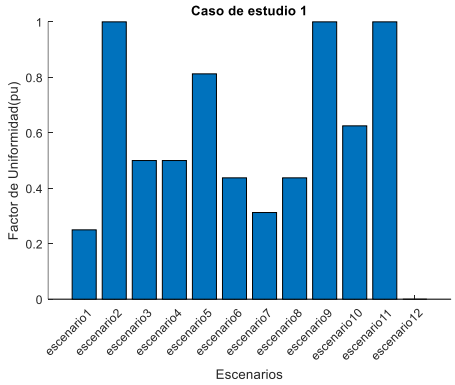


Figura 20. Alternativa ganadora considerando factor de uniformidad (caso 2)

En las Figura 21 y 22 se muestra la alternativa ganadora (valor mínimo), considerando la variable deslumbramiento en los casos uno y dos

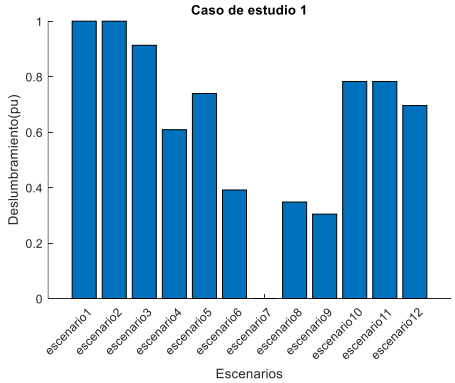


Figura 21. Alternativa ganadora considerando deslumbramiento (caso 1)

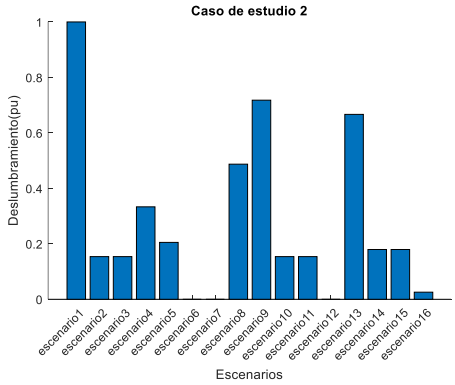


Figura 22. Alternativa ganadora considerando deslumbramiento (caso 2)

En cada una de las anteriores gráficas, se observa que existen varios escenarios ganadores considerando solo un criterio de optimización. A continuación, en las tablas 10 y 11 se describen todas las alternativas ganadoras considerando una sola variable (criterio).

Tabla 10.Alternativas ganadoras por cada variable criterio (caso de estudio 1)

Variables	Escenarios Ganadores
Costos $	Disposición Unilateral iluminación de sodio alta presión
Nivel de iluminación (lúmenes)	Disposición Pareada iluminación de sodio alta presión
Eficiencia (%)	Disposición Unilateral iluminación de sodio alta presión
Factor de Uniformidad (Uo)	Disposición Unilateral iluminación LED
Deslumbramiento (R)	Disposición Tresbolillo iluminación de sodio alta presión

Tabla 11.Alternativas ganadoras por cada variable criterio (caso de estudio 2)

Variables	Escenarios Ganadores
Costos $	Disposición Tresbolillo iluminación sodio baja presión
Nivel de iluminación (lúmenes)	Disposición Unilateral iluminación sodio baja presión
Eficiencia (%)	Disposición Pareada iluminación Fluorescente
Factor de Uniformidad (Uo)	Disposición Unilateral iluminación sodio baja presión
Deslumbramiento (R)	Disposición Centrada iluminación sodio alta presión

Indicando las alternativas o escenarios ganadores por cada variable criterio se puede verificar que en distintos escenarios es posible obtener diferentes valores deseables por criterios. Sin embargo, solo hay una solución que cumple con el mejoramiento de todos los

criterios en conjunto y esa es la optimización multicriterio que fue mencionada anteriormente.

5. Conclusiones

Se implementó un algoritmo multicriterio para el diseño óptimo de alumbrado público en una calle o carretera, tomando en cuenta todas las variables que intervienen en el problema y haciendo la respectiva evaluación de cada uno de los escenarios obtenidos.

En este artículo se dispuso un conflicto de optimización con toma de decisiones multicriterio para buscar la solución con valor mínimo entre todas las posibles. El algoritmo de optimización considera un conjunto de escenarios que son ponderados, obteniendo una solución de esta índole por cada uno de ellos. Finalmente, se elige la mejor solución que responde a todo el conjunto de criterios.

