

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA  
Facultad de Ingeniería



**Análisis de sistema de alumbrado público en el sector gastronómico en  
zona 9 de Guatemala**

Trabajo de graduación presentado por Ana Paula Donado Cifuentes para  
optar al grado académico de Licenciada en Ingeniería Civil

Guatemala,

2023



UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA  
Facultad de Ingeniería



**Análisis de sistema de alumbrado público en el sector gastronómico en  
zona 9 de Guatemala**

Trabajo de graduación presentado por Ana Paula Donado Cifuentes para  
optar al grado académico de Licenciada en Ingeniería Civil

Guatemala,


2023


Vo.Bo.:

(f)   
Arq. María Fernanda Barrios

Tribunal Examinador:

(f)   
Arq. María Fernanda Barrios

(f)   
Ing. Roberto Godo

(f)   
Ing. Andrés Bernhard Molina

Fecha de aprobación: Guatemala, 21/06/2023.

## **PREFACIO**

Dedico esta tesis a DIOS, y a mi familia, a la que agradezco por haberme apoyado durante toda mi vida y financiado todos mis estudios a lo largo de mi carrera universitaria.

De igual manera quiero agradecer a mi asesora Arq. María Fernanda Barrios, por su apoyo y consejos en la realización del trabajo de graduación. Asimismo, a cada ingeniero, arquitecto y catedrático que formó parte de la realización de esta, y que gracias a su ayuda y conocimiento fue posible terminar el trabajo.

Finalmente quiero agradecer a la Universidad del Valle de Guatemala, en donde adquirí una educación de alta calidad, que me permitió la realización del trabajo

# CONTENIDO

	Página
<b>PREFACIO</b> . . . . .	<b>III</b>
<b>LISTA DE CUADROS</b> . . . . .	<b>VI</b>
<b>LISTA DE GRÁFICOS</b> . . . . .	<b>IX</b>
<b>RESUMEN</b> . . . . .	<b>X</b>
<b>ABSTRACT</b> . . . . .	<b>XI</b>
<b>I. INTRODUCCIÓN</b> . . . . .	<b>1</b>
<b>II. ANTECEDENTES</b> . . . . .	<b>2</b>
<b>III. JUSTIFICACIÓN</b> . . . . .	<b>3</b>
<b>IV. OBJETIVOS</b> . . . . .	<b>4</b>
A    Objetivo general . . . . .	4
B    Objetivos específicos . . . . .	4
<b>V. MARCO TEÓRICO</b> . . . . .	<b>5</b>
A    Luz y materia . . . . .	5
1    Magnitudes y unidades fotométricas de la luz . . . . .	6
2    Direccionalidad y control de la luz . . . . .	8
3    Luz y visión . . . . .	10
4    Luz y salud . . . . .	13
B    Alumbrado público . . . . .	14
1    Elementos del alumbrado público . . . . .	14
2    Diferencia de iluminación en interiores y exteriores . . . . .	15
3    Calidad en la iluminación . . . . .	15
4    Consideraciones de la durabilidad de las luminarias . . . . .	17
5    Contaminación lumínica . . . . .	19
6    Factores a considerar en el sistema de alumbrado público . . . . .	22
7    Representación gráfica de magnitudes . . . . .	26
8    Smart Cities . . . . .	28
C    Distribución . . . . .	28
1    Distribución de luz . . . . .	28
2    Implantación de los puntos de luz . . . . .	31
D    Tipos de lámparas . . . . .	33
1    Lámparas de vapor de mercurio . . . . .	34

2	Lámparas de haluros metálicos . . . . .	34
3	Lámparas de sodio de alta presión . . . . .	35
4	Lámpara de vapor de sodio de baja presión . . . . .	35
5	Lámparas LED . . . . .	36
E	Energía en el sistema de alumbrado . . . . .	36
1	Gasto energético . . . . .	36
F	Sistemas de alumbrado público LED de energía solar . . . . .	37
G	Casos del sistema de alumbrado público LED de energía solar . . . . .	39
1	Estudio en Malasia . . . . .	39
2	Estudio en España . . . . .	40
H	Análisis de simulación lumínica . . . . .	41
1	Software Dialux . . . . .	41
I	Normativas . . . . .	41
1	Colombia . . . . .	41
2	IESNA . . . . .	45
3	ESPAÑA . . . . .	47
4	Guatemala . . . . .	49
<b>VI.</b>	<b>METODOLOGÍA . . . . .</b>	<b>52</b>
A	Estudio del sitio . . . . .	52
B	Mediciones . . . . .	52
C	Análisis de mediciones . . . . .	53
D	Análisis de propuesta . . . . .	54
E	Análisis económico entre tecnologías . . . . .	54
<b>VII.</b>	<b>ANÁLISIS DE RESULTADOS . . . . .</b>	<b>55</b>
A	Sistema actual . . . . .	56
B	Propuesta de alumbrado público . . . . .	64
C	Análisis económico . . . . .	70
<b>VIII.</b>	<b>CONCLUSIONES . . . . .</b>	<b>76</b>
<b>IX.</b>	<b>RECOMENDACIONES . . . . .</b>	<b>77</b>
A	Para las municipalidades . . . . .	77
B	Para la academia . . . . .	77
C	Para estudiantes . . . . .	78
<b>X.</b>	<b>BIBLIOGRAFÍA . . . . .</b>	<b>79</b>
<b>XI.</b>	<b>APÉNDICES . . . . .</b>	<b>81</b>
<b>XII.</b>	<b>GLOSARIO . . . . .</b>	<b>90</b>

## LISTA DE CUADROS

<b>Cuadro</b>		<b>Página</b>
1	Valores de iluminancia de las mediciones in situ de alumbrado público . . . . .	57
2	Valores de iluminancia en modelo del sistema actual de alumbrado público . . . . .	60
3	Valores de iluminancia en propuesta de alumbrado público . . . . .	66
4	Valores para el análisis económico . . . . .	71
5	Flujo neto de la propuesta de alumbrado público parte 1 . . . . .	73
6	Flujo neto de la propuesta de alumbrado público parte 2 . . . . .	74
7	Valores de iluminancia en propuesta de cambio de luminarias en el alumbrado público . . . . .	83
8	Valores para el análisis económico . . . . .	86
9	Flujo neto de la propuesta de alumbrado público sin cambio de postes parte 1 . . . . .	87
10	Flujo neto de la propuesta de alumbrado público sin cambio de postes parte 2 . . . . .	88

## LISTA DE GRÁFICOS

Ilustración	Página
1 Espectro electromagnético y rango de espectro visible . . . . .	5
2 Flujo luminoso . . . . .	6
3 Luminancia . . . . .	7
4 Iluminancia . . . . .	7
5 Intensidad luminosa . . . . .	8
6 Reflexión especular . . . . .	9
7 Reflexión difusa . . . . .	9
8 Reflexión compuesta . . . . .	9
9 Reflexión compuesta . . . . .	10
10 Relación del diámetro de la pupila y la iluminancia . . . . .	12
11 Clasificación del color según el IRC . . . . .	17
12 Resumen de índices de protección IP . . . . .	18
13 Grados de protección IK . . . . .	19
14 Direcciones de emisión en la generación de contaminación lumínica . . . . .	20
15 Absorción óptima de conos y bastones por la longitud de onda . . . . .	24
16 Relación suciedad y depreciación de luminaria . . . . .	25
17 Curva fotométrica de una lámpara incandescente . . . . .	26
18 Curvas Isocandelas . . . . .	26
19 Curvas de isolux . . . . .	27
20 Curvas isoluminancias . . . . .	27
21 Lámpara tipo I dos direcciones . . . . .	29
22 Lámpara tipo I cuatro direcciones . . . . .	29
23 Lámpara tipo II . . . . .	29
24 Lámpara tipo III . . . . .	30
25 Lámpara tipo IV . . . . .	30
26 Lámpara tipo V . . . . .	30
27 Distribución de luminarias unilateral . . . . .	31
28 Distribución de luminarias bilateral tresbolillo . . . . .	31
29 Distribución de luminarias bilateral pareada . . . . .	32
30 Distribución de luminarias para valores de b entre 1 a 3 m . . . . .	32
31 Distribución de luminarias para valores de b cualquiera . . . . .	32
32 Distribución de luminarias para valores de b mayores a 3 m . . . . .	33
33 Distribución de luminarias en catenaria . . . . .	33
34 Estructura de alumbrado público con energía solar y luminarias LED . . . . .	38
35 Clases de iluminación para vías vehiculares . . . . .	42
36 Variación en las clases de iluminación por tipo de vía, complejidad de circulación y control del tráfico . . . . .	42

37	Requisitos fotométricos mantenidos por clase de iluminación para tráfico motorizado con base en la luminancia de la calzada . . . . .	43
38	Requisitos mínimos de iluminación para vías con ciclorutas y andenes adyacentes . . . . .	43
39	Valores mínimos mantenidos de iluminancias promedios (Ix) en vías motorizadas . . . . .	43
40	Clases de iluminación para diferentes tipos de vías en áreas peatonales y de ciclistas . . . . .	44
41	Requisitos mínimos de iluminación para tráfico peatonal . . . . .	44
42	Requisitos fotométricos para áreas críticas . . . . .	45
43	Clases de iluminación en áreas críticas de vías vehiculares . . . . .	45
44	Fotometría mínima en áreas críticas distintas a vías vehiculares . . . . .	45
45	Valores recomendados de luminancia e iluminancia para carreteras . . . . .	47
46	Valores recomendados de iluminancia para vías de peatones . . . . .	47
47	Requisitos para las calzadas tipo M . . . . .	48
48	Requisitos para las calzadas tipo C . . . . .	48
49	Requisitos para las calzadas tipo P . . . . .	49
50	Requisitos para las calzadas tipo HS . . . . .	49
51	Niveles mínimos de iluminación de los lugares de trabajo . . . . .	50
52	Ejemplo de retícula . . . . .	53
53	Área analizada . . . . .	56
54	Resultados de las isolíneas de la 10a calle 2av de zona 9 de la Ciudad de Guatemala . . . . .	56
55	Ubicación de las luminarias evaluadas en Dialux . . . . .	58
56	Simulación de la iluminación en el sistema actual . . . . .	58
57	Resultados de la luminancia del sistema actual . . . . .	58
58	Resultados de iluminancia del sistema actual . . . . .	59
59	Resultados de las isolíneas de la luminaria 1 . . . . .	59
60	Resultados de las isolíneas de la luminaria 2 . . . . .	59
61	Resultados de las isolíneas de la luminaria 3 . . . . .	59
62	Resultados de las isolíneas de la luminaria 4 . . . . .	60
63	Resultados de la luminancia de un tramo recto en la segunda avenida con una distancia interpostal de 31.4 m . . . . .	61
64	Resultados de la luminancia de un tramo recto en la segunda avenida con una distancia interpostal de 18.4m . . . . .	61
65	Resultados de la luminancia de un tramo recto en la décima calle con una distancia interpostal de 32 m . . . . .	62
66	Resultados de la luminancia de un tramo recto en la décima calle con una distancia interpostal de 18 m . . . . .	62
67	Distribución luminosa luminaria actual . . . . .	63
68	Ubicación de las luminarias actuales en Dialux . . . . .	64
69	Simulación de la iluminación de la propuesta . . . . .	65
70	Resultados de la iluminancia de la propuesta . . . . .	65
71	Resultados de la luminancia de la propuesta . . . . .	65

72	Resultados de las curvas de iluminación de la propuesta luminaria 1 . . . . .	66
73	Resultados de las curvas de iluminación de la propuesta luminaria 2 . . . . .	66
74	Resultados de las curvas de iluminación de la propuesta luminaria 3 . . . . .	66
75	Resultados de las curvas de iluminación de la propuesta luminaria 4 . . . . .	66
76	Distribución luminosa luminaria nueva . . . . .	67
77	Resultados de la luminancia de un tramo recto en la décima calle con una distancia interpostal de 20 m . . . . .	68
78	Resultados de la luminancia de un tramo recto en la segunda avenida con una distancia interpostal de 28 m . . . . .	68
79	Gráfica del valor presente neto y la tasa de retorno interna propuesta . . . . .	74
80	Resultados de la iluminancia de la propuesta . . . . .	81
81	Resultados de la luminancia de la propuesta . . . . .	81
82	Resultados de las curvas de iluminación de la propuesta luminaria 1 . . . . .	82
83	Resultados de las curvas de iluminación de la propuesta luminaria 2 . . . . .	82
84	Resultados de las curvas de iluminación de la propuesta luminaria 3 . . . . .	82
85	Resultados de las curvas de iluminación de la propuesta luminaria 4 . . . . .	82
86	Distribución luminosa luminaria nueva . . . . .	83
87	Resultados de la luminancia de un tramo recto en la segunda avenida con una distancia interpostal de 31.4 m . . . . .	84
88	Resultados de la luminancia de un tramo recto en la segunda avenida con una distancia interpostal de 18.4m . . . . .	85
89	Resultados de la luminancia de un tramo recto en la décima calle con una distancia interpostal de 32 m . . . . .	85
90	Resultados de la luminancia de un tramo recto en la décima calle con una distancia interpostal de 18 m . . . . .	86
91	Gráfica del valor presente neto y la tasa de retorno interna propuesta sin cambio de postes . . . . .	89

## **RESUMEN**

El presente trabajo tiene como tema principal la iluminación en exteriores, este consiste en realizar un análisis del alumbrado público en el sector gastronómico de la zona 9 de la ciudad de Guatemala. Se investigará la eficiencia del sistema, teniendo en cuenta las normas, las cuales velan por la seguridad y confort del conductor.

Como primer punto se analiza acerca del funcionamiento de la luz y su importancia a la hora de evaluar un entorno. Luego se describen los elementos relevantes del alumbrado público, los factores que intervienen en este y los términos relevantes para la comprensión y diseño del sistema. Se establecen las tecnologías utilizadas y como han ido evolucionando. Además, se establecen las normativas que se toman en cuenta para determinar si el sistema cumple con los requerimientos mínimos.

Para el desarrollo del presente trabajo se realizó un análisis del sistema actualmente utilizado, determinando las tecnologías actuales y la eficiencia de estas. Con los resultados se realizará un análisis en el software DIALux para proveer un sistema nuevo y eficiente.

Se espera que los resultados tengan un impacto en los sistemas de alumbrado público actuales, donde se busque mejorar la iluminación y buscar nuevas tecnologías para cumplir con los requerimientos. Para de esta manera tener vías seguras con buena iluminación, así como sistemas eficientes que reduzcan los costos energéticos.

## **ABSTRACT**

The present work has as its main theme outdoor lighting, it consists of realizing carry out an analysis of public lighting in the gastronomic sector of zone 9 of the city of Guatemala. The efficiency of the system will be investigated, taking into account the regulations, which ensure for the safety and comfort of the driver.

As a first point, the operation of light and its importance when evaluating an environment are analyzed. Then the relevant elements of public lighting are described, the factors that intervene in this and the relevant terms for the understanding and design of the system. The technologies used and how they have evolved are established. Furthermore, it establishes regulations that are taken into account to determine if the system meets the minimum requirements.

For the development of this work, an analysis of the system currently used was carried out, determining the current technologies and their efficiency. With the results, an analysis will be carried out in the DIALux software to provide a new and efficient system.

The results are expected to have an impact on current public lighting systems, where they seek to improve lighting and seek new technologies to meet the requirements. In order to have safe roads with good lighting, as well as efficient systems that reduce energy costs.

## I. INTRODUCCIÓN

El alumbrado del sector en cuestión, es un servicio público, en relación con la iluminación en las vías de circulación vehicular, que no está a cargo de una entidad privada o de una persona.

Dicho alumbrado público juega un papel fundamental para garantizar que los espacios públicos sean seguros y protegidos. Se encarga de proveer visibilidad para los conductores, peatones y personas que circulan por el lugar, lo que ayuda a prevenir accidentes y reducir las tasas de criminalidad.

Al evaluar el sistema de alumbrado público, se pueden detectar oportunidades de mejorar la eficiencia energética, como el cambio de bombillas, utilización de sensores, entre otros; y de esta manera ayuda a reducir los costos de mantenimiento y de energía.

La iluminación que provee el sistema de alumbrado público depende de una variedad de factores, dentro de los cuales cabe resaltar el tipo, la potencia y distribución de luminaria, las superficies de reflexión y la distancia entre postes. Hoy en día las luminarias más utilizadas para alumbrado público son las de sodio de alta presión, las LED y los halógenos metálicos.

Con el paso del tiempo han surgido nuevas tecnologías que brindan una mejor iluminación y tienen una buena relación de costo-eficiencia.

Guatemala ha ido adaptando algunas de estas tendencias, sin embargo, los sistemas tradicionales de alumbrado público suelen ser ineficientes, costosos y ambientalmente insostenibles.

Dialux Evo es un software especializado en el diseño, cálculo y simulación de iluminación. Este es utilizado por profesionales para determinar los niveles de iluminación dentro de los espacios, incluyendo alumbrados públicos. Tiene la ventaja de proveer una mayor precisión en los resultados, agilizar el proceso, tener mayor flexibilidad y permite observar los modelos en 3D.

La finalidad del trabajo es contribuir a la mejora de la calidad de vida de la población y de los visitantes de la zona 9 a través de la identificación de los principales problemas del sistema de alumbrado actual y propuesta de un nuevo sistema de iluminación para el sector gastronómico. Además, se espera que los resultados sean de interés para las autoridades responsables del alumbrado público como las municipalidades y la Empresa Eléctrica de Guatemala, S, A.

## II. ANTECEDENTES

El alumbrado público ayuda a garantizar la seguridad y bienestar a la población de cualquier lugar del mundo. En Guatemala el sector gastronómico contribuye a la economía y la cultura local, por lo que es importante desarrollar un área adecuadamente iluminada. La zona 9 es una de las 25 zonas por las cuales se conforma la ciudad de Guatemala, esta se considera una de las más visitadas por turistas y locales.

Según el boletín estadístico de seguridad vial del 2020 de la ONSETA, la mayoría de los accidentes de tránsito se presentan en la tarde de las 12:00 a las 17:00 horas y en horario de la noche de 18:00 a 23:00 horas. La mayoría de los datos presentados en el documento se encuentran en el día sábado en el horario de la noche. Se estima que muchos de estos accidentes se deben a la falta de iluminación adecuada en las vías públicas de la ciudad.

Actualmente la tecnología LED en el alumbrado público no ha sido totalmente implementada, dentro de cada zona la municipalidad seleccionó un sector para colocar dichas luminarias, sin embargo, las demás áreas aún no cuentan con esta tecnología. Según el estudio realizado por el Ministerio de Energía y Minas de Guatemala en el 2017, se estima que un 56 % de las luminarias instaladas son incandescentes y un 42 % fluorescentes.

Es importante destacar que en Guatemala actualmente no existe una normativa específica que regule el alumbrado público. A pesar de que existen normas relacionadas con la eficiencia energética y la iluminación en interiores y exteriores, no existen requisitos establecidos, ni estándares de calidad. Como resultado se encuentran una variedad de alumbrados públicos que no cumplen con el objetivo de proveer iluminación eficiente, cómoda y segura para las personas. Esta falta de normativa dificulta el seguimiento y control de la instalación de iluminación, lo cual influye en la cantidad de accidentes vehiculares en el país.

### III. JUSTIFICACIÓN

Hoy en día el alumbrado público es necesario para una sociedad, en donde miles de personas pasan una gran parte de su tiempo en las vías y espacios públicos. La iluminación en dichos sistemas es importante ya que esta representa seguridad para la población e incentiva las relaciones sociales entre las personas. (Cortés, 2010).

La propuesta del trabajo consiste en realizar un análisis del sistema de alumbrado público en el sector gastronómico en zona 9 de la ciudad de Guatemala y determinar si el sistema actual satisface las necesidades de la población. Dicho tema es relevante para la sociedad debido a que un sistema correcto de alumbrado público provee seguridad para los conductores de dicho sector. Asimismo, el estudio económico de las luminarias provee información acerca de la eficiencia del sistema. Y en base a los resultados crear una nueva propuesta para ahorrar energía y aprovechar las nuevas tecnologías que han surgido.

El trabajo está dirigido hacia los arquitectos e ingenieros civiles, los cuales son partícipes en el diseño, creación y reemplazo de un sistema de alumbrado público. Dicho trabajo provee información relevante a tomar en cuenta en dichos sistemas. Para los guatemaltecos la creación de un sistema de alumbrado público, que sea eficiente y funcional, es el beneficio más grande, esto debido a que provee confort al conductor, así como seguridad. Teniendo esto como base, se pueden realizar otras investigaciones en diversas carreteras o áreas de Guatemala, esto para proponer nuevos planes para mejorar la eficiencia luminosa y reducir el consumo energético del alumbrado público.

Con los resultados obtenidos de la simulación y de la iluminación del alumbrado público, se puede conocer si el sistema utiliza los recursos energéticos de forma eficiente, así como si alumbrado el espacio de forma uniforme y si tiene los requerimientos mínimos para que las personas puedan manejar con tranquilidad y no tengan que forzar la vista o poner en riesgo su vida al transitar en dicho trayecto.

## **IV. OBJETIVOS**

### **A. Objetivo general**

Diseñar una propuesta de mejora de la iluminación en el sistema de alumbrado público en el sector gastronómico de la zona 9 de la ciudad de Guatemala

### **B. Objetivos específicos**

- Identificar la eficiencia del sistema actual de alumbrado público.
- Especificar opciones energéticamente eficientes para el alumbrado público
- Efectuar una simulación de la iluminación del área para establecer la mejor distribución de las luminarias
- Evaluar económicamente la propuesta de iluminación

## V. MARCO TEÓRICO

### A. Luz y materia

La luz es una forma de radiación electromagnética, la cual es capaz de excitar la retina del ojo humano y así producir una sensación visual. Físicamente se puede interpretar este término como una onda electromagnética. (Cortés, 2010)

Esta es un componente esencial en cualquier ambiente, hace posible la visión del entorno, permite interactuar con los objetos, puede llegar a modificar la apariencia de un espacio y tiene una relación directa con el rendimiento visual, estado de ánimo y la motivación de las personas.

El espectro electromagnético es el conjunto de radiaciones electromagnéticas que se propagan en forma de ondas, este es extremadamente amplio. Dentro de las longitudes más pequeñas se tiene la radiación, la parte visible de este se le conoce como la luz. Esta hace referencia a la porción del espectro electromagnético que el ojo humano es capaz de detectar, lo cual se encuentra entre las longitudes de onda de 380nm hasta 780nm. El rango se puede descomponer en sus diferentes longitudes de onda por medio de un prisma de cuarzo, el cual refracta las diferentes longitudes de onda. (Cortés, 2010)

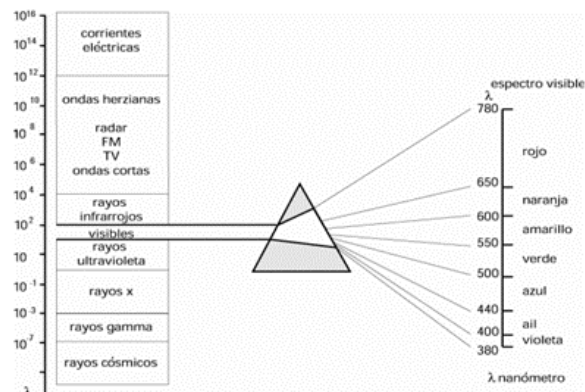


Figura 1. Espectro electromagnético y rango de espectro visible

(Cortés, 2010)

Las distintas longitudes de onda del espectro visible generan una variedad de impresiones de color, las de menor longitud se encuentran en los rayos ultravioleta, las ondas más largas dentro de estos se consideran beneficiosos (UVA), mientras que las más cortas son perjudiciales para la salud (UVB). No todas las longitudes de onda producen una sensación similar de luminosidad.

La luz blanca que emite el sol o las luminarias incandescentes es una combinación de todas las longitudes de onda del espectro visible. Con base en las ondas electromagnéticas se puede llegar a predecir la reflexión, absorción, refracción, entre otros.

Se tienen dos modelos de espectros, el primero es el continuo el cual se obtiene al descomponer la luz solar y el de las emisiones de luz por cuerpos sólidos. Y el segundo es el de espectros lineales, que se obtiene de luminarias que se basan en descargas de gases.

- **Color:**

El color con el cual se percibe un cuerpo depende de la cantidad de luz que emite, refleja, transmite y absorbe para cada longitud de onda en el espectro visible. Cada color se relaciona con un rango de longitud de onda, el ser humano solo lo percibe cuando la iluminación es suficiente.

- **Distribución espectral:** La emisión luminosa consiste en ondas de diferentes longitudes de onda. La visión suma todas las longitudes de onda en el espectro, lo cual hace imposible que se puedan distinguir los colores dentro de las mezclas.

### 1. Magnitudes y unidades fotométricas de la luz:

En la iluminación se han adoptado un conjunto de conceptos y medidas para comprender como funciona la luz, en donde se tiene en cuenta el contenido de energía de la radiación y la sensibilidad del ojo humano ante esta.

#### a. Flujo luminoso:

Es la cantidad de luz emitida por una fuente en todas las direcciones. La energía radiante de una fuente que produce una sensación luminosa. Su unidad es lumen (lm). Su expresión viene dada por:

$$\phi = \frac{dQL}{dt} \quad (1)$$

Donde:

$\phi$  = cantidad de energía luminosa radiada por unidad de tiempo

$dQL/dt$  = área de la superficie de la región analizada

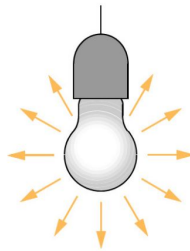


Figura 2. Flujo luminoso

(van Bommel & Rouhana, 2011)

#### b. Luminancia:

Magnitud que expresa el flujo luminoso en una dirección determinada, por unidad de ángulo sólido y por unidad de área proyectada de la superficie radiante sobre el plano normal a la dirección de radiación, y cuya unidad en el sistema internacional es la candela por metro cuadrado.

$$L = \frac{I}{S * \cos(\alpha)} \quad (2)$$

Donde:

L= luminancia

S = superficie

$\alpha$  = ángulo sólido

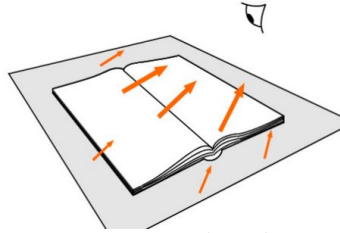


Figura 3. Luminancia

(van Bommel & Rouhana, 2011)

**c. Iluminancia:**

Es la densidad de flujo luminoso incidente en una superficie, su unidad es de (lm/m<sup>2</sup> o lx)

$$E = \frac{\phi}{S} \quad (3)$$

Donde:

E= iluminancia

S = superficie

$\phi$  = flujo luminoso

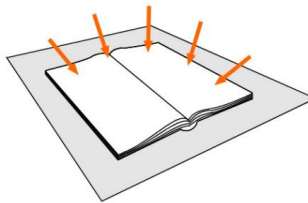


Figura 4. Iluminancia

(van Bommel & Rouhana, 2011)

**d. Intensidad luminosa:**

Es el flujo luminoso por unidad de ángulo sólido de una fuente de luz en una dirección dada. Y contenida en un ángulo sólido de 1 estereorradián (w). Su unidad en el sistema internacional es de candela (cd).

$$I = \frac{\phi}{\omega} \quad (4)$$

Donde:

I= intensidad luminosa

$\phi$  = flujo luminoso  
 $\omega$  = ángulo sólido de 1 estereorradián



Figura 5. Intensidad luminosa

(van Bommel & Rouhana, 2011)

#### e. Eficacia o rendimiento luminoso:

Es la relación existente entre el flujo luminoso y la potencia absorbida. Su unidad es de lm/W. Su ecuación es:

$$\eta = \frac{\phi}{P} \quad (5)$$

Donde:

$\eta$  = eficacia luminosa

$\phi$  = flujo luminoso

P = potencia absorbida

## 2. Direccionalidad y control de la luz:

La luz producida por la luminaria debe dirigirse de manera eficiente donde se necesite. Para bloquear o dirigir la luz se utilizan materiales que reflejen, refracten, absorban o transmitan la luz.

#### a. Reflexión:

Esta solo se presenta en una parte de la luz que incide sobre la superficie. La cantidad que se refleja depende de la superficie, el ángulo de incidencia de la luz y la composición espectral de esta. En caso de superficies oscuras la reflexión suele ser baja, mientras que en el caso del aluminio, plata y ciertas pinturas blancas su valor llega a estar alrededor del 90 %. La relación entre la luz reflejada e incidente se denomina reflectancia superficial, la cual tiene un valor entre 0 y 100 %. La reflectancia no suele ser la misma para todos los colores del espectro. La forma en que se refleja la luz también depende de la textura de la superficie. (van Bommel & Rouhana, 2011) Se tienen tres tipos de reflexión:

- Reflexión especular: Se produce en una superficie lisa, esta actúa como espejo y el ángulo de incidencia de la luz es el mismo que el reflejado. Se utilizan cuando se requiere un control preciso de la luz, como en alumbrados públicos.

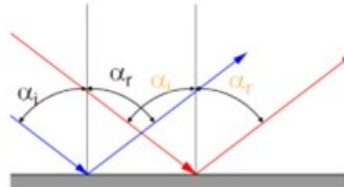


Figura 6. Reflexión especular

(van Bommel & Rouhana, 2011)

- Reflexión difusa: Cuando la superficie tiene irregularidades y la luz incidente se refleja en varias direcciones.

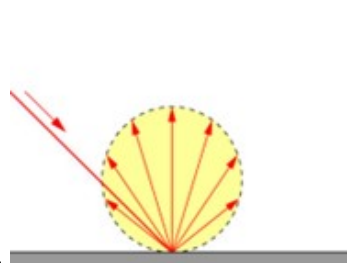


Figura 7. Reflexión difusa

(van Bommel & Rouhana, 2011)

- Reflexión mixta: Es una mezcla entre la especular y la difusa. Un ejemplo es una carretera mojada.

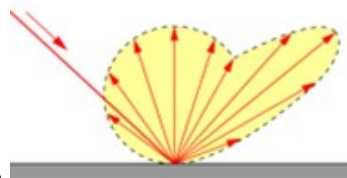


Figura 8. Reflexión compuesta

(van Bommel & Rouhana, 2011)

- Reflexión interna total: Sucede cuando la luz se desplaza por un medio de mayor densidad óptica que el medio que le rodea. En donde no existe un ángulo refractado y sólo hay un rayo reflejado. El valor crítico es de  $42^\circ$  para vidrio y aire. Este fenómeno se utiliza en las fibras de vidrio, en donde el pulso de luz introducido queda confinado en su interior y llega al final sin tener mayores pérdidas de intensidad.

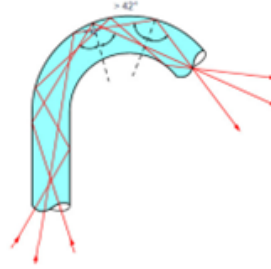


Figura 9. Reflexión compuesta

(van Bommel & Rouhana, 2011)

**b. Absorción:**

Es el porcentaje de luz que incide sobre una superficie y es absorbida, esta luz se transforma en calor. Depende del ángulo de incidencia y la longitud de la onda. Ciertos materiales son opacos a algunas frecuencias de luz y transparente ante otras.

**c. Transmisión:**

Parte de la luz que pasa a través de la superficie, este depende de la longitud de onda. El agua y el vidrio suelen ser los mejores materiales para la transmisión. La porción de luz transmitida en relación con la luz incidente se le conoce como transmitancia.

**d. Refracción:**

Se da cuando el rayo de luz se quiebra al pasar de un medio a otro de distinta densidad, con un ángulo que no es perpendicular al medio. Está relacionado con el cambio de velocidad de la luz, varían con la longitud de onda de la luz incidente.

**e. Interferencia:**

Se da cuando las ondas luminosas que están en fase se refuerzan mutuamente y las que están en contraste se anulan. En la vida real se utiliza para dividir la luz transmitida y reflejada de distintas longitudes de onda, por medio de revestimientos dicróicos.

**3. Luz y visión:**

**a. El ojo y su proceso visual:**

El ojo humano nos permite ver el entorno que nos rodea, más del 80% de la información del mundo exterior proviene de nuestros ojos. El ojo humano se considera que tiene una forma parecida a una esfera de 25 milímetros, en donde se encuentran seis músculos que permiten que este gire a cualquier dirección. La retina contiene las terminaciones sensibles a la luz, en donde estas se transforman a una corriente eléctrica y se transmiten al cerebro. El iris se encarga de determinar

cuanta luz entra en el ojo, este se abre o se cierra según las condiciones. (van Bommel & Rouhana, 2011)

La retina está formada por más de cien millones de terminaciones nerviosas, en cada ojo humano existen aproximadamente siete millones de conos y 120 millones de bastones. Los bastones se localizan de forma homogénea en la retina, exceptuando el eje visual (fóvea), estos son sensibles a la luz y se ocupan de la detección de formas y movimientos. Los conos se encuentran en la fóvea y están poco presentes en las demás áreas del ojo. Estos nos ayudan a distinguir los colores y observar los detalles. (van Bommel & Rouhana, 2011)

La sensibilidad que se tiene ante los colores depende de la combinación de conos y bastones. Estos contienen fotopigmentos que absorben la luz de una longitud de onda, cuando esto ocurre el fotopigmento cambia su estructura molecular y libera energía, la cual es transmitida de forma de impulso que contiene la información necesaria.

#### **b. La visión:**

La sensibilidad de los conos y bastones tiene una relación con la cantidad de luz. Cuando la luz diurna aparece, los bastones comienzan a funcionar correctamente y se puede observar los objetos con precisión, a dicho tipo de visión se le llama visión fotópica. (Secretaría de Comunicaciones y Transportes, 2015)

El campo de visión binocular del ser humano es de  $180^\circ$  en el plano horizontal y de  $130^\circ$  vertical. Al captar el objeto desde varios ángulos el cerebro puede interpretar la profundidad de este, en donde se tiene una visión escotópica. Cuando la visión procesa solamente los bastones, se obtienen imágenes borrosas. La mayor concentración de bastones se da a  $15^\circ$  de distancia de la dirección de la visión, por lo que se establece que este tipo de vista es periférica. (Secretaría de Comunicaciones y Transportes, 2015)

La mayoría de las condiciones de iluminación exterior es representada por la visión mesópica, en donde se tiene niveles de iluminación intermedios, se activan tanto los conos como los bastones. Cuando se activa la visión fotópica ( $30lx <$ ) se activan solamente los conos para la percepción visual. En condiciones escotópicas ( $10lx >$ ) solo se activan los bastones.

El ojo es capaz de adaptarse a diferentes niveles de iluminación gracias a los bastones que envían información, lo cual hace que el diafragma pueda cambiar de diámetro (pupila e iris). Debido a esto las lámparas que emiten radiación en zonas centrales del espectro tienen una mayor eficiencia, en donde la lámpara de vapor de sodio de alta presión se encuentra entre las más eficientes en esta categoría, así como de las más seguras, ya que facilita al ojo a captar una mayor cantidad de luz y contraste. (Secretaría de Comunicaciones y Transportes, 2015) A continuación, se muestra una curva de sensibilidad del ojo humano:

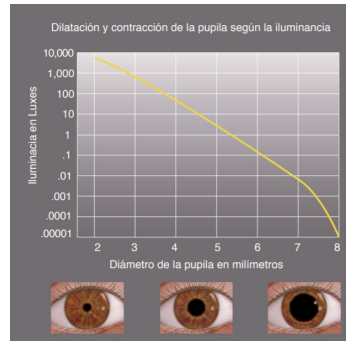


Figura 10. Relación del diámetro de la pupila y la iluminación

(Secretaría de Comunicaciones y Transportes, 2015)

#### c. Mecanismos de ajuste del ojo:

- **Acomodación:** En donde los músculos contraen la lente del ojo para hacerla más convexa y acortar así la distancia focal. El enfoque no depende de la distancia, si no de la refracción de la lente, es decir la longitud focal. La velocidad de ajuste depende de la luminosidad y el grado de cansancio de la persona, sin embargo, este es un proceso que sucede de forma inconsciente. Cuando hay una mayor cantidad de luminosidad el diámetro de la pupila es menor, con lo cual se tiene un mayor enfoque a largas distancias. (van Bommel & Rouhana, 2011)
- **Adaptación:** Es el mecanismo que se utiliza para cambiar la sensibilidad a la luz en el ojo, este consta de tres procesos: cambios en el tamaño de la pupila, cambio en el sistema nervioso de la retina y el nervio óptico y, principalmente cambios en la composición química de los conos y bastones de pigmento sensibles a la luz. (van Bommel & Rouhana, 2011)
- **Convergencia:** Se presenta cuando miramos un objeto y usamos ambos ojos, para lo que giramos los ojos de manera inconsciente. Al mirar un objeto, las líneas de visión de ambos ojos se encuentran en el punto objetivo, y cuanto más cerca se está de este, más giran los ojos hacia el centro. El giro requerido es la medida que toma el cerebro para conocer la distancia del objeto percibido. (van Bommel & Rouhana, 2011)

#### d. Rendimiento visual:

Los seres humanos procesan cierta parte de la información visual de manera inconsciente, para lo cual se requiere poder observar el contraste y los detalles. Para estar cómodos con el entorno visual se requiere de un nivel de iluminación adecuado, el cual también facilita un buen rendimiento visual.