Con esta metodología es posible asegurarse de que la solución garantiza una correcta iluminación en el alumbrado público.

En los resultados obtenidos se puede aseverar que las lámparas LED son una excelente alternativa en eficiencia y nivel de iluminación, su precio es considerablemente más económico a años anteriores y además no requieren reposiciones en tiempos cortos, reduciendo la contaminación ambiental y estética.

6. Futuros Trabajos

Como trabajo a futuro se propone maximizar cada variable criterio que sea analizada, además de un método de búsqueda exhaustiva el cual permite encontrar distintos escenarios.

7. Referencias

[1] V. Orejuela, D. Arias, and A. Aguila, “Response of Residential Electricity Demand Against Price Signals in Ecuador,” in PROCEEDINGS of the 2015 IEEE Thirty Fifth Central American and Panama Convention, 2015, no. Concapan XXXV, pp. 373–378, [Online]. Available: www.proceedings.com.

[2] R. Carli and M. Dotoli, “Bi-level programming for the energy retrofit planning of street lighting systems,” Proc. 2017 IEEE 14th Int. Conf. Networking, Sens. Control. ICNSC 2017, pp. 543–548, 2017, doi: 10.1109/ICNSC.2017.8000150.

[3] M. Popa and C. Cepişcă, “Energy consumption saving solutions based on intelligent street lighting control system,” UPB Sci. Bull. Ser. C Electr. Eng., vol. 73, no. 4, pp. 297–308, 2011.

[4] H. Andrei, C. Cepisca, V. Dogaru-Ulieru, T. Ivanovici, L. Stancu, and P. C. Andrei, “Measurement analysis of an advanced control system for reducing the energy consumption of public street lighting systems,” 2009 IEEE Bucharest PowerTech Innov. Ideas Towar. Electr. Grid Futur., pp. 2–7, 2009, doi: 10.1109/PTC.2009.5282253.

[5] S. Pattamavorakun, J. Krohkaew, K. Maneesilp, P. Nilpruek, P. Janseangrat, and K. Boonmee, “Practical database system design production of administration management for energy economization of street and public lamps project,” Proc. 2015 Int.

Conf. Sci. Technol. TICST 2015, pp. 377–380, 2015, doi: 10.1109/TICST.2015.7369389.

[6] E. Nefedov et al., "Energy efficient traffic-based street lighting automation," IEEE Int. Symp. Ind. Electron., pp. 1718–1723, 2014, doi: 10.1109/ISIE.2014.6864874.

[7] B. C. Mishra, A. S. Panda, N. K. Rout, and S. K. Mohapatra, "A Novel Efficient Design of Intelligent Street Lighting Monitoring System Using ZigBee Network of Devices and Sensors on Embedded Internet Technology," Proc. - 2015 14th Int. Conf. Inf. Technol. ICIT 2015, no. December 2015, pp. 200–205, 2016, doi: 10.1109/ICIT.2015.37.

[8] A. Á. Téllez. J. B. Cóndor, "Selección y dimensionamiento óptimo de los sistemas de alumbrado público basado en múltiples criterios," p. 33, 2018.

[9] M. H. Sheu, L. H. Chang, S. C. Hsia, and C. C. Sun, "Intelligent system design for variable color temperature LED street light," 2016 IEEE Int. Conf. Consum. Electron. ICCE-TW 2016, pp. 7–8, 2016, doi: 10.1109/ICCE-TW.2016.7520912.

[10] L. Ortiz-Matos, A. Aguila-Tellez, R. C. Hincapié-Reyes, and J. W. González-Sanchez, "Multi-Criteria Optimization of the Deployment of a Grid for Rural Electrification Based on a Heuristic Method," IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci., vol. 73, no. 1, p. 012020, Jul. 2017, doi: 10.1088/1755-1315/73/1/012020.

[11] A. Aguila Téllez, "Optimización multicriterio de flujos de potencia reactiva en sistemas eléctricos de distribución," Tesis Dr., vol. 2021-06–15, p. 105 páginas, 2021, doi: http://hdl.handle.net/20.500.11912/8699.

[12] A. Águila, L. Ortiz, R. Orizondo, and G. López, "Optimal location and dimensioning of capacitors in microgrids using a multicriteria decision algorithm," Heliyon, vol. 7, no. 9, p. e08061, 2021, doi: 10.1016/j.heliyon.2021.e08061.