La agudeza visual hace referencia a la capacidad del humano para distinguir los pequeños detalles, esta se expresa como el mínimo ángulo al cual dos objetos separados aún se pueden seguir viendo. Esta depende principalmente de la calidad del ojo, la luminosidad, contraste de objetos, edad del observador y la calidad de iluminación.

La mayoría de la información que se recibe se debe a las diferencias luminosas del campo de visión. El contraste de la luminancia se expresa como:

$$C = \frac{L_a}{L_b} \quad (6)$$

Donde:

C = Contraste

$L_a$  = Luminancia alta

$L_b$  = Luminancia baja

**4. Luz y salud :** La glándula pineal es un órgano localizado en torno al centro del cerebro, este es capaz de producir y liberar melatonina en el cuerpo humano. El reloj biológico y la síntesis de melatonina está regulado por la detección de la luminosidad a través de los ojos, en donde se utilizan los fotorreceptores especiales de la retina. Estos traducen la señal luminosa en una eléctrica, que se envía específicamente al núcleo supraquiasmático (NQS), por medio de largas proyecciones retinales en el nervio óptico. (Barba, 2010)

En la mayoría de los casos, las concentraciones de melatonina en la sangre son de diez a veinte veces mayor que en el día. Esta decae conforme el ser humano envejece, esto se debe a una pérdida de receptores B-adrenérgicos en la membrana pinealocito. (Barba, 2010)

A lo largo del día los patrones que se tienen de luz y oscuridad afectan la percepción del ser humano, especialmente su percepción del mundo y su respuesta psicológica, los cuales afectan la cantidad de información que se obtiene de un entorno. La rotación de la tierra en 24 horas respecto a un eje, genera un ritmo de 24 horas que regula una variedad de procesos dentro de nuestro organismo, algunos de estos son el ciclo circadiano, ritmo de la temperatura corporal, sueño y vigilia.

#### a. Ciclo circadiano:

La iluminación circadiana debe tener un diseño que respalde la necesidad humana de los ciclos de luz y oscuridad en sintonía con su sistema circadiano. Dentro de este se incluye tanto la iluminación natural como la artificial, teniendo en cuenta los cambios en el espectro de color, intensidad y direccionalidad a lo largo del día. (ARUP, 2019)

La iluminación exterior se debe tomar como una fuente que complementa la luz del día. Las propuestas de diseño varían debido a la infinidad de posibilidades que hay en el diseño arquitectónico. Para esto se debe tomar en cuenta lo siguiente:

- Las capas de luz deben proveer buen contraste y una buena variación espacial.
- La luz tiene que responder a la actividad que este destinado el espacio.
- Ajustar la iluminación para que esta pueda tener variabilidad, por medio de la intensidad, el color de luz, entre otros.

## **B. Alumbrado público**

El alumbrado público tiene una diversidad de beneficios para una ciudad, tales como suministrar iluminación para la población, promocionar el turismo, mejorar el comercio y proveer seguridad a las personas. Cuando se tienen niveles más altos de luz las personas se suelen sentir más seguras al caminar y manejar en la noche, esto provoca que más gente pase por dicho paso y fomenta la interacción social en dicho lugar. Para la creación y planificación de los sistemas de alumbrado público, se debe tomar en cuenta el consumo de energía y la contaminación lumínica de este.

### **1. Elementos del alumbrado público:**

Dentro de los elementos que conforman los alumbrados públicos se tienen los activos eléctricos y los no eléctricos. El primero pertenece a la infraestructura del transporte de energía eléctrica que alimenta las luminarias, en donde se tienen los medidores, transformadores, postes, luminarias, focos y redes. Los activos no eléctricos pertenecen indirectamente al servicio del sistema y tiene como finalidad soportar el servicio, como las grúas, oficinas, equipos de cómputo, etc.

Dentro de los elementos fundamentales se encuentran:

#### **a. Luminarias:**

Son el elemento que provee iluminación. Estas deben permitir un ahorro energético y a la vez ser eficientes. Se debe tomar en cuenta la intensidad luminosa y el tipo de fuente de luz. Así como la calidad energética, la zonificación y la duración de la vida económica de estas. Dentro de los elementos que conforman una luminaria se encuentra la carcasa, el refractor, la fuente de luz, la fotocelda, los accesorios, etc.

#### **b. Soportes:**

Se compone de elementos como brazos, báculos y columnas, para de esta manera mantener la luminaria de pie. Los postes se pueden tener de concreto, el cual es uno de los más utilizados hoy en día. Este material provee uniformidad dimensional, resistencia mecánica y elevada durabilidad. También se pueden tener los postes de madera, los cuales tienen la desventaja de tener un deterioro más rápido que los demás materiales. Y, por último, los postes de acero, los cuales suelen ser bastante costosos en su materia prima y en su mantenimiento.

#### **c. Equipos auxiliares:**

Dentro de los equipos auxiliares se encuentra el driver, este es un componente electrónico que controla la cantidad de energía eléctrica suministrada a las luces LED. Tiene como objetivo principal convertir la corriente alterna en continua para que las luces se puedan utilizar. Además, este las protege de sobretensiones, sobrecorrientes y fluctuaciones de voltaje. El balastro se utiliza en iluminación fluorescente, este regula la corriente, estabiliza el flujo de corriente eléctrica y mantiene un flujo de luz constante.

El condensador corrige el factor de potencia del sistema formado por las lámparas y el balastro inductivo, con lo que previene que haya una sobrecarga y minimiza el consumo de energía reactiva. Debe tener un aislamiento adecuado, su tensión nominal debe ser menor a la de la red a la que esté

conectado. Los arrancadores que se encargan de generar impulsos de tensión para encender la luminaria, también es conocido como cebador. Los equipos reductores de flujo luminoso que permiten regular la intensidad lumínica. (Organización Latinoamericana de Energía (OLADE), 2018)

## **2. Diferencia de iluminación en interiores y exteriores:**

La iluminación en ambientes exteriores difiere con la de espacios interiores, en la primera el estándar universal es la luz del sol y el cielo. La primera diferencia se encuentra en las superficies, en donde en interiores se tiene una variedad de estas, dentro de las cuales se encuentran las paredes y el techo. Sin embargo, a la hora de hablar de iluminación en exteriores el techo no está dentro de las superficies que se evalúan, e incluso en ciertos casos las paredes tampoco se encuentran en las áreas evaluadas. Al no contar con un espacio cerrado, los requerimientos de las luminarias son diferentes, en donde la iluminación que proveen debe ser adecuada, esto debido a que las áreas suelen ser mayores y no hay reflexión de la luz en las paredes y techo.

La iluminación artificial no puede iluminar de la misma manera que lo hace el sol, por esto mismo para iluminar objetos o áreas se utilizan múltiples y pequeñas fuentes luminosas. La iluminación en exteriores contempla el alumbrado público, iluminación de plazas, fachadas de edificios, monumentos, fuentes, parques, jardines, entre otros.

## **3. Calidad en la iluminación:**

No existen reglas estrictas que rijan el proceso de diseño de iluminación, ya que la iluminación es tanto un arte como una ciencia. No existen soluciones perfectas para los problemas de iluminación. Lo más importante es que esta proporcione una calidad de iluminación que asegure un adecuado rendimiento y confort visual. Los criterios con más relevancia en la calidad son: nivel de iluminación, distribución espacial de la luz en el campo visual, direccionalidad de la luz y color de esta. (van Bommel & Rouhana, 2011)

### **a. Niveles de iluminación:**

El nivel de iluminación se utiliza para indicar la cantidad de luz en un ambiente. Los niveles de iluminancia natural producidos por la luz natural están en el rango de algunas décimas de lux hasta valores de 100.000 lux. En relación con este intervalo, los niveles de iluminación artificial que se consideran satisfactorios son bajos, oscilando entre 3 y 25 lux para el alumbrado público, con un promedio de 10 a 50 lux para la iluminación ambiental interior, para la lectura y trabajo. (van Bommel & Rouhana, 2011)

### **b. Distribución espacial de la luz:**

Lo que realmente vemos en la luz natural es el patrón de iluminancia, en el que los reflejos de los objetos y la cantidad de luz natural que los incide juegan un papel importante. Sin embargo, para aplicaciones con diversos grados de reflexión, es muy difícil especificar niveles de iluminación en forma de luminancia. Uno de los pocos casos en donde sí se puede es el alumbrado público, donde las propiedades reflectantes de las superficies se definen con precisión, se utiliza la luminancia media de la superficie de la carretera como medida de la iluminancia. Para esto existen una variedad de normas y recomendaciones nacionales e internacionales respecto a las especificaciones de los

valores de iluminación a utilizar. (van Bommel & Rouhana, 2011)

Para el plano de la especificación del nivel de iluminación en el alumbrado público, se utiliza la superficie de la carretera en el plano horizontal. Otro factor para tomar en cuenta es la uniformidad de la iluminación, la cual se especifica como la luminancia mínima sobre un plano determinado en relación con la luminancia media. Asimismo, se debe evitar tener puntos de luz y oscuridad próximos al espacio iluminado. Además, se toma en cuenta el deslumbramiento, el cual se puede dar por luz artificial, natural y reflexión. (van Bommel & Rouhana, 2011)

#### **c. Direccionalidad de la luz:**

Como vemos el mundo está determinado por la dirección del flujo luminoso, dentro de estos esta la luz direccional, luz difusa y luz indirecta.

- La luz direccional se compone de un rayo delgado que golpea el objetivo directamente. Produce un buen contraste y un efecto de modelado, creando grandes sombras y puntos brillantes en la iluminación de las ventanas para realzar los contornos de los objetos iluminados. Sin embargo, las sombras muy densas pueden oscurecer los detalles del sujeto. Una buena visibilidad 3D generalmente requiere luz de al menos dos direcciones. (van Bommel & Rouhana, 2011)
  
- La luz difusa es cuando la luz llega de diversas direcciones al objetivo, reduciendo así la cantidad de sombras. La iluminación totalmente difusa es monótona, lo cual hace que sea complicado identificar objetos y calcular distancias.
  
- La luz indirecta se presenta cuando la luz se refleja en una pared o un techo de color claro y esta es la que llega hasta el objeto.

#### **d. Color de la luz:**

El índice de rendimiento de color o reproducción cromática (IRC) es la capacidad de una fuente de luz para reproducir colores normalizados, en comparación con la reproducción proporcionada por una luz de referencia. Cuando la luz incide sobre el cuerpo y su color es idéntico al propio entonces se dice que su IRC es igual al 100. Se considera malo si el valor está por debajo de 50, decente cuando está arriba de 50 pero por debajo de 90, y bueno cuando supera los 90.

Las lámparas incandescentes tienen un IRC de 100, pero no son capaces de reproducir colores y combinaciones, esto es debido a que tienen una temperatura de color de 2700 K, la cual es deficiente en el espectro azul, con lo que es difícil distinguir entre varios tonos azulados.

Nombre	Apariencia bajo la luz solar	Color
TCS01	Rojo verdoso claro	R1
TCS02	Amarillo grisáceo oscuro	R2
TCS03	Verde amarillo intenso	R3
TCS04	Verde claro amarillento	R4
TCS05	Verde claro azulado	R5
TCS06	Azul claro	R6
TCS07	Violeta claro	R7
TCS08	Lila rojizo claro	R8
TCS09	Rojo intenso	R9
TCS010	Amarillo intenso	R10
TCS011	Verde intenso	R11
TCS012	Azul intenso	R12
TCS013	Roa amarillento claro	R13
TCS014	Verde oliva suave (plantas)	R14

Figura 11. Clasificación del color según el IRC

(Susanne Seitinger, 2018)

La reproducción del color es relevante cuando se deben de observar los “verdaderos” colores de un objeto. Las recomendaciones y normas suelen tener valores mínimos del índice general Ra.

La temperatura de color hace referencia al color de una fuente de luz en comparación al color de un cuerpo negro. Esta es medida por su apariencia cromática, el color de esta varía según el incremento de la temperatura. Describe hasta qué punto la luz tendrá un aspecto cálido o frío. Se considera cálido cuanto su temperatura de color está por debajo de 3300 K, cuando está en el rango de 3300K a 5300K se considera neutro, y por arriba de este se considera frío.

La temperatura de color varía dependiendo del sector en donde se desee colocar las luminarias, para carreteras con niebla espesa o tormentas de nieve, se recomiendan luces amarillas, las cuales tienen una temperatura de color de 2700 a 3500K. Para las áreas de estacionamiento se utiliza luz fría, la cual oscila entre 5000 a 6000K, esto debido a que provee una sensación de seguridad a las personas. El parámetro hace referencia al color de la luz, no a su composición espectral, en donde dos fuentes de luz pueden tener un color similar, pero propiedades de reproducción cromática diferentes. (Leds Universe, 2021)

#### e. Economía de la luz:

Parte esencial del diseño de un proyecto es el presupuesto, debido a que, si se tiene un sistema de alumbrado de calidad, pero demasiado caro y poco eficiente energéticamente, se considera como una mala instalación. El coste total se compone de la valoración de todos los costos de un sistema a lo largo de su vida útil, normalmente se realiza un análisis para determinar cuál es más viable. Dentro de estos se consideran los costes de compra de equipos, instalación, energéticos, sustitución de luminarias y de mantenimiento. El coste más relevante es el de la iluminación, donde se buscan lámparas que sean eficientes para que el consumo eléctrico sea el mínimo posible. (van Bommel & Rouhana, 2011)

#### 4. Consideraciones de la durabilidad de las luminarias:

La durabilidad de las luminarias tiene una relación directa con los niveles de protección contra

agentes externos. Se pide que cumplan con estándares de seguridad relacionados con la envolvente, a los agentes externos y la humedad. Además de soportar los golpes mecánicos. (Ministerio de Vivienda y Urbanismo, 2017)

**a. Seguridad de las luminarias:**

Las luminarias tanto de exterior como de interior se tienen que proteger para soportar las condiciones a las cuales estén expuestas. El primer índice de protección es la IP (Ingress Protection) en donde se considera la protección a agentes externos sólidos y líquidos. Se refiere al nivel de protección eléctrica, de los equipos eléctricos en general, no solo el de la luminaria. El número que le acompaña, indica el grado de protección que se requiere, determinado por la envolvente en la que se encuentren. Estas están reguladas por las normativas nacionales UNE20324 e internacionales. La primera cifra hace referencia a la protección contra los cuerpos sólidos y el segundo a la protección contra los líquidos. (Ministerio de Vivienda y Urbanismo, 2017)

Para espacios públicos se recomienda que la primera cifra sea superior a 5 y que la segunda sea superior a 4. Para los alumbrados públicos se debe tomar en cuenta la protección que estas deben tener, en este caso al estar expuestas al aire libre deben tener un IP66, este protege las luminarias ante los cambios de temperatura y tiempo, así como del polvo y la humedad que se encuentran en el ambiente, la protección mínima que se puede utilizar es IP 54. Otro aspecto que se debe tomar en cuenta es la corrosión, por lo cual se debe asegurar que se tenga una protección de aluminio. (Leds Universe, 2021)

GRADO DE PROTECCIÓN CONTRA SÓLIDOS		GRADO DE PROTECCIÓN CONTRA LÍQUIDOS	
1ª CIFRA	DESCRIPCIÓN	2ª CIFRA	DESCRIPCIÓN
0	No protegida	0	No protegida
1	Protegida contra los cuerpos sólidos de más de 50 mm	1	Protegida contra la caída vertical de gotas de agua
2	Protegida contra los cuerpos sólidos de más de 12 mm	2	Protegida contra la caída de gotas de agua con una inclinación máxima de 15°
3	Protegida contra los cuerpos sólidos de más de 2,5 mm	3	Protegida contra la lluvia fina (pulverizada)
4	Protegida contra los cuerpos sólidos de más de 1 mm	4	Protegida contra las proyecciones de agua
5	Protegida contra el polvo	5	Protegida contra los chorros de agua
6	Totalmente estanco contra el polvo	6	Protegida contra fuertes chorros de agua o contra la mar gruesa
		7	Protección contra los efectos de la inmersión
		8	Protegida contra la inmersión prolongada

Figura 12. Resumen de índices de protección IP

(Ministerio de Vivienda y Urbanismo, 2017)

La protección antivandálica cuenta con el índice IK, el cual es un sistema de codificación que indica el grado de protección contra los impactos mecánicos, para de esta manera proteger los materiales y/o equipos en su interior. La nomenclatura va desde IK01 hasta IK10, a medida que este aumenta mayor es su resistencia al impacto. Para luminarias en espacios públicos el índice debe superar al IK07, y en caso de estar al nivel de piso (<1m) se recomienda IK10.

GRADO DE PROTECCIÓN IK	IK0	IK01	IK02	IK03	IK04	IK05	IK06	IK07	IK08	IK09	IK10
Energía (J)	---	0,15	0,2	0,35	0,5	0,7	1	2	5	10	20
Masa y altura de la pieza que golpea	---	0,2kg 70mm	0,2kg 100mm	0,2kg 175mm	0,2kg 250mm	0,2kg 350mm	0,5 kg 200mm	0,5kg 400mm	1,7kg 285mm	5kg 200mm	5kg 400mm

Figura 13. Grados de protección IK

(Ministerio de Vivienda y Urbanismo, 2017)

#### b. Mantenimiento de las luminarias:

El mantenimiento y la conservación de las luminarias requiere de una planificación en donde se incluye la elaboración de un calendario con el mantenimiento de la red, organización de planes de limpieza y actualización del catastro. Dentro de los tipos de mantenimiento que se pueden tener se encuentra el preventivo y el correctivo. (Ministerio de Vivienda y Urbanismo, 2017)

El mantenimiento preventivo hace referencia a la que se realiza en periodos cortos, usualmente en intervenciones mensuales para proteger las condiciones iniciales del sistema de alumbrado. Uno de sus objetivos es prevenir el desgaste natural de los componentes, además se utiliza para evitar o eliminar las causas y fallas potenciales del sistema por medio de técnicas administrativas y de diagnóstico. Dentro de las técnicas de diagnóstico se incluye las mediciones eléctricas en diversos puntos de la red de los perfiles de tensión, mediciones fotométricas y de los parámetros de operación de los sistemas de alumbrado.

Para este tipo de mantenimiento se tiene que tomar en cuenta las características de las luminarias y sus componentes. Se realizan inspecciones visuales durante el día y la noche. Dentro del mantenimiento se incluye la limpieza, la cual para luminarias debajo de 3.8m de altura se debe realizar mensualmente y las que están en una mayor altura cada tres meses. La limpieza evita que los niveles y la distribución de la luz se vea afectadas. (Ministerio de Vivienda y Urbanismo, 2017)

El mantenimiento correctivo es el que se utiliza para solucionar fallas en el sistema de iluminación, se lleva a cabo cuando el desgaste de un componente requiere un cambio. Para facilitar el proceso se debe estar actualizando de forma periódica el catastro de las instalaciones. Se debe tomar en cuenta el recambio de bombillas y elementos de la luminaria, las pruebas mecánicas y eléctricas del sistema, revisar el correcto funcionamiento del dispositivo de encendido y recortar el material vegetal que este cerca del sistema. (Ministerio de Vivienda y Urbanismo, 2017)

#### 5. Contaminación lumínica:

La contaminación lumínica hace referencia a la alteración de la oscuridad natural que tiene la noche por la luz innecesaria o inadecuada. Recientemente este fenómeno se asocia con el uso incorrecto de la iluminación exterior, lo cual, como toda contaminación, provoca impactos negativos en la vida de las personas y su salud. (Barba, 2010)

Este problema genera una variedad de consecuencias, entre las cuales se encuentra el gasto energético, la intrusión lumínica que afecta al sueño y vigilia de las personas, la dificultad de tráfico aéreo y marítimo, daño a los ecosistemas nocturnos y degradación del cielo nocturno. (Cortés, 2010)

Para la prevención y el control es necesario realizar una monitorización de la situación del medio ambiente, en relación con la contaminación lumínica. Se tienen dos clases principales de impacto ambiental, el primero se le conoce como general o de gran alcance, se presenta por la emisión a la atmósfera de luz artificial y de las fuentes secundarias de luz, como lo son las partículas suspendidas. El segundo es local o de corto alcance, se produce por la contaminación lumínica directa hacia las superficies u objetos que no son necesarios iluminar. (Barba, 2010)

La luz artificial insuficiente o mal utilizada, es una forma de contaminación ambiental, por lo que incluso cortos tiempos de exposición son perjudiciales para los humanos. La forma correcta para realizar el análisis del parámetro es medir la intensidad luminosa de la luminaria en cada dirección de emisión por unidad de flujo total emitido. A continuación, se muestra las diferentes emisiones de luz que se pueden tener:

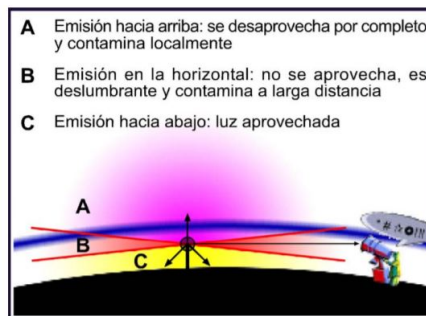


Figura 14. Direcciones de emisión en la generación de contaminación lumínica

(Barba, 2010)

Desde hace muchos años se han creado asociaciones y movimientos para la prevención de la contaminación, las cuales establecen las siguientes medidas:

- Impedir que la luz se emita encima de la horizontal hacia el cielo, el límite adoptado en las normativas europeas es de  $0 \text{ cd/klm}$  a  $90^\circ$  o más sobre el plano horizontal. ( $\pm 0.5 \text{ cd/klm}$ )
- Utilización de lámparas de espectro que sean menos contaminantes y eficientes energéticamente.
- Iluminar solamente aquellas áreas que lo necesiten
- Regular el uso de iluminaciones ornamentales, publicitarias y monumentales.
- Impedir el uso de proyectores que dirigen la luz hacia el cielo

El espesor de la atmósfera es denso y está limitado a unas pocas decenas de kilómetros, en donde la luz se propaga más lejos en ángulos pequeños y se suma a la luz proveniente de otras fuentes secundarias, creando así un nivel importante de luminosidad artificial. De manera contraria al emitir luz en ángulos elevados la mayor parte se escapa al espacio, en donde no se produce la adición. Las superficies iluminadas juegan un papel importante a la hora de evaluar la contaminación lumínica, esto debido a que en ausencia de obstáculos la luz se propaga libremente en la atmósfera. (Barba, 2010)

La contaminación lumínica ocurre en el momento en el que el ambiente físico que rodea a una persona, afecta su salud y su forma de vivir. Dentro de este tipo de contaminación visual se encuentran los carteles lumínicos, en donde al tener una gran cantidad de estos en las vías, así como el tipo de luz utilizada, puede afectar la salud, seguridad y el humor de las personas. En Buenos Aires se realizó un análisis del efecto de los carteles de la carretera en las personas, en donde al tener anuncios de diferentes colores y luces encendidas toda la noche, el cerebro trata de asociar ambas cosas, provocando que el ambiente se vuelva estresante y afecte la vida cotidiana de la persona. (Mejía, 2017)

La exposición a la luz durante la noche, cuando tiene suficiente intensidad y longitud de onda, produce una señal que altera el reloj biológico de una persona, en donde se ve afectada la producción de melatonina en la glándula pineal. La melatonina se secreta en las noches, su producción se ve afectada por la exposición de la luz durante este tiempo, la cual tiene una influencia en ciertas funciones del cuerpo como los ritmos circadianos, la sincronización, entre otros. (Barba, 2010)

En un cálculo fotométrico simple se determina que menos del 20 por ciento del flujo luminoso de la luminaria es de utilidad, en donde más del 80 por ciento de este es desperdiciado. Este derroche involucra la contaminación lumínica y el encandilamiento. (Ministerio de Vivienda y Urbanismo, 2017)

Los ecosistemas naturales no requieren luz adicional durante la noche y deben permanecer oscuros. La luz artificial en la noche es una forma de contaminación, en donde se cambia el ciclo natural de la luz y oscuridad, la calidad del cielo nocturno y, por lo tanto, el entorno natural, afectando la biodiversidad a nivel local y a kilómetros de distancia. Los cambios de brillo en los paisajes nocturnos, debido al uso de iluminación artificial durante la noche, están aumentando rápidamente en todo el mundo, tanto en iluminancia, como en extensión territorial. Esto se evidencia en los mapas de contaminación lumínica, que se procesan en base a imágenes satelitales nocturnas. (Slowlight, 2022)

El alumbrado bien diseñado y utilizado, si bien se considera como una fuente de contaminación para el medio ambiente, se considera un recurso de gran interés para las administraciones públicas y es un recurso vital para las ciudades y comunidades, independientemente de su tamaño, añade valor y contribuye a mejorar la calidad del medio ambiente. Por el lado contrario, al tener una iluminación mal diseñada, agrava efectos perjudiciales para el ser humano. Esta puede llegar a ser incómoda, contaminante y tener un consumo energético elevado, derrochando así los recursos disponibles.

#### **a. Manifiesto Slowlight:**

El manifiesto es un documento técnico que contiene los principios básicos para una iluminación pública sostenible. Esta iniciativa busca tener mejores entornos a través de la luz en ambientes rurales y urbanos, creando una armonía en espacios nocturnos. Está orientada a la ciudadanía en general, las administraciones con capacidad de gestión medioambiental, el sector empresarial, fabricantes, empresas constructoras, entre otros. (Slowlight, 2022)

Sus objetivos están alineados con los de la agenda urbana 2020-2030, en donde contribuye a la contaminación lumínica que afecta el medioambiente. Una iluminación sostenible y calmada reduce el consumo energético y la huella de carbono de los sistemas, creando un entorno más amigable y saludable para la ciudadanía y para la biodiversidad. (Slowlight, 2022)

Para que se cumplan las regulaciones se exponen una serie de principios básicos. Dentro de estas se busca lo siguiente:

- Involucrar a los gestores públicos y las entidades de diferentes niveles y de sector privado para que conozcan y participen en la iluminación sostenible.
- Se establece que preservar la noche es una obligación en el diseño del paisaje nocturno de las ciudades. En donde la iluminación también debe otorgar las condiciones de visibilidad para que la persona tenga seguridad y confort en las actividades que este desempeñando.
- El servicio de iluminación pública se debe gestionar con un vasto conocimiento y responsabilidad pública.
- Los territorios deben contar con normas de protección contra la contaminación lumínica.
- Crear una nueva estrategia que tome en cuenta los sistemas de medición, obtención de datos y regulaciones técnicas.

## **6. Factores a considerar en el sistema de alumbrado público:**

### **a. Visibilidad:**

La visibilidad de un objeto en la carretera está determinada por la diferencia de luminancias entre el obstáculo y el fondo. Cuando se tiene un objeto claro sobre uno oscuro se tiene un contraste positivo, pero si el objeto es más oscuro que su fondo entonces se tiene un contraste negativo. En las vialidades se desean los contrastes negativos. (Secretaría de Comunicaciones y Transportes, 2015)

Dentro de los problemas más comunes en la visibilidad se encuentra:

- El cálculo de las distancias en la noche
- Los peatones que cruzan la calle
- Los animales que cruzan la calle
- Factores meteorológicos como la lluvia, niebla o granizo.

### **b. Deslumbramiento:**

Es la pérdida momentánea de la visión por una luz o un resplandor intenso, en las carreteras esto es causado principalmente por las luminarias. En este se disminuye la capacidad del ojo, dificultando la visibilidad de los objetos, poniendo así en riesgo a la persona y causándole inconfort e irritación. El ojo humano está diseñado para adaptar el campo visual al nivel de mayor intensidad luminosa, por lo que, si la diferencia de luz entre una zona más brillante y una menos brillante es muy alta, se produce una discapacidad visual que no permite ver de forma adecuada. Se debe evitar el deslumbramiento debido a que este limita la capacidad del conductor de distinguir detalles y objetos que se encuentren dentro de la carretera. En sí se da por los diseños deficientes de alumbrados, la

mala distribución fotométrica y/o una instalación equivocada. (Ministerio de Vivienda y Urbanismo, 2017)

El deslumbramiento puede ser de incomodidad o de incapacidad, en ocasiones se pueden dar por separado, pero por lo general se presentan al mismo tiempo.

- **Incomodidad:** Esta es causada por un exceso de luminancias en el campo visual, tiene como consecuencia la incomodidad visual e incluso el dolor. Los parámetros físicos para la incomodidad no están definidos, esto debido a que varía según la persona, sin embargo, se puede predecir si esta es aceptable o no. Para esto se requiere del conocimiento de la luminancia del fondo, la dirección de la persona, la luminancia, tamaño de la fuente y la posición de las fuentes en relación con la dirección de la visión. (van Bommel & Rouhana, 2011)
- **Incapacidad visual por deslumbramiento:** La discapacidad visual por deslumbramiento reduce el rendimiento visual, y el brillo excesivo conduce a la pérdida de visibilidad. La causa más importante es la dispersión de la luz de la luminaria en la óptica del ojo, en donde se crea un velo luminoso en la retina, el cual reduce el contraste perceptible de la escena visual e impide la visibilidad (van Bommel & Rouhana, 2011)
- **Deslumbramiento superior:** Las fuentes de deslumbramiento fuera de nuestro campo de visión también pueden causar deslumbramiento. Este problema solo ocurre con fuentes de luz muy fuertes como el sol. (van Bommel & Rouhana, 2011)

El deslumbramiento puede ser causado también por vallas publicitarias, vitrinas excesivamente luminosas o señalizaciones. Las cuales son superficies grandes con altos factores de reflexión. (Ministerio de Vivienda y Urbanismo, 2017)

En la actualidad se cree que para tener una mejor visión se necesita más iluminación, sin embargo, al tener una gran cantidad de luz mal distribuida, provoca lo contrario y causa un encandilamiento.

#### **c. Uniformidad de luminancia:**

El objetivo principal de un alumbrado público en una carretera es destacar los obstáculos, para lo cual esta debe quedar iluminada uniformemente. Esto depende de la calidad de difusión y reflexión de los recubrimientos, el ajuste de las luminarias y sus cualidades fotométricas y la colocación de los equipos. La uniformidad de los niveles de iluminación en una carretera se establece cuando el conductor se encuentra en un vehículo en movimiento, la uniformidad conduce a obtener alternancias de bandas claras y oscuras. (Secretaría de Comunicaciones y Transportes, 2015)

#### **d. Aberración cromática:**

Es un tipo de distorsión óptica, en donde el ojo humano no es capaz de enfocar al mismo tiempo todos los colores en un único punto de convergencia, específicamente las tres zonas del espectro que contienen los tres tipos de conos. Este se puede corregir por medio de la colocación de dos lentes juntos, sin embargo, el ojo humano es incapaz de hacerlo. (Secretaría de Comunicaciones y Transportes, 2015)

Las longitudes de onda más cortas se perciben por la retina como imágenes borrosas. La retina tiene una mayor sensibilidad ante las longitudes largas (colores rojos) que ante las cortas (colores

azules). A continuación, se muestra cómo se relaciona la longitud de onda con el porcentaje de absorción:

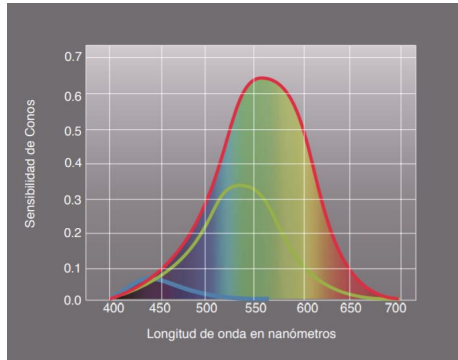


Figura 15. Absorción óptima de conos y bastones por la longitud de onda

(Secretaría de Comunicaciones y Transportes, 2015)

En una carretera este fenómeno es importante ya que el conductor debe tener una reacción rápida hacia la percepción de los objetos o personas que puedan estar dentro de esta. Cuando se utiliza la luz blanca para iluminar, se debe tomar en cuenta que su desgaste natural provoca que el espectro de color pase a un azul, en donde se da una pérdida de contraste y afecta la visibilidad del conductor. La iluminación artificial en carreteras es esencial ya que, al ser de noche, o cuando se tiene poca luz, la capacidad visual es más baja. Esto debido a que no actúan los conos, por lo que no se distinguen colores ni detalles. Este tipo de visión es llamado visión escotópica, en donde intervienen los bastones que captan la cantidad de luz y el movimiento de los objetos. Cuando dicho tipo de visión está expuesta a la luz blanca intensa, provoca que la vista necesite varios minutos para poder adaptarse a los niveles bajos de iluminación. (Secretaría de Comunicaciones y Transportes, 2015)

#### e. Pavimento:

Los recubrimientos de las calles representan un inconveniente al contar con un color oscuro, el cual al ser de noche y con lluvia u otra condición climática, dificulta la percepción de los obstáculos y automóviles. Dependiendo del color de este, gris o negro, se obtienen luminancias diferentes. (Secretaría de Comunicaciones y Transportes, 2015)

Al utilizar un recubrimiento claro se tiene la ventaja de poder crear un diseño de un sistema de alumbrado público cómodo para el conductor, así como eficaz. Asimismo, permite visualizar los obstáculos con mayor facilidad y reduce los costos energéticos al requerir un menor flujo luminoso. Por otro lado, es importante analizar las distancias de las luminarias, para de esta manera evitar el deslumbramiento. (Secretaría de Comunicaciones y Transportes, 2015)

La reflectancia de los pavimentos es esencial para el análisis de la iluminación, en donde se tiene una relación directa entre estas. Se tiene una clasificación de pavimentos, en donde el de más alta reflectancia es R1 y el de más baja el R4.

- R1 es el pavimento de concreto de cemento Portland, con un máximo de 15 % de agregados brillantes, tiene un coeficiente de luminancia media de 0.1. Su modo de reflectancia es mayormente difusa.

- R2 es el de asfalto de 10 cm de espesor, con 60 % de agregados gruesos, tiene un coeficiente de luminancia media de 0.07. Su modo de reflectancia es mixto, difuso y especular.
- R3 es el de asfalto con agregados de color oscuro y textura áspera después de un tiempo de uso, tiene el mismo coeficiente de luminancia que el R2. Su modo de reflectancia es ligeramente especular.
- R4 es de asfalto con una textura lisa y tiene un coeficiente de luminancia media de 0.08. Su reflectancia es mayormente especular.

El consumo también tiene relación con la reflectancia, cuando se tiene un valor mayor en los pavimentos se requieren menos luminarias para los niveles de luminancia.

**f. Depreciación por suciedad:**

- Muy limpio: Son espacios donde no existen actividades que generen polvo o humo, donde hay un nivel bajo de contaminación ambiental y existe un tráfico ligero. Tiene un nivel menor a 150 microgramos por metro cúbico de partículas ambientales.
- Limpio: No hay actividades que generan polvo o humos y tiene un tráfico moderado o pesado. Tiene un nivel menor de 300 microgramos por metro cúbico de partículas ambientales.
- Moderado: Existen moderadas actividades que generan polvo y humo, su nivel de partículas ambientales es menor a 600 microgramos por metro cúbico.
- Sucio: Existen actividades que generan polvo y humo.
- Muy sucio: Existen actividades que generan polvo y humo y las luminarias están cubiertas de humo.

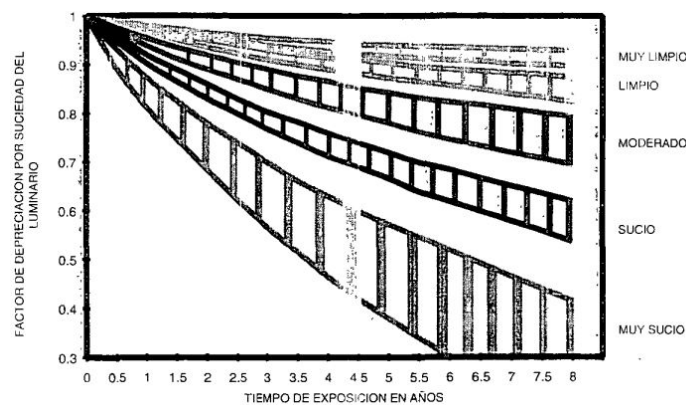


Figura 16. Relación suciedad y depreciación de luminaria

(Patiño, 2004)

## 7. Representación gráfica de magnitudes:

Las magnitudes luminosas producidas por fuentes de luz se representan por gráficas, las cuales son determinadas por los fabricantes de las luminarias.

### a. Curvas de distribución fotométrica:

Las curvas fotométricas son la representación gráfica del comportamiento de la luz, determina la intensidad luminosa en todas las direcciones del espacio en relación con el eje vertical. Estas están relacionadas a un flujo luminoso emitido de 1000 lm, y debido a que las fuentes normalmente tienen flujos superiores, los valores de la intensidad luminosa se obtienen con una regla de tres simple.