[13] J. He, Z. Zhu, F. Wang, and J. Li, "Illumination Control of Intelligent Street Lamps Based on Fuzzy Decision," Proc. - 2019 Int. Conf. Intell. Transp. Big Data Smart City, ICITBS 2019, pp. 513–516, 2019, doi: 10.1109/ICITBS.2019.00129.

[14] M. Susana and B. Mesa, "Propuesta para la implementación del sistema 'LED' para la iluminación pública en Antioquia," Implemetación Sist. LED., vol. 1, p. 114, 2009.

[15] I. Ciobanu and R. D. Pentiuc, "Analysis on the possibility of using retrofit solutions for increasing the energy efficiency of public lighting systems," 2016 Int. Conf. Appl. Theor. Electr. ICATE 2016 - Proc., pp. 0–4, 2016, doi: 10.1109/ICATE.2016.7754632.

[16] A. Aguila and J. Wilson, "Technical and Economic Assessment of the Implementation of Measures for Reducing Energy Losses in Distribution Systems," IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci., vol. 73, no. 1, p. 012018, Jul. 2017, doi: 10.1088/1755-

1315/73/1/012018.

[17] F. J. Nogueira, L. A. Vitoi, L. H. Gouveia, C. G. Casagrande, D. P. Pinto, and H. A. C. Braga, “Street lighting LED luminaires replacing high pressure sodium lamps: Study of case,” 2014 11th IEEE/IAS Int. Conf. Ind. Appl. IEEE INDUSCON 2014 - Electron. Proc., 2014, doi: 10.1109/INDUSCON.2014.7059470.

[18] R. D. Pentiuc, V. Vlad, D. D. Lucache, and S. Pavel, “Street lighting power quality,” EPE 2014 - Proc. 2014 Int. Conf. Expo. Electr. Power Eng., no. Epe, pp. 1107–1110, 2014, doi: 10.1109/ICEPE.2014.6970080.

[19] A. Lavric, V. Popa, and I. Finis, “The design of a street lighting monitoring and control system,” EPE 2012 - Proc. 2012 Int. Conf. Expo. Electr. Power Eng., no. Epe, pp. 314–317, 2012, doi: 10.1109/ICEPE.2012.6463912.

[20] M. Mahoor, T. A. Najafaabadi, and F. R. Salmasi, “A smart street lighting control system for optimization of energy consumption and lamp life,” 22nd Iran. Conf. Electr. Eng. ICEE 2014, no. Icee, pp. 1290–1294, 2014, doi: 10.1109/IranianCEE.2014.6999733.

[21] A. M. Al-smadi, “Street Lighting Energy-Saving System,” pp. 2019–2022, 2019.

[22] S. Alzubaidi and P. K. Soori, “Study on energy efficient street lighting system design,” 2012 IEEE Int. Power Eng. Optim. Conf. PEOCO 2012 - Conf. Proc., no. June, pp. 291–295, 2012, doi: 10.1109/PEOCO.2012.6230877.

[23] S. Kumar, A. Deshpande, S. S. Ho, J. S. Ku, and S. E. Sarma, “Urban Street Lighting Infrastructure Monitoring Using a Mobile Sensor Platform,” IEEE Sens. J., vol. 16, no. 12, pp. 4981–4994, 2016, doi: 10.1109/JSEN.2016.2552249.

[24] Y. Wu, C. Shi, X. Zhang, and W. Yang, “Design of new intelligent street light control system,” 2010 8th IEEE Int. Conf. Control Autom. ICCA 2010, pp. 1423–1427, 2010, doi: 10.1109/ICCA.2010.5524348.

[25] J. Caminos, Criterios de diseño en iluminación y color, 1st ed. Buenos Aires- Argentina, 2011.

[26] E. Zaldumbide, “Plan de mejoramiento del alumbrado público de las principales avenidas de la ciudad de quito mediante la sustitución por lámparas de inducción,” vol. 1, p. 193, 2012.

[27] S. P. Lau, G. V. Merrett, and N. M. White, “Energy-efficient street lighting through embedded adaptive intelligence,” 2013 Int. Conf. Adv. Logist. Transp. ICALT 2013, pp. 53–58, 2013, doi: 10.1109/ICAdLT.2013.6568434.

[28] F. Calderón, P. Ulloa, and V. Pachecho, “‘Conservación y administración de la Energía eléctrica del alumbrado público de guayaquil,’” vol. 1, p. 211, 2012.

[29] P. Otero, R. Ayala, and V. Calle, “Metodología de cálculo de pérdidas de potencia y energía en el sistema de alumbrado público

del Ecuador," Rev. Técnica "energía," vol. 17, no. 1, pp. 43–51, 2020, doi: 10.37116/revistaenergia.v17.n1.2020.405.

[30] A. A. Tellez, D. F. C. Galarza, and L. O. Matos, "Analysis of power losses in the asymmetric construction of electric distribution systems," IEEE Lat. Am. Trans., vol. 13, no. 7, pp. 2190–2194, 2015, doi: 10.1109/TLA.2015.7273776.

[31] C. Olmedo and S. Patricio, "Calculo Detallado De Perdidas En Sistemas Eléctricos De Distribución Aplicado Al Alimentador 'Universidad' Perteneciente a La Empresa Eléctrica Ambato Regional Centro Norte S.a," p. 234, 2007.

[32] P. Linares and A. Ramos, "Optimización," 2010.

[33] S. Ramos Munté, "Cálculo luminotécnico del alumbrado público de una calle en zona urbana," p. 136, 2016.

[34] J. Preetha Roselyn, D. Devaraj, and S. S. Dash, "Multi Objective Differential Evolution approach for voltage stability constrained reactive power planning problem," Int. J. Electr. Power Energy Syst., vol. 59, pp. 155–165, Jul. 2014, doi: 10.1016/j.ijepes.2014.02.013.

[35] G. J. L. J. MSc. Alexander Aguila Téllez, "Optimización multicriterio de flujos de potencia," vol. 1, no. 1, p. 121, 2021.

[36] J.A. Bellver, F.G. Martinez, "Nuevos Métodos de Valoración Modelos Multicriterio," *Angew.* Chemie Int. Ed. 6(11), 951–952., vol. 2, p. 27, 2012.

7.1 Matriz de Estado del Arte

Tabla 12. Matriz estado del arte

	DATOS			TEMÁTICA						FORMULACIÓN DEL PROBLEMA FUNCIONES OBJETIVO					RESTRICCIONES DEL PROBLEMA					PROPUESTAS PARA RESOLVER EL PROBLEMA							SOLUCIÓN PROPUESTA						
ITEM	AÑO	TITULO DEL ARTÍCULO	CITAS	Eficiencia Energética	Nuevos Sistemas de iluminación	LED	Sodio de alta presión	Luz mixta	Mercurio de alta presión	Técnicas de Iluminación	Minimización de costos	Métodos de optimización para alumbrado público	Bajos niveles de iluminación	Perdidas de potencia	Vida útil de luminarias	Factor de utilización	Mantenimiento a luminarias	Costos de Instalación	Costos de la Energía	Método del flujo luminoso	Métodos Matemáticos	Algoritmos	Softwares	Redes Eléctricas Inteligentes	Redes de Comunicación	Sensores de luz	Algoritmo de toma de decisión (multicriterio)	Distribución Circuital	Eficiencia Energética	Altura apropiada de luminarias	Distancia entre luminarias	Alumbrado Público Inteligente	Protocolos de comunicación
1	2017	Bi-Level Programming for the Energy Retrofit Planning of Street Lighting Systems	3	☒	☒	☐	☐	☐	☐	☒	☒	☒	☐	☐	☐	☐	☒	☒	☐	☒	☒	☐	☐	☐	☐	☐	☒	☐	☒	☐	☒	☐	☐
2	2011	Energy consumption saving solutions based on Intelligent street lighting control system	63	☒	☒	☒	☐	☐	☐	☒	☒	☒	☒	☐	☒	☐	☒	☐	☐	☐	☒	☒	☐	☒	☐	☒	☐	☒	☒	☒	☐	☒	☐
3	2009	Measurement Analysis of an Advanced Control System for Reducing the Energy Consumption Of Public Street Lighting Systems	13	☒	☐	☐	☐	☒	☐	☐	☒	☐	☒	☒	☒	☐	☐	☒	☒	☐	☒	☒	☒	☒	☐	☒	☒	☒	☒	☐	☒	☒	☐
4	2015	Practical Database System Design Production of Administration Management for Energy Economization of Street and Public Lamps Project	5	☒	☒	☐	☐	☐	☐	☒	☒	☒	☐	☐	☐	☒	☐	☒	☐	☒	☐	☒	☒	☐	☐	☐	☐	☐	☒	☒	☐	☐	☐
5	2014	Energy Efficient Traffic-Based Street Lighting Automation	27	☒	☒	☒	☐	☐	☐	☒	☒	☒	☐	☐	☒	☐	☐	☒	☒	☐	☐	☐	☒	☐	☐	☒	☐	☐	☒	☒	☐	☒	☐
6	2016	Intelligent System Design for Variable Color Temperature LED Street Light	7	☐	☐	☒	☐	☒	☐	☐	☐	☒	☒	☐	☐	☐	☒	☒	☐	☐	☐	☒	☐	☒	☐	☐	☐	☐	☒	☐	☐	☒	☐