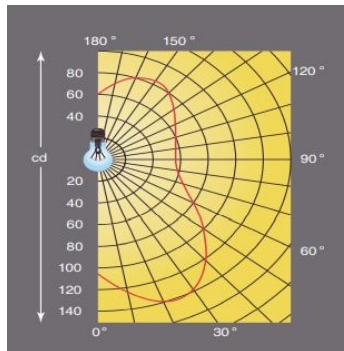


Figura 17. Curva fotométrica de una lámpara incandescente

(Secretaría de Comunicaciones y Transportes, 2015)

### b. Curvas isocandelas:

Estas son otra de las formas de representar la distribución de un flujo luminoso. En este se considera la luminaria como el centro de una esfera, en donde su superficie exterior se une por una línea con los puntos de la misma intensidad. Se desarrolla una semiesfera debido a que generalmente las luminarias tienen un plano de simetría. Tiene la ventaja de ser una de las representaciones más completas, pero la persona debe tener conocimiento del tema. Se utiliza para proyectores y alumbrado vial. (Secretaría de Comunicaciones y Transportes, 2015)

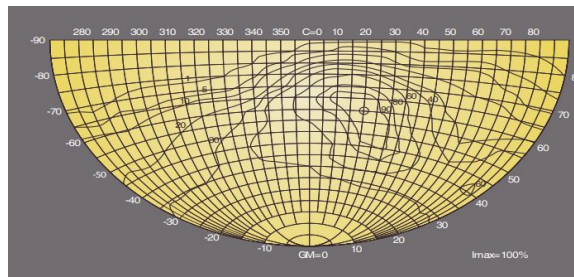


Figura 18. Curvas Isocandelas

(Secretaría de Comunicaciones y Transportes, 2015)

### c. Isolíneas

Son las líneas en un mapa que conectan los puntos que tienen el mismo valor de alguna propiedad, en este caso la iluminancia, la cual es la cantidad de luz que llega a una superficie.

**d. Curvas isolux:**

Representan información de la luminancia, en donde esta se obtiene uniendo puntos del plano de trabajo que tienen el mismo valor de luminancia. Se mide en lux. Se utilizan para conocer los valores que se tienen alrededor de dicha área y así conocer si cumplen con los requerimientos mínimos para proveer un espacio amigable y seguro para las personas. (Secretaría de Comunicaciones y Transportes, 2015)

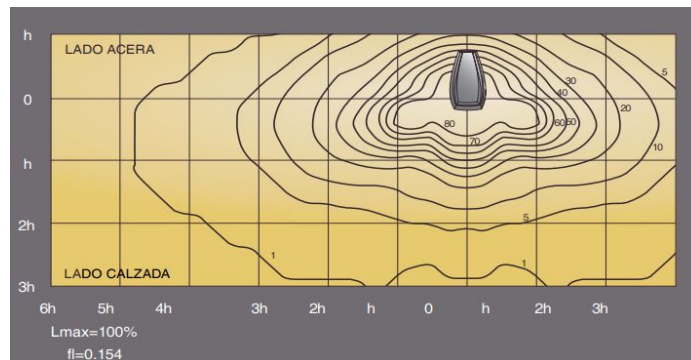


Figura 19. Curvas de isolux

(Secretaría de Comunicaciones y Transportes, 2015)

**e. Curvas isoluminancias:**

Estas determinan las luminancias que dependen del flujo luminoso reflejado por una superficie en la dirección del observador. Se mide en candelas por metro cuadrado. (Secretaría de Comunicaciones y Transportes, 2015)

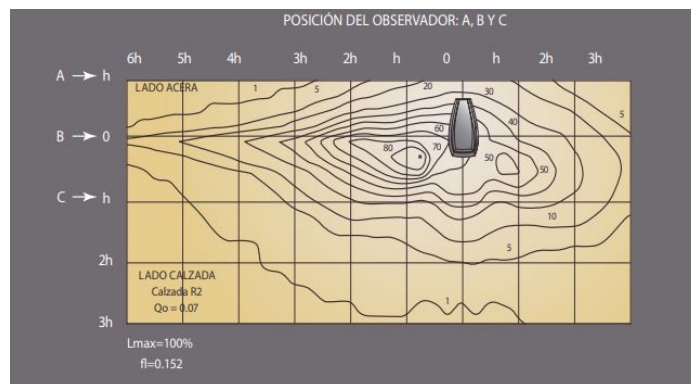


Figura 20. Curvas isoluminancias

(Secretaría de Comunicaciones y Transportes, 2015)

## **8. Smart Cities:**

Las ciudades inteligentes integran los sistemas y la tecnología humana para proveer un entorno sostenible para los ciudadanos. Se utilizan sensores electrónicos de recolección de datos para suministrar información en tiempo real del funcionamiento de la ciudad, en donde se pueden detectar fallas e interrupciones y se envían notificaciones a la persona encargada para poder resolver los problemas. Asimismo, la plataforma del sistema permite hacer un seguimiento de la iluminación respecto a su rendimiento y consumo de energía.

Dichas ciudades utilizan la tecnología como medio para producir mejores servicios, y oportunidades económicas y educacionales, así como una igualdad social. El concepto engloba 6 dimensiones: economía inteligente, movilidad inteligente, entorno inteligente, vida inteligente, gente y gobernanza inteligentes (Moura & de Abreu e Silva, 2018)

El alumbrado público es uno de los elementos esenciales en una infraestructura urbana. La utilización de lámparas LED es cada vez más común, esto debido a la posibilidad de un ahorro en los costos, una ayuda al entorno natural y una multifuncionalidad que ofrece en su instalación en farolas.

Estas lámparas se pueden conectar a un sistema de gestión avanzado que permite la programación de escenarios de funcionamiento, en donde se puede modificar la intensidad de la luz conforme a las necesidades, dependiendo de las condiciones meteorológicas y del flujo vehicular y de peatones en el lugar.

Las ciudades en todas partes están creciendo, una gran parte de la población vivirá en áreas urbanas, por esto es una necesidad encontrar soluciones acerca de cómo administrar los costos y la logística, al mismo tiempo que se crea un espacio habitable y atractivo para los ciudadanos. En virtud de las nuevas tecnologías aplicadas al alumbrado público, ahora existen formas de contribuir a esto y generar beneficios para todas las partes interesadas.

## **C. Distribución**

### **1. Distribución de luz:**

La sociedad de ingeniería de iluminación de Norte América (IESNA) desarrollo una clasificación y parámetros para describir las propiedades fotométricas de las lámparas. La clasificación ayuda a los diseñadores de iluminación a poder elegir las luminarias más adecuadas para el alumbrado público. Las categorías son distribución de luz lateral, distribución de luz vertical y clasificación de corte.

#### **a. Distribución lateral:**

La clasificación de esta describe dónde cae la luz de una luminaria en la superficie de la calle en relación con el ancho de la calle, es decir qué tan lejos puede llegar la luz a través de la vía. La calificación de las categorías depende de la distancia lateral, la cual esta medida en una variedad de puntos de la altura de montaje de la lámpara (mh). A continuación, se muestran los tipos y sus definiciones: (Iowa State University, Center for Transportation Research and Education, 2013)

- Tipo I: Tiene una distribución lateral en dos sentidos, con un ancho de 15° cada una. Este se

utiliza cuando la unidad se coloca cerca del eje de la calle.

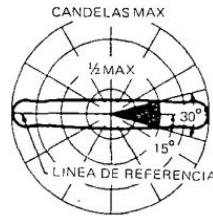


Figura 21. Lámpara tipo I dos direcciones

(Patiño, 2004)

También existen las lámparas de tipo I de cuatro direcciones, donde entre las concentraciones de luz forman ángulos de aproximadamente  $90^\circ$ . Se utilizan para instalaciones cerca de una intersección de calle de ángulo recto. (Patiño, 2004)

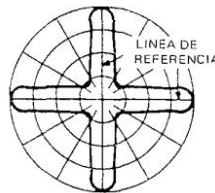


Figura 22. Lámpara tipo I cuatro direcciones

(Patiño, 2004)

- Tipo II: Tienen cuatro direcciones de concentración de luz, con un ancho de  $20^\circ$  y menos de  $30^\circ$ . Se aplica el alumbrado cerca de las aceras de calles estrechas, la cual no exceda 1.6 veces la altura de esta.

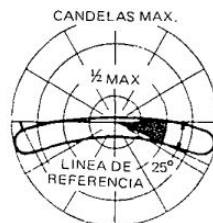


Figura 23. Lámpara tipo II

(Patiño, 2004)

- Tipo III: Tienen un ancho de distribución lateral de luz de  $40^\circ$ . Se colocan cuando se está cerca de un costado de una calle de mediana anchura, la cual no exceda 2.7 veces la altura del alumbrado.

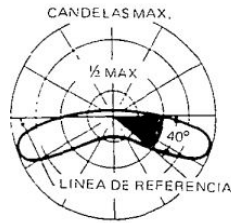


Figura 24. Lámpara tipo III

(Patiño, 2004)

- Tipo IV: Tienen una anchura lateral de 60°. Se usa en calles anchas, donde esta no excede 3.7 veces la altura del montaje.

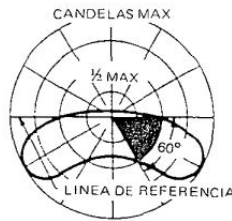


Figura 25. Lámpara tipo IV

(Patiño, 2004)

- Tipo V: Tienen una distribución circular, esta se coloca cerca del centro de la calle en avenidas centrales y cruces.



Figura 26. Lámpara tipo V

(Patiño, 2004)

#### b. Distribución vertical:

Esta describe donde la luz con su máxima intensidad (candela máxima) cae longitudinalmente arriba y abajo de la calle, esta es medida en varios puntos de la altura de montaje en relación con la ubicación de la luminaria. (Iowa State University, Center for Transportation Research and Education, 2013)

A continuación, se muestran los tipos de distribución vertical y sus definiciones:

- Corta: La intensidad máxima esta entre 1.0 a 2.25 mh de cada lado longitudinal de la posición de la luminaria.
- Bastante corta: La intensidad máxima esta entre 0 a 1 mh de cada lado longitudinal de la posición de la luminaria.
- Mediana: La intensidad máxima esta entre 2.25 a 3.75 mh de cada lado longitudinal de la posición de la luminaria.
- Larga: La intensidad máxima esta entre 3.75 a 6.0 mh de cada lado longitudinal de la posición de la luminaria.
- Bastante larga: La intensidad máxima esta por arriba de 6.0 mh de cada lado longitudinal de la posición de la luminaria

## 2. Implantación de los puntos de luz:

En la implantación de los puntos de luz en tramos rectos se consideran 5 tipos de distribución:

### a. Unilateral:

Cuando los puntos de luz se encuentran en un mismo lado de la vía. Se utiliza cuando el ancho de la calzada es menor a 1.2 veces la altura del montaje de las luminarias.

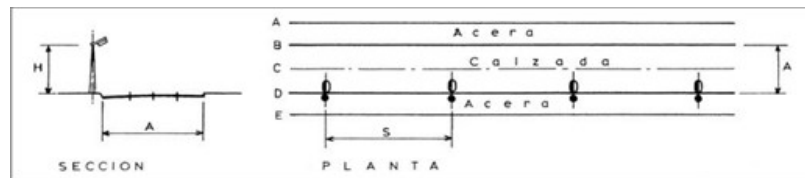


Figura 27. Distribución de luminarias unilateral

(Patiño, 2004)

### b. Bilateral tresbolillo:

Cuando los puntos de luz están en ambos lados de la vía a tresbolillo o en zigzag. Se utiliza cuando el ancho de la calzada es de 1.2 a 1.5 veces la altura de montaje de las luminarias.

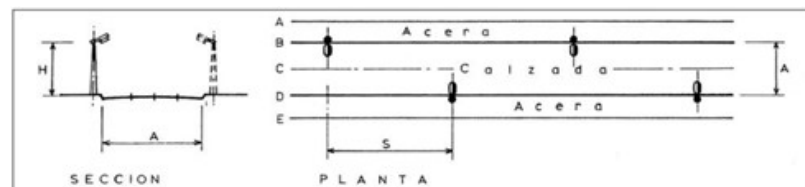


Figura 28. Distribución de luminarias bilateral tresbolillo

(Patiño, 2004)

**c. Bilateral pareada:**

Cuando los puntos de luz están en ambos sentidos de la vía, uno opuesto al otro. Se utiliza cuando el ancho de la calzada es mayor a 1.5 veces la altura de montaje de las luminarias, y se recomienda usarlo cuando la anchura sea mayor a 1.3 veces la altura del montaje.

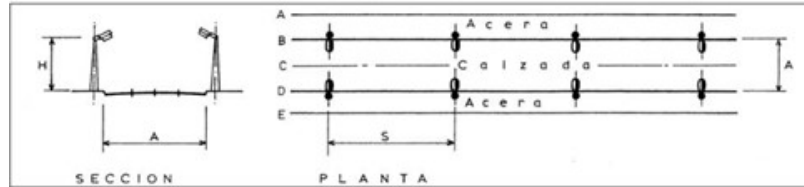


Figura 29. Distribución de luminarias bilateral pareada

(Patiño, 2004)

**d. Axial/ central:**

Se usan puntos de luz en columnas o postes de doble brazo en la mediana que separa los carriles de los dos sentidos de circulación, cuando los anchos están entre 1 y 3 m. Cuando la mediana supera los 3m no se utilizan postes dobles, se debe realizar un análisis de las vías como si estuvieran separadas.

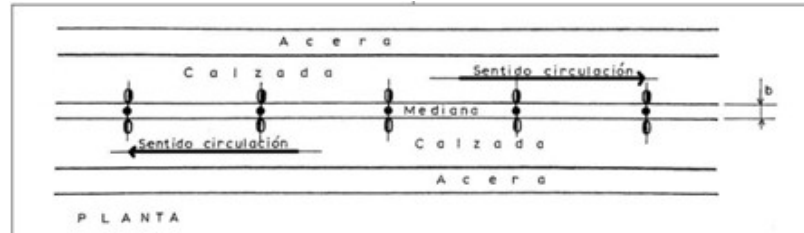


Figura 30. Distribución de luminarias para valores de b entre 1 a 3 m

(Patiño, 2004)

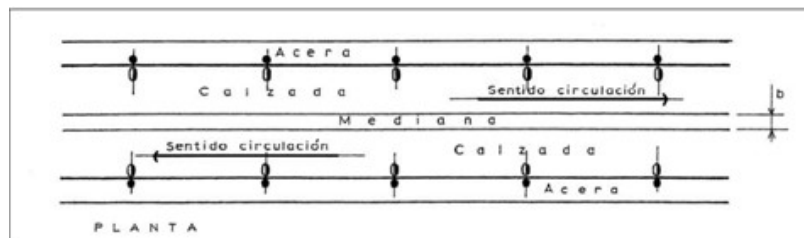


Figura 31. Distribución de luminarias para valores de b cualquiera

(Patiño, 2004)

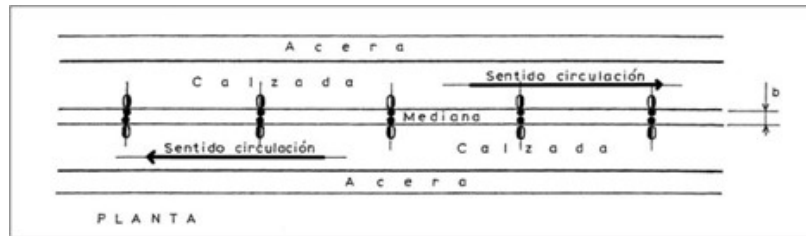


Figura 32. Distribución de luminarias para valores de b mayores a 3 m

(Patiño, 2004)

**e. Catenaria:**

Se presenta cuando los puntos de luz se colocan axialmente en los cables longitudinales de la catenaria, la cual se encuentra en la mediana y está soportada por dos postes situados a una gran distancia entre ellos, de 50 a 100 m.

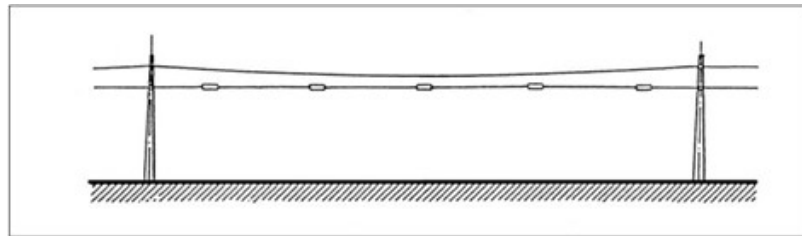


Figura 33. Distribución de luminarias en catenaria

(Patiño, 2004)

En las vías la altura de los postes depende del ancho de la calzada, para tener una distribución media de iluminación adecuada se recomienda que para las luminarias que utilizan lámparas de vapor de sodio a alta presión, la altura mínima sea superior o igual a 0.8 veces el ancho de la calzada. Para las lámparas de vapor de mercurio a alta presión, una altura mínima superior o igual al ancho de la calzada y para las lámparas de vapor de sodio a baja presión, una altura de 1.2 veces el ancho de la calzada.

**D. Tipos de lámparas**

Las lámparas utilizadas en los alumbrados públicos tienen diferentes requerimientos en comparación a las utilizadas en interiores, estas tienen exigencias específicas de funcionamiento, en donde se evalúa principalmente la eficacia luminosa y su duración de vida económica.

Dentro de los factores que se deben evaluar en la elección de luminarias se tiene que tomar en cuenta la potencia eléctrica de estas, en donde para la iluminación en carreteras principales se suelen utilizar luminarias con potencia de 120 W hasta 600 W, dependiendo de la separación de estas. Para carreteras secundarias se utilizan de 70 a 150 vatios y para las aceras de 30 a 80 vatios. Entre mayor sea la distancia entre los postes mayor debe ser la potencia de las luminarias. Para la distribución

de estas, se debe tener en cuenta la comodidad del conductor, su seguridad y la intensidad de la luminaria. Asimismo, se deben evitar tener espacios oscuros, para esto existen luces LED especiales para el alumbrado público, en el cual la luminaria distribuye la luz en 3 direcciones, cubriendo así una mayor superficie (Leds Universe, 2021)

Las lámparas utilizadas en alumbrado públicos son:

### **1. Lámparas de vapor de mercurio:**

Las lámparas que están basadas en el vapor de mercurio funcionan por medio de la evaporación de los átomos de elemento, esto provoca que se presente una luz ultravioleta que es absorbida por el recubrimiento del fósforo en polvo en el interior de la lámpara, el fósforo en estado excitado provoca que se emita luz visible. (Leds Universe, 2021)

Dentro de esta categoría puede encontrarse las de alta y baja presión, las cuales se diferencian por sus condiciones de operación. Para las de baja presión se tiene una gran cantidad de radiaciones ultravioletas en la banda 253.7nm y con las altas presiones el espectro cambia, teniendo una banda con sensación al color violeta. Para el alumbrado público se utiliza la lámpara de alta presión. (Leds Universe, 2021)

La eficacia luminosa de una lámpara de mercurio de alta presión depende de la potencia de esta. El rango que suelen tener es de 46.3 a 58.5 lm/W con potencias de 80 a 1000 W. (Fonseca et al., 2018)

La distribución espectral de las lámparas de mercurio de alta presión se presenta A continuación:

- Vidrio claro: Tienen un color blanco azulado y una temperatura de color del orden de 6000K y un valor de 15 en el índice de rendimiento de color
- Con recubrimiento: Poseen los colores más cálidos y un IRC de 52.
- Color mejorado: Tiene colores cálidos con valores de 4300 K y un IRC de 48

La vida útil se relaciona con la potencia de la lámpara, el ochenta por ciento de los casos para potencias de 80 a 250 W se tienen 16000 horas de funcionamiento y para las de 700 a 1000 W se tienen 12000 horas de funcionamiento. (Devki Energy Consultancy Pvt. Ltd, 2015)

Dichas luminarias han sido remplazadas en gran medida por tecnologías más modernas, una de las razones principales es la poca eficiencia energética que tienen, consumen mucha energía y emiten una cantidad significativa de calor, lo cual resulta en un mayor gasto y contribuye a los efectos de la isla de calor. Adicionalmente estas tienen una vida útil relativamente corta y producen un espectro de luz estrecho, lo cual dificulta la visualización precisa de los colores.