7	2015	A novel efficient design of Intelligent Street Lighting monitoring system using ZigBee network of devices and sensors on Embedded Internet Technology	18	☒	☒	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☒	☒	☐	☒	☐	☒	☒	☐	☐	☐	☐	☐	☒	☐	☒	☐	☐	☒	☐	☐	☒	☐
8	2016	Analysis on the Possibility of Using Retrofit Solutions for Increasing the Energy Efficiency of Public Lighting Systems	6	☐	☐	☒	☒	☐	☒	☒	☐	☐	☐	☒	☒	☒	☐	☐	☐	☒	☐	☐	☒	☐	☐	☐	☐	☐	☒	☒	☐	☐	☐
9	2014	Street Lighting LED Luminaires Replacing High Pressure Sodium Lamps: Study of Case	11	☒	☐	☒	☒	☐	☐	☐	☒	☒	☐	☐	☐	☒	☐	☒	☐	☐	☒	☐	☐	☒	☐	☐	☐	☒	☒	☐	☐	☐	☐
10	2014	Street Lighting Power Quality	13	☒	☒	☒	☒	☐	☐	☒	☒	☐	☐	☒	☒	☐	☐	☒	☒	☒	☒	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☒	☒	☐	☐	☐
11	2014	A smart street lighting control system for optimization of energy consumption and lamp life	14	☒	☐	☒	☐	☐	☐	☐	☐	☒	☒	☐	☐	☐	☐	☐	☒	☐	☐	☒	☒	☐	☐	☒	☒	☐	☐	☐	☐	☒	☐
12	2012	Study on Energy Efficient Street Lighting System Design	27	☒	☐	☐	☐	☒	☐	☒	☒	☐	☐	☒	☐	☐	☒	☒	☒	☐	☐	☒	☒	☒	☐	☐	☐	☒	☐	☒	☐	☒	☐
13	2013	Energy-Efficient Street Lighting through Embedded Adaptive Intelligence	36	☒	☒	☐	☐	☐	☐	☐	☒	☒	☐	☐	☐	☒	☐	☐	☒	☐	☐	☒	☐	☐	☐	☒	☐	☐	☐	☐	☒	☒	☐
14	2018	ESTUDIO DE FACTIBILIDAD PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE UN NUEVO SISTEMA DE ALUMBRADO PÚBLICO EN AV.OLMEDO DE LA CIUDAD DE ESMERALDAS”	0	☐	☒	☐	☒	☒	☒	☐	☐	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☐	☐	☒	☒	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☒	☒	☒	☐	☐
15	2011	Energy consumption saving solutions based on intelligent street lighting control system	63	☒	☒	☐	☐	☐	☐	☒	☐	☐	☐	☒	☒	☐	☐	☐	☒	☐	☐	☒	☐	☒	☐	☐	☐	☐	☒	☐	☐	☒	☐
16	2012	The Design of a Street Lighting Monitoring and Control System	30	☒	☒	☐	☐	☐	☒	☐	☒	☒	☐	☐	☐	☐	☐	☒	☒	☐	☐	☒	☐	☐	☒	☐	☒	☐	☒	☐	☐	☒	☒
17	2010	Design of new intelligent street light control system	206	☒	☒	☐	☐	☐	☐	☒	☐	☐	☒	☐	☐	☐	☒	☒	☒	☐	☐	☒	☐	☒	☐	☒	☒	☐	☐	☐	☐	☒	☐
18	2006	A Methodology to Determine Electrical Energy Consumption in Street Lighting Systems	13	☐	☒	☐	☒	☐	☒	☐	☒	☐	☒	☐	☐	☒	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☒	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
19	2016	Urban Street Lighting Infrastructure Monitoring using a Mobile Sensor Platform	129	☒	☐	☒	☒	☐	☐	☐	☐	☒	☒	☐	☐	☒	☐	☐	☒	☐	☒	☒	☐	☐	☐	☒	☒	☐	☐	☒	☐	☒	☐
20	2013	Smart street lights	45	☒	☐	☒	☐	☐	☐	☒	☐	☒	☒	☐	☒	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☒	☐	☒	☐	☐	☒	☐	☒	☒	☐
21	2019	Street Lighting Energy-Saving System	5	☒	☐	☐	☐	☐	☒	☐	☒	☒	☐	☐	☒	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☒	☐	☒	☐	☐	☒	☐	☐	☒	☐
22	2014	Street Lighting Control System Based On LargeScale WSN: A Step Towards A Smart City	43	☒	☐	☒	☐	☐	☐	☐	☒	☒	☐	☐	☒	☐	☒	☐	☐	☐	☐	☐	☒	☒	☐	☒	☐	☐	☒	☐	☐	☒	☒

23	2019	Illumination Control of Intelligent Street Lamps Based on Fuzzy Decision	4	☒	☒	☐	☐	☐	☐	☒	☐	☒	☐	☒	☐	☐	☒	☒	☒	☐	☐	☐	☐	☒	☒	☐	☒	☐	☒	☐	☐	☒	☐
24	2020	Light Trespass in Street LED Lighting Systems	2	☒	☐	☒	☒	☐	☐	☒	☐	☒	☐	☐	☒	☒	☐	☐	☐	☒	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☒	☐	☐	☐	☐
25	2021	Optimización multicriterio de flujos de potencia reactiva en sistemas eléctricos de distribución	2	☒	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☒	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☒	☒	☒	☐	☐	☐	☒	☐	☒	☐	☐	☐	☐
26	2015	Implementación de Métodos de Toma de Decisiones Multicriterio usando Matlab	0	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☒	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☒	☒	☒	☐	☐	☐	☒	☐	☐	☐	☐	☐	☐
27	2014	Multi Objective Differential Evolution approach for voltage stability constrained reactive power planning problem,	48	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☒	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☒	☐	☒	☒	☐	☐	☐	☐	☒	☐	☒	☐	☐	☐	☐
28	2016	Cálculo luminotécnico del alumbrado público de una calle en zona urbana	1	☐	☐	☒	☒	☐	☐	☒	☐	☐	☒	☒	☒	☐	☒	☐	☐	☐	☐	☒	☒	☐	☐	☒	☐	☐	☐	☒	☐	☒	☐
30	2012	Nuevos Métodos de Valoración Modelos Multicriterio	142	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☒	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☒	☒	☐	☐	☐	☐	☒	☐	☐	☐	☐	☐	☐
				21	13	12	8	4	5	13	13	20	11	9	13	8	10	12	12	6	11	16	11	12	2	12	11	4	20	9	5	17	2