### **2. Lámparas de haluros metálicos:**

Son lámparas que cuentan con descarga de alta presión al igual que las lámparas de vapor de mercurio. Estas son bastante similares, sin embargo, la de halogenuros metálicos contiene una variedad de aditivos de halogenuros metálicos extras, no solo el vapor de mercurio. (Leds Universe, 2021)

La eficacia luminosa de las lámparas se encuentra entre los 80 y 100 lm/W, con potencias entre 70

a 1000W. El índice de rendimiento del color tiene un valor entre 65 a 95. Su vida útil tiene valores entre 9000 y 10000 horas.

### **3. Lámparas de sodio de alta presión:**

Las lámparas de sodio de vapor de alta presión se conocen como una de las más eficientes, se conforma de dos ampollas tubulares de vidrio, la interior es el de descarga y a los lados tiene electrodos que se unen al casquillo de la lámpara. La exterior tiene la función de proteger y está fabricada con vidrio transparente. Para encenderlas se requiere aplicar tensiones superiores a la de la red utilizando arrancadores, esto debido a la elevada presión de gases en el interior del tubo de descarga. (Leds Universe, 2021)

Estas tienen la característica de abarcar casi todo el espectro visible, teniendo así una luz más agradable para los usuarios. En comparación con las lámparas de mercurio tienen un costo más elevado para el equipo auxiliar, sin embargo, tiene un menor costo de funcionamiento. (Leds Universe, 2021)

El tubo arqueado está hecho de un material cerámico que puede soportar temperaturas de hasta 1000°C. Está lleno de xenón para ayudar a iniciar el arco, así como una mezcla gaseosa de sodio y mercurio. Dichas lámparas difieren de las de mercurio y de halogenuros metálicos ya que no contienen electrodos de arranque. (Devki Energy Consultancy Pvt. Ltd, 2015)

Este tipo de lámparas se suele utilizar en iluminación de exteriores y para aplicaciones industriales, en donde el renderizado del color no es una prioridad. Una de las desventajas de dicha luminaria es su baja capacidad de reproducción cromática (IRC), en donde su principal objetivo es resaltar las señales y las pinturas sobre el asfalto. Debido a su bajo IRC los objetos pueden verse descoloridos y distorsionados en comparación con la luz natural. Además, estas luminarias emiten una luz amarillenta que puede llegar a afectar la percepción del conductor en la carretera y disminuir la seguridad vial.

Su eficacia luminosa está en un rango de 80 a 130 lm/W y se tienen potencias de 70 a 1000W. Estas proporcionan una visión de alto contraste y en su luz predomina el color amarillo. (Fonseca et al., 2018)

La vida útil promedio es de 30000 horas dependiendo de su diseño, a pesar de esto el valor depende del aumento de la tensión del arco.

### **4. Lámpara de vapor de sodio de baja presión:**

Estas lámparas tienen la reproducción de color más baja entre las demás y tiene la mayor eficiencia y vida útil. Requieren tensiones más grandes que la nominal de la línea, por esto requiere de un equipo auxiliar del tipo autotransformador. (Fonseca et al., 2018)

Estas tienen una buena eficacia luminosa, poseen valores entre 100 a 180 lm/W en donde las potencias van de 18 W a 180 W. Su flujo luminoso es monocromático, por lo que se puede utilizar solamente en vías con un flujo vehicular de alta velocidad y también en zonas con neblina.

La luz producida es de color amarillo y tienen una monocromaticidad, por esto no permiten visualizar correctamente los colores. Su vida útil puede llegar hasta 22000 horas de funcionamiento.

## 5. Lámparas LED:

Esta tecnología varía con respecto a la de los demás sistemas de iluminación, en donde se basa en la tecnología de la electrónica de estado sólido. La mayoría de los alumbrados públicos tienen diseños integrados, en donde se considera el equipamiento interno como uno solo. (Fonseca et al., 2018)

Las lámparas LED dan la opción de tener luminarias más pequeñas, ligeras, frías y brillantes, que tienen un ahorro energético en comparación a las demás. (Leds Universe, 2021)

Dentro de sus ventajas se encuentra:

- Alta eficacia luminosa: Se tiene un rango de 130 a 150 lúmenes por vatio en las lámparas más eficientes, y en las más populares 80 lúmenes por vatio.
- Bajo consumo: Consumen de 80 a 90 % menos electricidad que una lámpara corriente. Consumen 2.5 veces menos que una de bajo consumo convencional y 8.9 veces menos que una lámpara incandescente normal. Con esto la factura puede disminuir un 90 % menos. Lo cual también reduce la cantidad de CO<sub>2</sub> producido por los sistemas.
- Vida útil: Su degradación es gradual conforme el tiempo. Tiene una duración entre 30000 y 50000 horas, esto hasta que su luminosidad está por debajo del 70 %, en donde se aproxima que tiene una aplicación de 10 a 30 años de 10 horas diarias 300 días al año.
- Calidad de luz emitida: Tienen un IRC de aproximadamente 90.
- Respuesta instantánea: El encendido y apagado es bastante rápido en comparación a otras lámparas, y este no se degrada por el número de encendidos. Algunos fabricantes tienen modelos regulables, lo cual permite un control de gasto.
- Ecológicos: Son totalmente reciclables ya que no poseen mercurio ni materiales tóxicos.
- Uso: Tienen una gran versatilidad, con diferentes tipos de color, formas, etc. Su bajo consumo las hace útiles para sistemas de iluminación de emergencia con el uso de baterías o generadores auxiliares.

## E. Energía en el sistema de alumbrado

La energía eléctrica en el sistema es importante dado que esta es la fuente para iluminar los espacios públicos, la eficiencia energética es esencial para reducir los costos y el impacto ambiental, como la huella de carbono.

Dentro del todo el consumo energético de la sociedad, el alumbrado público forma parte importante de este. La iluminación y el consumo de la energía eléctrica están estrechamente relacionadas, por lo tanto, los parámetros que precisan el consumo son: el costo de la energía, el tiempo de uso de la iluminación (en horas), la potencia de la lámpara (en watts) y la tecnología de la lámpara.

**1. Gasto energético:** Dependiendo de la luminaria que se utilice es el gasto energético que se tienen en el sistema. El alumbrado público es el sector en donde se tiene más oportunidad para mejorar la eficiencia energética. Dentro de las consideraciones para lograr una eficiencia energética

se tiene el consumo, el cual es la eficiencia energética real de la luminaria, la fotometría que es la correcta distribución lumínica de las luminarias y el diseño de iluminación.

La energía consumida por una luminaria depende de la potencia y del tiempo que esté funcionando, ambas con la misma relevancia. Es esencial conocer el consumo de energía de una instalación para poder realizar un análisis de costo eficiencia. La potencia instalada se obtiene multiplicando el número de luminarias por su potencia unitaria, incluyendo la del equipo auxiliar. Las horas de uso depende de los sistemas de control usado y de los patrones de ocupación del espacio.

Todos los usuarios del servicio de distribución final de la distribuidora de energía eléctrica tienen que estar asignados a una de las categorías de los pliegos tarifarios. El alumbrado público es una tarifa en baja tensión, se aplica para alumbrados públicos y ornamentación que sean accionados con sistemas de fotosensores, que consuman energía durante la noche y que estén conectados a la red del distribuidor. Para determinar su consumo mensual se debe ir a la comisión nacional de energía eléctrica (CNEE) (Empresa Eléctrica de Guatemala, S.A. (EEGSA), 2018)

En Guatemala no existe una manera exacta de estimar las tarifas por alumbrado público ya que eso depende de las municipalidades. De acuerdo con la ley general de electricidad en el artículo 96 se menciona que mensual o bimensualmente se realiza una medición de todos los parámetros para la facturación de los usuarios, donde se aplican las estructuras tarifarias, a este monto se le agrega los montos por impuestos y tasas de la Ley. La Comisión puede autorizar que se incluya la tasa por alumbrado público cuando haya un acuerdo entre el distribuidor y la municipalidad. Y en el artículo 83 se establece que el costo asociado a las instalaciones de alumbrado público no se incluye dentro del cálculo de la tarifa base. (CNEE, 2018)

En el 2016 entre febrero y abril la tarifa de alumbrado público fue de 1.212749 Q/kWh. En el departamento en donde el costo fue la más elevado fue en Santa Eulalia, el cual es un municipio del departamento de Huehuetenango, teniendo un valor de 2.556873 Q/kWh

## **F. Sistemas de alumbrado público LED de energía solar**

Los elementos urbanos y la iluminación tienen un gran campo de aplicación para los paneles fotovoltaicos. La energía solar es la que proviene de la radiación electromagnética del sol, la cual es la fuente más grande de energía disponible.

Un panel solar es un módulo que convierte la energía, de la luz del sol, para generar electricidad de corriente directa, este tiene como componente principal la célula fotoeléctrica. Hay dos tipos de paneles solares cristalinos, los cuales son policristalino y monocristalino. Los paneles cristalinos son utilizados frecuentemente debido a su tecnología y su precio. Los paneles policristalinos suelen ser tener un menor costo a los monocristalinos, sin embargo, para el alumbrado público se suele utilizar los monocristalinos debido a que tienen un tamaño más reducido y tienen una mayor eficiencia, haciendo que al final el poste de luz sea más barato y fácil. (Wong, 2014)

El panel solar provee electricidad para cargar la batería durante el día, la carga de esta es controlada por un controlador de carga. El funcionamiento de la bombilla LED se maneja mediante un circuito de control con los sensores, tal como el de resistencia dependiente de la luz (LDR). El panel solar se coloca hasta el tope, para así reducir la posibilidad de sombras. (Wong, 2014)

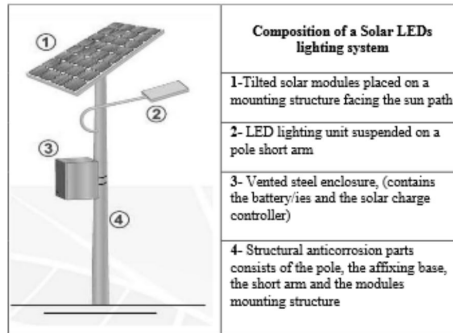


Figura 34. Estructura de alumbrado público con energía solar y luminarias LED .

(Wong, 2014)

La batería tiene la función de almacenar la energía producida por los paneles, durante todo el día. Cuando la demanda de carga es mayor a la energía recibida por los paneles, las baterías proveen energía estable para la carga. Algunos tipos de baterías utilizadas son:

- **Batería de plomo ácido (LA):** Dichas baterías son las más comunes en los sistemas impulsados por energía solar, esto debido a su avanzada tecnología y su costo reducido. Estas solo pueden ser utilizadas con los de baja profundidad de descarga (DOD) para de esta manera poder extender su vida útil. Hay dos tipos de batería LA, los cuales son inundadas y las de ácido de plomo reguladas por válvulas (VRLA), las cuales son baterías libres de mantenimiento
- **Baterías de níquel – cadmio (Ni-Cad):** Estas tienen la desventaja de tener un costo elevado y representar un peligro al ser desechadas debido al cadmio. A pesar de tener ventajas sobre la batería LA, como una mayor vida útil y una mejor tolerancia a altas descargas, las baterías Ni-Cad no son utilizadas normalmente en los sistemas de energía solar debido a su costo y su reducida disponibilidad.
- **Batería de iones de litio (LI o polímero de litio (LP):** Las baterías de litio se consideran como las más viables en los sistemas de energía solar, esto se debe a la energía específica, el alto porcentaje de DOD y el elevado número de ciclos de carga. Sin embargo, debido a su alto costo este tipo de baterías no son las más utilizadas o preferidas. Hoy en día debido a la demanda los costos han ido reduciendo de su manufactura.

Se utilizan las luminarias LED debido a que tienen una vida útil y una eficiencia eléctrica mejor a las luminarias incandescentes y la mayoría de las fluorescentes. Al igual que las luces incandescentes las luces LED pueden alcanzar su máximo brillo sin necesidad de calentar, al contrario de las luces fluorescentes. El costo inicial de las LED es mayor y el chip de esta requiere de un controlador de corriente directa (DC). (Wong, 2014)

Los controladores de carga son utilizados para controlar la carga de las baterías, el objetivo principal de estos es prevenir una sobrecarga de las baterías en los paneles solares, las descargas de las baterías debido a la carga y el control de las funcionalidades de la carga. Hay tres tipos de controladores de carga: controlador simple ON/OFF, el controlador modulado por ancho de pulso (PWM) y el controlador de seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT). La mayoría de

los controladores de carga operan en tres etapas para completar el ciclo de carga de las baterías, dichas etapas cambian según los tiempos y voltajes de la batería, estas son: la etapa bulk, la etapa de absorción y la de flotación. (Wong, 2014)

Este tipo de sistema tiene la ventaja de tener una autonomía energética, especialmente en zonas remotas o aisladas. Además, este tiene versatilidad ya que los paneles pueden venir en diversos tamaños y su instalación suele tener poca complicación.

Dentro de las desventajas de estos sistemas se encuentra el uso de la batería, la cual es susceptible a ser robada, tiene una vida útil corta y es un elemento contaminante. Además, se requiere un personal calificado para la instalación y debe tener un diseño correcto para evitar el vandalismo.

## **G. Casos del sistema de alumbrado público LED de energía solar**

### **1. Estudio en Malasia:**

La compañía especializada en diseño, instalación y mantenimiento de sistemas de energía solar “Compugates Sabah Sdn Bhd” instaló un total de 30 farolas independientes que utilizan módulos fotovoltaicos y la tecnología LED en Dewan Bandaraya Kota Kinabalu en Malasia, como parte de un proyecto con iniciativa verde, en el año 2014. La operación de las luminarias tiene un lapso de seis de la tarde hasta las seis de la mañana.

El hecho de combinar la tecnología LED con la energía solar permite que los módulos fotovoltaicos y las baterías tengan menores dimensiones, sin embargo, se establece que existen otras maneras de hacer más eficiente el sistema que con esto se reduce más el costo y el tamaño. Los estudios determinan que utilizando sensores y variando la iluminación de las luminarias LED tiene un impacto positivo en el análisis consumo energético y eficiencia. El proyecto fue puesto a prueba 10 días, en los cuales la intensidad de la luz de las luces LED variaba según el movimiento detectado por el sensor de movimiento, en donde cuando se detecte movimiento la intensidad es de cien por ciento y cuando no exista movimiento este será de setenta por ciento. (Wong, 2014)

Los proyectos existentes que utilizan luminarias LED con energía solar no son considerados como energética y económicamente eficientes. Esto se debe a que lo sistemas incrementa el costo de las instalaciones, principalmente por el módulo fotovoltaico y la batería. Asimismo, la estructura de la debe diseñarse con una mayor resistencia para poder soportar una mayor carga debido a el tamaño y el peso extra. Con la nueva iniciativa de utilizar sensores se puede llegar a reducir el tamaño de los sistemas de energía solar y minimizar las pérdidas de producción de energía y de la demanda de carga. (Wong, 2014)

Los componentes básicos del sistema de alumbrado público LED son los siguientes: panel solar, la luminaria LED, la batería recargable, el controlador y el poste. Para obtener una mejor eficiencia de la energía solar en el alumbrado público se utilizó sensores, tales como los ultrasónicos, los IR y los LDR. Estos detectan el movimiento de los humanos o cualquier otro objeto y en base a esto modifican la intensidad de la luminaria LED, esta es la razón lo la cual se crea un sistema más energéticamente eficiente. (Wong, 2014)

El diseño del sistema utiliza paneles solares de 180 W con baterías 8x6 V (10Ah), dicho sistema tiene una capacidad de durar 38.6 horas. En el análisis de 25 años de comparación del sistema, con los sistemas tradicionales de luminarias LED y las de vapor de mercurio se determinó que se tienen

un ahorro de 18.22 por ciento. A pesar de que el costo inicial es más elevado, al analizar el sistema a largo plazo se determina que este si reduce los costos generales y tiene una mejor relación entre la energía y el costo. (Wong, 2014)

## **2. Estudio en España:**

El estudio fue realizado para la municipalidad en Lazarote en España, con el objetivo de proponer una renovación del sistema de alumbrado público para 5000 personas que habitan en dicho lugar. Se analiza la opción de la canalización subterránea de la red eléctrica, la instalación de luminarias LED y la instalación de luminarias LED con energía solar. Globalmente el 21 por ciento de la producción de electricidad va directo al consumo de la luz, en donde el 18 por ciento es para el interior y el 3 por ciento es para el exterior. En un estudio de la Comisión Europea se establece que al utilizar sistemas de iluminación energéticamente eficientes se reduciría entre el 30 por ciento hasta el 50 por ciento de la electricidad. (Orejon et al., 2021)

Las primeras luminarias utilizando la tecnología de los módulos fotovoltaicos se presentaron en 1960 en donde el objetivo era presentar una solución para las zonas sin acceso a una red eléctrica. En los primeros modelos las luminarias utilizadas eran las fluorescentes, actualmente se utilizan las luminarias LED, esto debido a que provee un ahorro en la energía, es confiable, permite su control eléctrico, entre otras. (Orejon et al., 2021)

El nivel de iluminación requerido en cada sitio depende de una variedad de factores, tales como la intensidad del tráfico, la velocidad máxima y los sistemas de control de tráfico. La comisión Internacional de Iluminación (CIE) define que existen dos tipos de tipos de alumbrado público, para los vehículos, motocicletas, bicicletas y para vehículos tirados por animales y el segundo tipo es para peatones. (Orejon et al., 2021)

Para el estudio del proyecto de alumbrado público con módulos fotovoltaicos, en Haría de la provincia de Las Palmas en el norte de la isla de Lanzarote, Canarias, se utilizó el software DIALux para realizar un modelo de la respectiva simulación. Para hacer esto se tuvo en cuenta que era un espacio con áreas de protección, en donde se tienen observaciones astronómicas, parques nacionales, entre otros, por lo cual las carreteras no están iluminadas. Asimismo, se establece que la temperatura de las luminarias debe ser de 3000K. En dicho estudio se tienen un análisis 1875.24 € (Q 15,825.80). En dicho estudio se mide la relación de energía con la eficiencia por medio del indicador de la densidad de la potencia (PDI) y del consumo anual de energía (AECI), el primero hace referencia al consumo eléctrico del sistema para mantener una iluminación horizontal promedio por metro cuadrado y el segundo indica el consumo energético del alumbrado público durante el año, tomando en cuenta el rendimiento específico de la iluminación nocturna. (Orejon et al., 2021)

Dentro del análisis de la viabilidad del proyecto se tomó en cuenta la aceptación del proyecto por parte del público, en donde se realizaron encuestas por rangos de edad para obtener los resultados. Dentro de estos cabe resaltar que un 70 por ciento de la población está de acuerdo con realizar cambios en el alumbrado público, un 88 por ciento consideran que utilizar módulos fotovoltaicos es una opción viable para mejorar las instalaciones de alumbrado y un 17 por ciento establece que creen que es bastante problemático el hecho de tener problemas con las instalaciones al tener problemas con las condiciones ambientales. Con base en dichos resultados se puede observar que, si existe una parte de la población que aún no está de acuerdo con la modificación de los sistemas actuales, así como la implementación de los módulos fotovoltaicos dentro de estos. (Orejon et al., 2021)

Hoy en día las instalaciones de iluminación fotovoltaicas LED se posicionan como una tecnología eficiente y una buena opción económica para cubrir las necesidades de alumbrado público en los interiores de las ciudades. Esto debido al incremento de los costos de electricidad y los combustibles fósiles (Orejon et al., 2021)

## **H. Análisis de simulación lumínica**

### **1. Software Dialux:**

El programa DIALux es un software libre que permite visualizar la iluminación en una variedad de lugares, tales como escenas al aire libre, vivienda, edificios, carreteras, etc.