7.2 Resumen de Indicadores

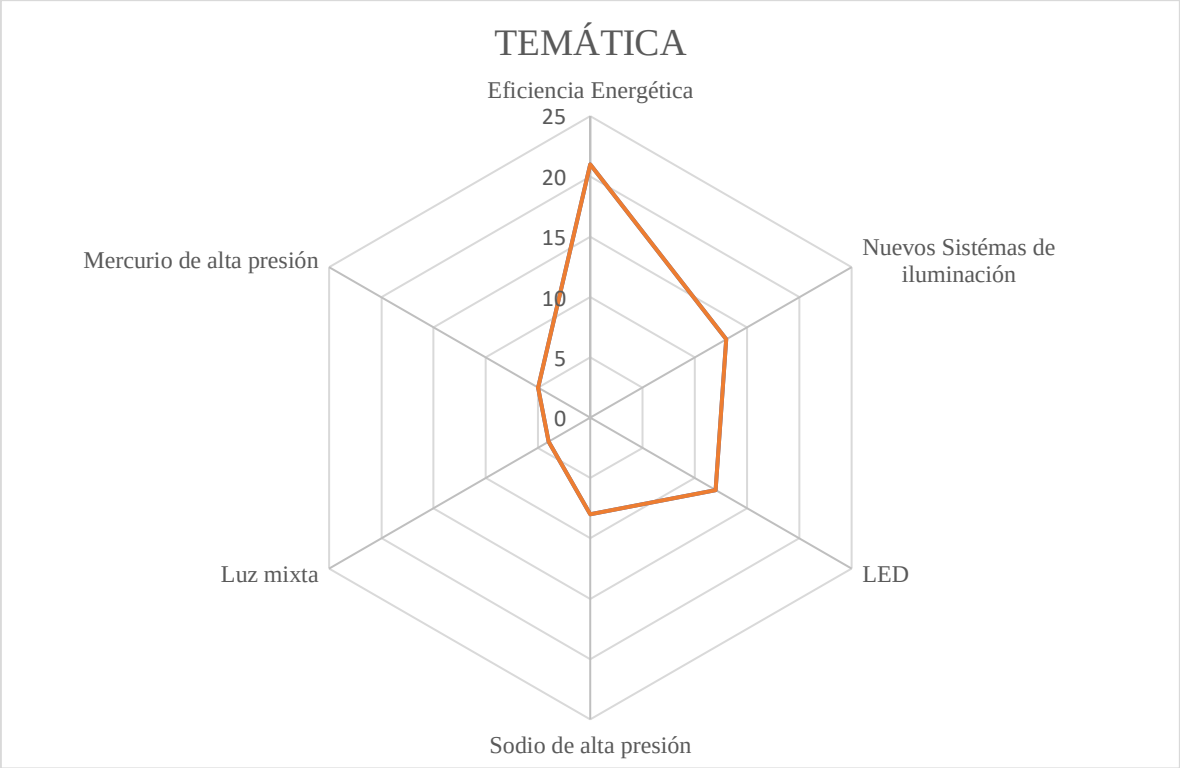


Figura 23.Resumen e indicador de la temática - Estado del arte

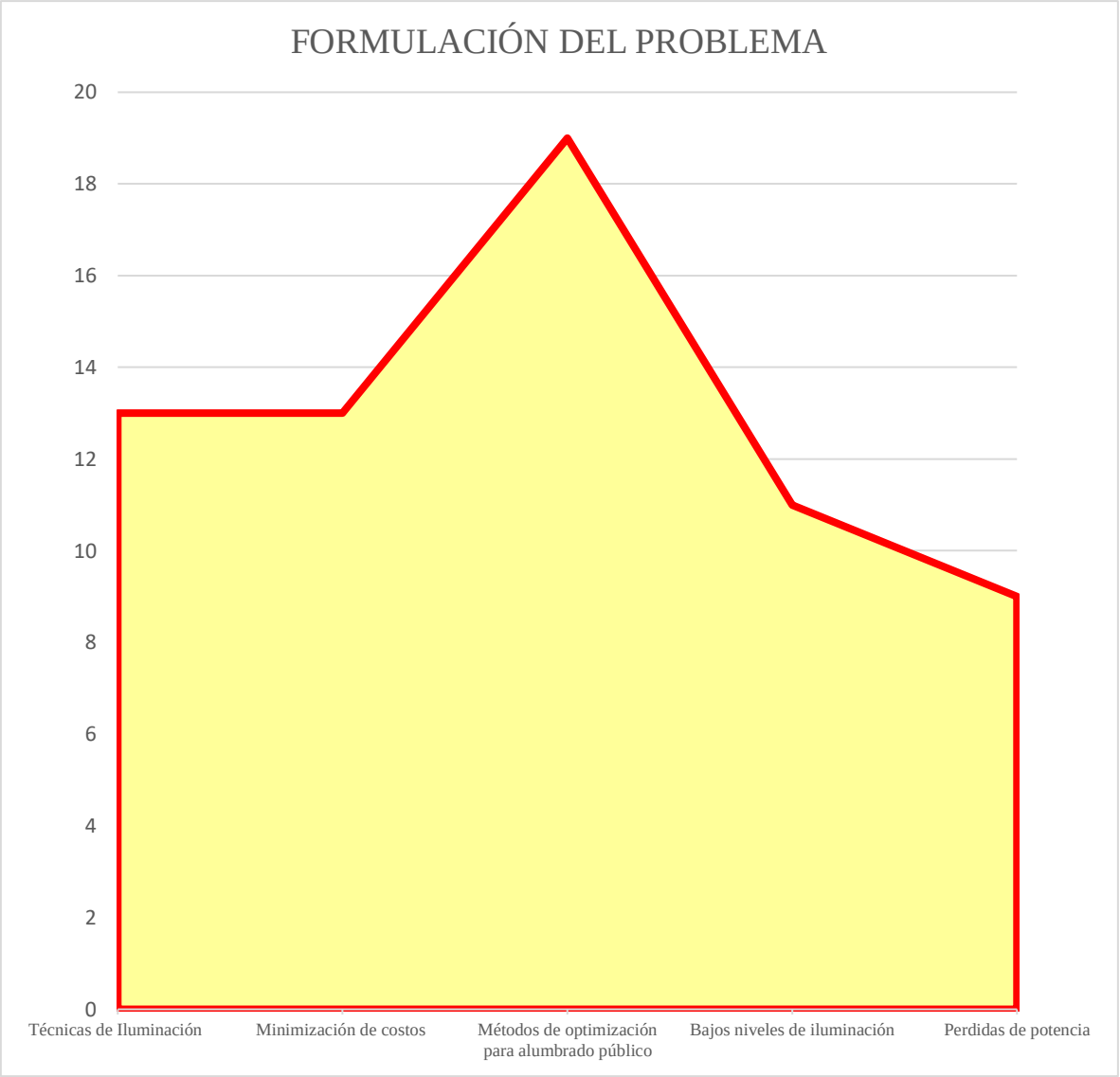


Figura 24..Indicador de formulación del problema - Estado del arte

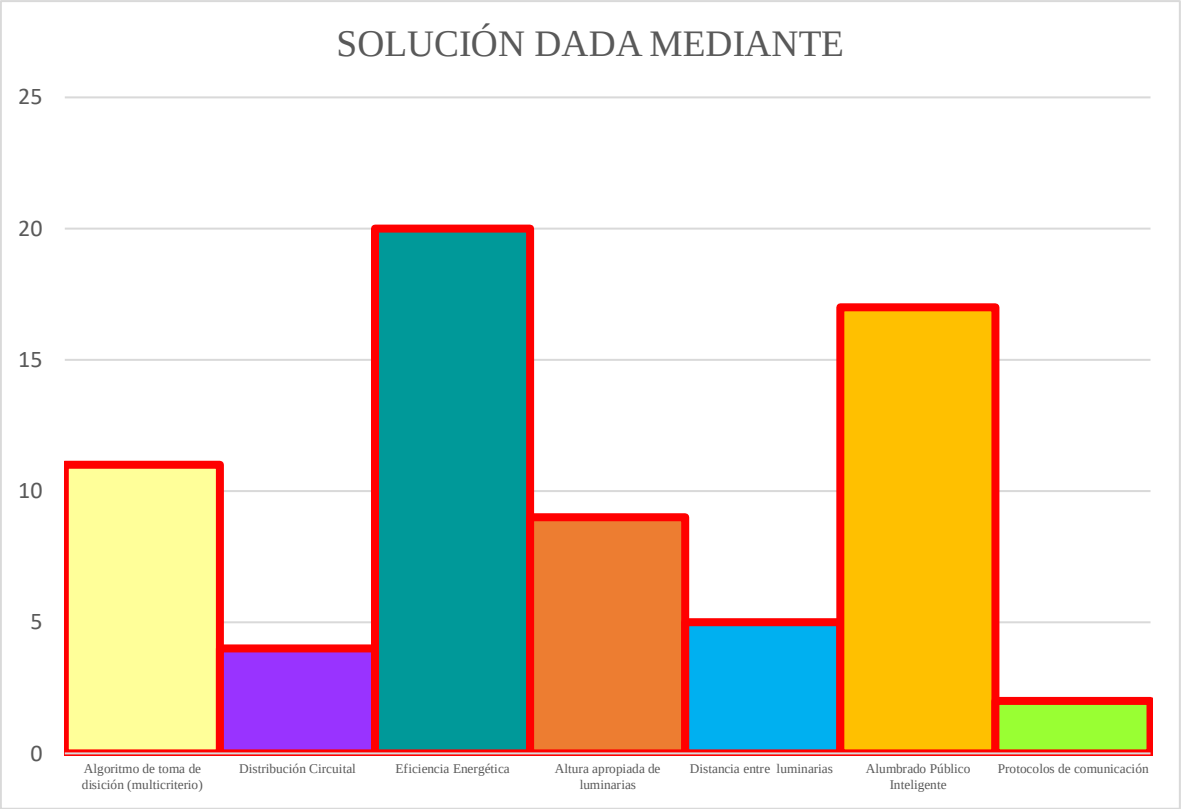


Figura 25.Indicador de solución - Estado del arte