Se puede visualizar la distribución de la luz, calcular la luminancia y diseñar nuevas propuestas para los lugares previstos. Permite visualizar los niveles de iluminación de la luz directa e indirecta, donde toma en cuenta la absorción de la superficie de la luz dependiendo de sus características. Este se considera una herramienta para evaluar si los sistemas satisfacen los requerimientos de las normas de diseño de sistemas de alumbrado. Una de las ventajas de utilizar el programa es el hecho que este se basa en los resultados de las luminarias de los catálogos de luminarias electrónicas de los fabricantes de luminarias líderes del mundo, en donde las personas pueden visualizar como dicha luminaria se va a comportar en los lugares determinados. (DIALux, 2021)

Cualquiera que sea el proyecto que esté planteado, DIALux provee una variedad de características y funciones. Para los proyectos se puede planificar la luz para que esta se integre con la arquitectura, así como escenas individuales de exteriores como zonas verdes, caminos, estacionamiento o iluminación de carreteras. Además, se puede combinar escenas de luz artificial y de día. Una de las mayores ventajas de la utilización del programa es el hecho que permite planificar el proyecto tomando en cuenta los requisitos conforme a las normas actuales, además este provee información respecto a la distribución de la luz mediante gráficos de valor y colores falsos. (DIALux, 2021)

## **I. Normativas**

### **1. Colombia:**

La normativa RETILAP es un conjunto de reglas y lineamientos técnicos en donde se establecen los requisitos mínimos de iluminación que deben cumplir los sistemas de iluminación y alumbrado público. El objetivo principal de esta es garantizar la seguridad y eficiencia energética, asegurando que sean adecuados para el área donde se encuentren y las actividades que se estarán realizando.

#### **a. Vías vehiculares:**

Las principales características de la clasificación de las vías son la velocidad de circulación y el número de vehículos.

Clase de iluminación	Descripción vía	Velocidad de circulación (km/h)		Tránsito de vehículos T (Veh/h)	
		Extra alta	V>80	Muy importante	T>1000
M1	Autopistas y carreteras	Alta	60<V<80	Importante	500<T<1000
M2	Vías de acceso controlado y vías rápidas.	Media	30<V<60	Media	250<T<500
M3	Vías principales y ejes viales.	Reducida	V<30	Reducida	100<T<250
M4	Vías primarias o colectoras	Muy reducida	Al paso	Muy reducida	T<100
M5	Vías secundarias				

Figura 35. Clases de iluminación para vías vehiculares

(RETILAP, 2010)

Además, se debe tomar en cuenta la complejidad de la circulación, controles de tráfico, tipos de usuarios y existencia de separadores. Dependiendo de dichos factores una vía puede llegar a tener un alumbrado con clasificación inferior. Para poder tener dos clases iluminación en una vía se deben seguir las condiciones establecidas en la siguiente tabla:

Descripción de la vía	Tipo de iluminación
Vías de extra alta velocidad, con calzadas separadas exentas de cruces a nivel y con accesos completamente controlados (Autopistas expresas). Con densidad de tráfico y complejidad de circulación <sup>(1)</sup> :	
Alta T>1000(Veh./h)	M1
Media 500< T<1000 (Veh. /h)	M2
Baja T< 500 (Veh. /h)	M3
Vías de extra alta velocidad, vías con doble sentido de circulación. Con control de tráfico <sup>(2)</sup> y separación <sup>(3)</sup> de diferentes usuarios de la vía:	
Escaso	M1
Suficiente	M2
Vías más importantes de tráfico urbano, vías circunvalares y distribuidoras. Con control de tráfico y separación de diferentes usuarios de la vía:	
Escaso	M2
Bueno	M3
Conectores de vías de poca importancia, vías distribuidoras locales, vías de acceso a zonas residenciales, Vías de acceso a propiedades individuales y a otras vías conectoras más importantes. Con control de tráfico y separación de diferentes usuarios de la vía:	
Escaso	M4
Bueno	M5

Figura 36. Variación en las clases de iluminación por tipo de vía, complejidad de circulación y control del tráfico

(RETILAP, 2010)

Para la utilización de las tablas se tiene que tomar en cuenta la complejidad de la vía, la cual depende del número de carriles, inclinación, letreros, señales, entradas y salidas de rampas. Así como el control del tráfico, la separación, geometría de la vía y los diferentes tipos de usuarios de la vía. (RETILAP, 2010)

A cada clase de iluminación se le asignan valores fotométricos mínimos, los cuales se muestran en la siguiente tabla para luminancia, los valores son para piso seco.

Clase de iluminación	Zona de aplicación				
	Todas las vías			Vías sin o con pocas intersecciones	Vías con calzadas peatonales no iluminadas
	Luminancia promedio $L_{prom}$ (cd/m <sup>2</sup> ) Mínimo mantenido	Factor de uniformidad $U_o$ Mínimo	Incremento de umbral TI % Máximo inicial	Factor de uniformidad longitudinal de luminancia $U_l$ Mínimo	Relación de alrededores SR Mínimo
M1	2,0	0,4	10	0,5	0,5
M2	1,5	0,4	10	0,5	0,5
M3	1,2	0,4	10	0,5	0,5
M4	0,8	0,4	15	N.R	N.R
M5	0,6	0,4	15	N.R	N.R

Figura 37. Requisitos fotométricos mantenidos por clase de iluminación para tráfico motorizado con base en la luminancia de la calzada

(RETILAP, 2010)

En esta tabla  $L_{prom}$  es la luminancia promedio mantenida,  $U_o$  es la uniformidad general,  $U_l$  es la uniformidad longitudinal, TI es la restricción de deslumbramiento,  $E_{prom}$  es la iluminancia promedio y NR es no requerido. (RETILAP, 2010)

En los alumbrados públicos existentes que utilicen una infraestructura de red eléctrica de uso general y se busque realizarle cambios o modificaciones para cumplir con los niveles de iluminación exigido en el reglamento se debe modificar la potencia de la fuente, la luminaria, la forma y/o la longitud de brazo. (RETILAP, 2010)

Los niveles exigidos de luminancia e iluminancia en alumbrado público se muestran A continuación:

Tipo de vía	Calzadas vehiculares				Ciclo-rutas adyacentes		Relación de alrededores		
	$L_{prom}$ cd/m <sup>2</sup>	$U_o$ ≥ %	$U_l$ ≥ %	TI ≤ %	$E_{prom}$ luxes	$U_o$ ≥ %	$E_{prom}$ luxes	$U_o$ ≥ %	Alrededor sin andenes SR %
M1	2,0	40	50	10	20	40	13	33	50
M2	1,5	40	50	10	20	40	10	33	50
M3	1,2	40	50	10	15	40	9	33	50
M4	0,8	40	N.R.	15	10	40	6	33	N.R.
M5	0,6	40	N.R.	15	7.5	40	5	33	N.R.

Figura 38. Requisitos mínimos de iluminación para vías con ciclorutas y andenes adyacentes

(RETILAP, 2010)

Se pueden hacer diseños con base en la siguiente tabla:

Clase de iluminación	Valor promedio (mínimo mantenido) de iluminancia según tipo de superficie de la vía [Luxes]			Uniformidad de la Iluminancia
	R1	R2 y R3	R4	$E_{min} / E_{prom}$ (%)
M3	12	17	15	34%
M4	8	12	10	25%
M5	6	9	8	18%

Figura 39. Valores mínimos mantenidos de iluminancias promedios (Ix) en vías motorizadas

(RETILAP, 2010)

**b. Vías para tráfico peatonal y ciclistas:**

La iluminación debe permitir que se pueda observar la textura del pavimento, escalones, marcas, señales y los bordillos. La clase de iluminación puede variar dependiendo de la criminalidad o la necesidad de identificar personas u obstáculos. (RETILAP, 2010)

DESCRIPCIÓN DE LA CALZADA	CLASE DE ILUMINACIÓN
Vías de muy elevado prestigio urbano	P1
Utilización nocturna intensa por peatones y ciclistas	P2
Utilización nocturna moderada por peatones y ciclistas	P3
Utilización nocturna baja por peatones y ciclistas, únicamente asociada a las propiedades adyacentes	P4
Utilización nocturna baja por peatones y ciclistas, únicamente asociada a las propiedades adyacentes. <i>Importante preservar el carácter arquitectónico del ambiente.</i>	P5
Utilización nocturna muy baja por peatones y ciclistas, únicamente asociada a las propiedades adyacentes. <i>Importante preservar el carácter arquitectónico del ambiente</i>	P6
Vías en donde únicamente se requiere una guía visual suministrada por la luz directa de las luminarias	P7

Figura 40. Clases de iluminación para diferentes tipos de vías en áreas peatonales y de ciclistas

(RETILAP, 2010)

Los requisitos de iluminación para las vías peatonales y de ciclistas son las siguientes:

Clase de iluminación	Iluminancia Horizontal (luxes)	
	Valor promedio	Valor mínimo
P1	20,0	7,5
P2	10,0	3,0
P3	7,5	1,5
P4	5,0	1,0
P5	3,0	0,6
P6	1,5	0,2
P7	No aplica	No aplica

Figura 41. Requisitos mínimos de iluminación para tráfico peatonal

(RETILAP, 2010)

**c. Requisitos de iluminación para áreas críticas:**

Se tiene la clase de alumbrado C, esta se utiliza para áreas conflictivas, como interacciones, enlaces de carreteras, curvas pronunciadas, incorporación de nuevos carriles, etc. Los requisitos fotométricos para dichas áreas se muestran a continuación,:

Clase de iluminación	Iluminancia Mínima Mantenido (luxes) (Sobre toda la superficie)	Uniformidad general $U_o \geq$ (%)
C0	50	40
C1	30	40
C2	20	40
C3	15	40
C4	10	40
C5	7.5	40

Figura 42. Requisitos fotométricos para áreas críticas

(RETILAP, 2010)

Para las áreas críticas que pertenezcan a vías vehiculares se debe utilizar la siguiente tabla:

Área crítica	Clase de iluminación del área crítica (C) según clase de la vía a la que pertenece (M)
Pasos subterráneos	C(N) = M(N)
Intersecciones, cruces, rampas, puentes, entradas a divergencias o convergencias, áreas con ancho de carriles restringidos	C(N) si M(N)
Cruces ferroviarios	C(N) si M(N)
	C(N-1) si M(N)
Glorietas sin señalización	C1
	C2
	C3
Área vehicular en fila de espera (p.e. Aeropuertos, terminales de transporte, entre otros)	C1
	C3
	C5
TÚNELES	seguir recomendaciones de la norma CIE 88

Figura 43. Clases de iluminación en áreas críticas de vías vehiculares

(RETILAP, 2010)

Los niveles exigidos de luminancia e iluminancia para dichas áreas se presentan A continuación:

Clasificación	Clase de iluminación	Iluminancia promedio (luxes)	Uniformidad general $U_o \geq$ %
Canchas múltiples recreativas	C0	50	40
Plazas y plazoletas	C1	30	33
Pasos peatonales subterráneos	C1	30	33
Puentes peatonales	C2	20	33
Zonas peatonales bajas y alledaños a puentes peatonales y vehiculares	C2	20	33
Andenes, senderos, paseos y alamedas peatonales en parques	C3	15	33
Ciclo-rutas en parques	C2	20	40
Ciclo-rutas, senderos, paseos, alamedas y demás áreas peatonales adyacentes a rondas de ríos, quebradas, humedales, canales y demás áreas distantes de vías vehiculares iluminadas u otro tipo de áreas iluminadas	C4	10	40

Figura 44. Fotometría mínima en áreas críticas distintas a vías vehiculares

(RETILAP, 2010)

## 2. IESNA:

El acrónimo IESNA es de la Sociedad de Ingenieros de iluminación de Norteamérica. Esta es

un conjunto de recomendaciones y guías para el diseño, evaluación y aplicación de sistemas de iluminación para interiores y exteriores. Tiene como fin buscar que la iluminación proporcionada sea la adecuada para las necesidades de la persona, tomando en cuenta el consumo energético y la emisión de contaminación lumínica. La versión con la que se trabajó es la del 2000, la cual es la novena edición.

Dichas normas cubren una gran cantidad de temas, en donde se incluye la medición de luz, la evaluación de la calidad visual, la distancia entre postes recomendada, selección de equipos y planificación de proyectos de iluminación. Estas son ampliamente conocidas y utilizadas por profesionales.

**a. Clasificación de calzadas:**

- Autopista: Carretera principal dividida para tráfico de paso con control parcial de acceso y generalmente con intercambios en la encrucijada principal. Las vías rápidas para el tráfico no comercial dentro de las áreas del parque se conocen generalmente como vías verdes.
- Calzada importante: Parte del sistema vial que sirve como red principal para el flujo de tránsito. Las rutas conectan áreas de tráfico principal y caminos rurales que entran a la ciudad.
- Colectora: Se utiliza entre las calzadas importantes y las locales, principalmente para movimientos de tráfico dentro de áreas residenciales, comerciales e industriales.
- Locales: Utilizadas principalmente para el acceso directo a propiedades residenciales, comerciales, industriales u otras colindantes. Estas no incluyen carreteras que transportan tráfico.
- Carreteras locales largas: Están divididas en secciones cortas por un sistema de caminos colectores.
- Callejón: Vías públicas angostas dentro de un bloque, usualmente usadas para el acceso vehicular a la parte trasera de las propiedades colindantes.
- Aceras: Áreas pavimentadas para uso peatonal.
- Zona peatonal: Un paseo público para el tránsito de peatones. No se incluye dentro del derecho de paso para el tránsito vehicular de la calzada. Dentro de estas están las pasarelas elevadas, pasarelas secundarias y las que dan acceso a parques o interiores de manzanas.
- Intercambio aislado: Cruce de caminos a desnivel que no es parte de un sistema de iluminación continuo, con una o más conexiones de rampa con el cruce.
- Intersección aislada: Área donde dos o más caminos iluminados discontinuamente se unen o cruzan al mismo nivel.
- Carril de bicicletas: Cualquier camino o calle que este destinado para el viaje en bicicleta. Dentro de esta categoría se encuentra el tipo A, este es el carril de bicicleta, la cual es una parte de la calzada que se designa para el uso de bicicleta. El tipo B es una ciclovía, puede ser un sendero o camino separado de los donde los vehículos de motor están prohibidos y este se comparte con los peatones.

Además, existe una clasificación según su uso, dentro de este se encuentra el comercial, intermedio y residencial.

**b. Diseño de iluminación:**

El sistema de iluminación de una carretera se debe acomodar a las necesidades visuales del tráfico nocturno. A continuación, se muestran los requerimientos establecidos por la norma:

(a) Maintained Luminance Values ( $L_{avg}$ ) in Candelas per Square Meter*				
Road and Area Classification	Average Luminance $L_{avg}$	Luminance Uniformity		Veiling Luminance Ratio (maximum) $L_v$ to $L_{avg}$
		$L_{avg}$ to $L_{min}$	$L_{max}$ to $L_{min}$	
Freeway Class A	0.6	3.5 to 1	6 to 1	0.3 to 1
Freeway Class B	0.4	3.5 to 1	6 to 1	0.3 to 1
Expressway	Commercial	1.0	3 to 1	5 to 1
	Intermediate	0.8	3 to 1	5 to 1
	Residential	0.6	3.5 to 1	6 to 1
Major	Commercial	1.2	3 to 1	5 to 1
	Intermediate	0.9	3 to 1	5 to 1
	Residential	0.6	3.5 to 1	6 to 1
Collector	Commercial	0.8	3 to 1	5 to 1
	Intermediate	0.6	3.5 to 1	6 to 1
	Residential	0.4	4 to 1	8 to 1
Local	Commercial	0.6	6 to 1	10 to 1
	Intermediate	0.5	6 to 1	10 to 1
	Residential	0.3	6 to 1	10 to 1

(b) Average Maintained Illuminance Values ( $E_{avg}$ ) in Lux†				
Road and Area Classification	R1	Pavement Classification		Illuminance Uniformity Ratio $E_{avg}$ to $E_{min}$
		R2 and R3	R4	
Freeway Class A	6	9	8	3 to 1
Freeway Class B	4	6	5	
Expressway	Commercial	10	14	13
	Intermediate	8	12	10
	Residential	6	9	8
Major	Commercial	12	17	15
	Intermediate	9	13	11
	Residential	6	9	8
Collector	Commercial	8	12	10
	Intermediate	6	9	8
	Residential	4	6	5
Local	Commercial	6	9	8
	Intermediate	5	7	6
	Residential	3	4	4

Figura 45. Valores recomendados de luminancia e iluminancia para carreteras

(Illuminating Engineering Society of North America, 2021)

Walkway and Bikeway Classification	Minimum Average Horizontal Levels ( $E_{avg}$ )	Average Vertical Levels For Special Pedestrian Security ( $E_{avg}$ )‡
Sidewalks (roadside) and Type A bikeways:		
Commercial areas	10	22
Intermediate areas	6	11
Residential areas	2	5
Walkways distant from roadways and Type B bikeways:		
Walkways, bikeways, and stairways	5	5
Pedestrian tunnels	43	54

\* Crosswalks traversing roadways in the middle of long blocks and at street intersections should be provided with additional illumination.  
† For approximate values in footcandles, multiply by 0.1.  
‡ For pedestrian identification at a distance. Values at 1.8 meters (6 feet) above walkway.

Figura 46. Valores recomendados de iluminancia para vías de peatones

(Illuminating Engineering Society of North America, 2021)

**3. ESPAÑA:**

Para el diseño en Dialux se utiliza la norma EN 13201-1:2015, la cual establece los requisitos de

iluminación para carreteras y túneles. En esta se definen los criterios para la evaluación y diseño de los sistemas de iluminación. La normativa se aplica para toda carretera pública o privada, incluidas autopistas, carreteras urbanas y rurales, entre otras.

La norma EN 130201 publicada en el 2015 consta de 5 secciones. La primera es la definición de las clases de iluminación para alumbrado, la segunda establece los requisitos de prestaciones, la tercera el cálculo de prestaciones, la cuarta define los métodos de media de las prestaciones de iluminación y la quinta es la valoración energética del sistema.

Dentro de esta norma la clase de alumbrado público M se define para clase de vías urbanas o no, que tienen tráfico motorizado dominante y se puede calcular los valores de luminancia. La clase C es para áreas de conflicto donde no es posible calcular los valores de luminancia. La clase P+ HS es para áreas con uso peatonal y ciclista, vías residenciales, zonas adyacentes a la calzada. Y la clase SC+ EV se refiere a las clases adicionales donde hay iluminancias semicilíndricas o verticales, o donde se requiere un reconocimiento facial.

A continuación, se muestran los requisitos para las diferentes calzadas:

Clase	Luminancia de la calzada en condiciones secas			Deslumbraamiento perturbador TI	Relación de entorno
	$L_{av}$ [cd/P2]	$U_o$ ( $U_{ov}$ )	$U_i$	$f_{ti}$ [%]	EIR
M1	2,00	0.40 (0,15)	0.70	10	0,35
M2	1.50	0.40 (0,15)	0.70	10	0,35
M3	1,00	0.40 (0,15)	0.60	15	0,30
M4	0.75	0.40 (0,15)	0.60	15	0,30
M5	0.50	0.35 (0,15)	0.40	15	0,30
M6	0.30	0.35 (0,15)	0.40	20	0,30

Figura 47. Requisitos para las calzadas tipo M

(European Committee for Standardization, 2015)

Clase	Iluminancia de la calzada en condiciones secas		TI
	$E_{av}$ [lx]	$U_o$	
C0	50	0.4	15
C1	30	0.4	15
C2	20	0.4	15
C3	15	0.4	20
C4	10	0.4	20
C5	7.5	0.4	20

Figura 48. Requisitos para las calzadas tipo C

(European Committee for Standardization, 2015)

Clase	Iluminancia horizontal		Requisitos suplementarios		
	Iluminancia horizontal	Iluminancia horizontal mínima	Iluminancia vertical mínima	Iluminancia semicilíndrica mínima	TI
	$E_{h\text{ av}}$ [lx]	$E_{\text{min}}$ [lx]	$E_{v\text{ min}}$ [lx]	$E_{sc\text{ min}}$ [lx]	
P1	15,0	3,00	5,0	5,0	20
P2	10,0	2,00	3,0	2,0	25
P3	7,50	1,50	2,5	1,5	25
P4	5,00	1,00	1,5	1,0	30
P5	3,00	0,60	1,0	0,6	30
P6	2,00	0,40	0,6	0,2	35

Figura 49. Requisitos para las calzadas tipo P

(European Committee for Standardization, 2015)

Clase	Iluminancia semiesférica	
	Iluminancia semiesférica	Uniformidad global
	$E_{h\text{ av}}$ [lx]	$U_0$
HS1	5,00	0,15
HS2	2,50	0,15
HS3	1,00	0,15
HS4		

Figura 50. Requisitos para las calzadas tipo HS

(European Committee for Standardization, 2015)

#### 4. Guatemala:

Actualmente Guatemala no cuenta con normativas propias respecto al alumbrado público. El único documento que establece las regulaciones respecto a la iluminación es el acuerdo gubernativo número 229-2014, el cual establece los siguientes puntos:

- Los lugares de tránsito deben tener iluminación natural, artificial o mixta, la cual debe ser apropiada para las operaciones que se realicen
- En zonas donde la iluminación natural no sea suficiente y en donde se proyecten muchas sombras se debe emplear iluminación artificial
- Los contrastes de luz y sombras se deben evitar para poder observar los objetos
- Para evitar deslumbramientos no se debe utilizar lámparas sin pantallas difusoras a menos de 5 m, no usar fuentes de luz en mal estado, la iluminación artificial debe tener garantías de seguridad y no debe ser inferior a 30° el ángulo formado por el rayo de la lámpara descubierta con la horizontal del ojo.

En dicho artículo se presenta una tabla con los niveles mínimos de iluminación para lugares de trabajo, sin embargo, no incluye información respecto al alumbrado público.

Zona de Trabajo	Exigencia visual	Nivel mínimo de Luxes en las áreas de trabajo
<b>FÁBRICAS</b>		
Áreas de tránsito y Pasillos	Baja	100-150
Tanques y Bombas	Baja	100-150
Baños	Baja	100-150
Escaleras y Pasamanos	Media	150-200
Sala de Calderas y Cuartos de Control	Media	150-200
Bandas transportadoras	Media	150-200
Bodegas de Almacenaje y Centros de distribución	Alta	200-500
Bancos de trabajo y Líneas de Producción	Alta	200-500
Empaques de Productos	Alta	200-500
Áreas de Carga	Alta	200-500
Control de Calidad	Alta	500-1000
Laboratorios	Alta	500-1000
<b>OFICINAS</b>		
Escaleras y Pasillos	Baja	100-150
Baños	Baja	100-150
Recepción y Sala de Reuniones	Media	200-500
Bodegas de Materiales	Media	200-500
Trabajo de Oficinas	Alta	500-1000
Redacción	Alta	1,500-2,000
Archivo	Alta	1,500-2,000
<b>BODEGAS Y TALLERES</b>		
Baños	Baja	100-150
Bodegas de Almacenaje y Centros de distribución	Alta	200-500
Trabajo, Inspección y selección de producto	Alta	1,500-2,000
Trabajo mecánico o manual	Alta	1,500-2,000
<b>COMERCIOS</b>		
Pasillos	Baja	100-150
Recepción	Baja	100-150
Baños	Baja	100-150
Elevadores y gradas eléctricas	Media	200-500
Restaurantes y Cocinas	Alta	1,500-2,000
Vitrinas	Alta	1,500-2,000
<b>HOSPITALES</b>		
Baños	Baja	100-150
Sala de Espera y Corredores	Media	200-500
Laboratorios	Alta	500-1000
Cuarto de Examinación	Alta	1,500-2,000
Quirófano y Sala de Operaciones	Alta	1,000-3,000

Quando se indican valores de nivel de intensidad luminica es mejor establecer rangos de valor minimo y máximo, puesto que, tanto el déficit como el exceso tienen efectos perjudiciales en la vista de los usuarios.\*

Figura 51. Niveles mínimos de iluminación de los lugares de trabajo (CNEE, 2018)

Para el proceso de creación o modificación de un alumbrado público las municipalidades realizan un análisis del sitio para crear una propuesta de diseño de alumbrado público, este no puede ser implementado hasta que este sea aprobado por la empresa EEGSA . Esta recoge los diseños y determinan los cambios que deben realizarse para que la iluminación cumpla con los requisitos de la población. A continuación, se muestran los puntos más relevantes del manual:

- Para la elección de luminarias se establece una lista de la cual las municipalidades pueden elegir, estas son determinadas en base a la experiencia que han tenido en el tiempo con diferentes tipos y marcas. Dentro de estas se establecen las luminarias de alta presión de sodio de 100 watts, 250 walts y 400 watts, con balastro tipo reactor con alto factor de potencia y con una fotocelda. Se utilizan lámparas homologadas debido a que a pesar de que su costo inicial es mayor, estas requieren una menor cantidad de mantenimiento a lo largo de su vida útil.
- La distancia entre postes es de 35 metros promedio, 40 metros normalizado y 60 metros como máximo.
- Para las lámparas de sodio de alta presión las alturas recomendadas dependen de la potencia, para luminarias de 100 watts se tiene de 5 a 7 metros, para las de 250 watts se tiene de 7 a 10 metros y para las de 400 watts se tiene una altura de 12 a 15 metros.
- En países como México y Latinoamérica los refractores más comunes son tipo II y tipo III

que permiten cubrir el ancho de la calle y la distancia interpostal. Esta proporciona una distribución fotométrica elíptica, la cual se adapta de mejor manera a la calle.

- Los niveles de iluminación para luminarias homologadas para las de 100 watts es de 8500 lm, las de 250 watts 23,000 lm y para las de 400 watts 42,000 lm.
- Para la celda de fotocontrol, la cual es capaz de cortar el paso de la energía eléctrica, se establece que debe estar orientada al norte.
- Las líneas de alimentación de la luminaria tienen que estar conectadas al balastro en la derivación de 240 voltios.

## VI. METODOLOGÍA

Para el comienzo del trabajo se determinaron los objetivos y los factores a evaluar. Se realizó una investigación en relación con el tema, para de esta manera determinar los conceptos básicos y comprender como funciona la visión, así como el sistema de alumbrado público. Se indagó respecto a los factores que influyen en la comodidad del conductor y la iluminación en la superficie.

### A. Estudio del sitio

Para establecer el sitio a evaluar se habló con la municipalidad, se determinaron una variedad de áreas que aún no habían sido evaluadas y que fueran de importancia para los ciudadanos. Para la elección también se tomó en cuenta el flujo vehicular, en donde las mediciones no afectaran el tráfico de gran manera y que fuera seguro realizarlas.

El sitio elegido fue el sector gastronómico de la zona 9 de Guatemala, este abarca desde la 2A avenida hasta la 5A avenida y de la 8A calle a la 12A calle. Dentro de este sector se encuentra una serie de restaurantes, tales como: Don Joselito Steakhouse, Entre Brasas, Restaurante MUU, El Pirata, entre otros. La zona 9 tiene relevancia ya que esta conecta las zonas más importantes del centro de la metrópoli y se eligió el sector gastronómico debido a que al tener una variedad de restaurantes hay un mayor flujo de peatones y vehículos, por lo cual la iluminación debe ser adecuada para proveer confort y seguridad a las personas.

Para el análisis del sitio se eligió evaluar el tramo recto de la 10A calle y la 2A avenida, en donde el tráfico no suele ser tan pesado. Además, esta tiene un tramo recto con doble vía y otro tramo recto con una sola vía. Dentro del área se analizó una intersección y un tramo recto, como representación de los puntos críticos dentro de toda el área. Para esto se requirió medir la iluminación de 4 luminarias.

Dentro de las características de la calzada se encuentran los siguientes puntos:

- La calzada analizada tiene un límite de velocidad entre 30 y 60 km/h.
- El pavimento se considera como R3 donde el asfalto tiene agregados de color oscuro.
- El ancho de la calzada varía dependiendo la vía que se esté analizando, al igual que las aceras.

### B. Mediciones

Para las mediciones se realizó una sesión con la municipalidad y se buscó información en la empresa IMPELSA, en base a las recomendaciones se decidió realizar una retícula de 3x3 m, y en los puntos donde se intersecan las líneas son los puntos de medición.

Previo a ir a campo a realizar las mediciones se pidieron los planos del área a la municipalidad. En base a estos se colocaron los puntos que se iban analizar y se creó una tabla.

A continuación se muestra un ejemplo de la retícula utilizada para las mediciones:

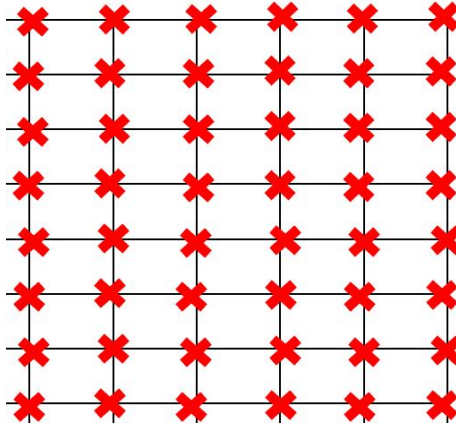


Figura 52. Ejemplo de retícula

Por seguridad de las personas se logró conseguir ayuda de la PMT (Policía municipal de tránsito) y se utilizaron chalecos reflectantes y conos.

Como primer paso se midieron las distancias para verificar que estas coincidieran con los planos proveídos, para esto se midieron las alturas de los postes, la distancia interpostal y el ancho de las calles y la mediana.

Las mediciones se realizaron por la noche, alrededor de las 7:00 pm, porque a esta hora el alumbrado está en funcionamiento y la luz natural del Sol ya no afecta las mediciones. El primer paso para medir la iluminación fue marcar una retícula de 3x3m en el asfalto con ayuda de un metro, colocando una marca con pintura en cada punto. Una vez marcados los puntos, se colocaba el luxómetro a nivel del suelo y se estabilizaba para asegurarse de que el instrumento no se moviera y no hubiera sombras de elementos externos o del operador. Cada vez que se tomaba una medida, se registraba en una tabla previamente preparada y esta se iba llenando a medida que se obtenían los datos.

### C. Análisis de mediciones

En los planos de AutoCad se colocaron los valores de iluminación que se obtuvieron de las mediciones de campo, en base a esto se procedió a realizar las curvas de iluminación. Para esto se realizaron las divisiones respectivas entre cada valor y se unieron los puntos que coincidían con el mismo valor. Se obtuvieron los valores de iluminancia medios, máximos y mínimos.

Para poder determinar si el sistema está funcionando correctamente se recreó el sistema actual en el software Dialux. Se compararon los resultados en ambos casos y se determinó que diferencias se tenían dentro de estos.

Por otro lado, se analizó el modelo del sistema actual en base a las normativas internacionales mencionadas en el marco teórico. Esto para determinar qué aspectos cumplen o no cumplen con los requisitos.

#### **D. Análisis de propuesta**

Para el análisis de la propuesta se consultaron las normativas internacionales, como IESNA y RETILAP, Además, se consultó el manual técnico de EEGSA (Empresa Electrica de Guatemala, S,A.) y la normativa española. Con base en estas se determinó la iluminación mínima requerida para crear un ambiente adecuado para los vehículos y peatones. Como primer punto se comparó el sistema actual con las normativas, para de esta manera determinar si cumple con los niveles mínimos.

Para poder proponer un nuevo sistema, se modelaron los puntos analizados en el campo en el software Dialux. Dentro de este se colocaron las carreteras, banquetas, medianas y las paredes que rodean los tramos.

Para la elección de la luminaria se buscaron en catálogos las luminarias que cumplieran con los requisitos y proveyeran un ambiente seguro y confortable a los conductores, en donde también se tuvo en cuenta que fueran LED para reducir el consumo eléctrico y ayudar a que estas no contribuyeran a la contaminación lumínica. Además, se consultó con la municipalidad para determinar las tecnologías que se utilizan actualmente.

#### **E. Análisis económico entre tecnologías**

Para poder comparar el sistema actual de alumbrado público, con el sistema propuesto en Dialux es necesario comparar los costos de ambas tecnologías. Para esto se realizó un análisis económico entre ambas, donde se identifique cuál es más rentable, eficiente y segura para el conductor.

## VII. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Para el análisis de la propuesta y del sistema se analizó el sitio para que cumpliera con las normativas, en donde se evalúa la luminancia, iluminancia, uniformidad total y longitudinales, entre otros factores. Los parámetros se describen a continuación:

- **RETILAP:**

Para la evaluación del sistema se utilizaron la normativa Colombiana RETILAP".

Los tramos analizados para el proyecto son vías principales, las cuales se encuentran en la clasificación M3 según la norma colombiana (RETILAP). Para este tipo de vías se tiene establecido una luminancia promedio de 1.2 cd/m<sup>2</sup>, un factor de uniformidad general de 40 %, un incremento de umbral de 10 % . para la iluminancia promedio para los andenes se tiene establecido 9 luxes con una uniformidad de 33 %.

El pavimento es R3, por esto se tiene un valor promedio de iluminancia de 17 luxes y una uniformidad de iluminancia de 34 %. Para los cruces se requiere de una mayor iluminación, en este caso debido a que es una M3 se convierte a una C3, que es para intersecciones y cruces. La iluminancia mínima mantenida debe ser de 15 luxes con una uniformidad general de 40 %.

Para el análisis del sistema se tuvo en cuenta el tránsito de peatones, donde se evaluó que las banquetas cumplieran con las normativas. Se tomaron como la categoría P2, debido a que se establece que tiene una utilización nocturna intensa por peatones y ciclistas. Se realizó dicha elección ya que uno de los objetivos de la propuesta de iluminación es proveer una calle segura para las personas en el sector gastronómico, para así atraer a una mayor clientela y que esta se sienta segura y cómoda al estar en dichas calles. Para este caso según la norma de RETILAP se requiere un valor promedio de 10 luxes y un valor mínimo de 3 luxes.

- **ES-13201:**

Según la normativa española la vía se clasifica como una M3, como en la normativa Colombiana. En esta la luminancia media es de 1 cd/m<sup>2</sup>, una uniformidad total de 0.4 y una uniformidad longitudinal de 0.6. Un deslumbramiento perturbador de 15 % y una relación de entorno o el incremento de umbral de 0.30.

Para las áreas de peatones se considera como P2 en donde se requiere una iluminancia horizontal de 10 luxes y una mínima de 2 lx. Se tiene una iluminancia vertical mínima de 3.

- **IESNA:**

Se le considera como una calzada principal de uso intermedio, en donde hay flujo vehicular y peatonal debido a la cantidad de comercios y residencias en dicha área. Para esta se tiene una luminancia promedio de 0.9 cd/m<sup>2</sup> una uniformidad de luminancia media a luminancia mínima de 3 a 1 y de luminancia máxima e luminancia mínima es de 5 a 1. Los valores de iluminancia para el pavimento R3 se requiere 17 luxes y una uniformidad de iluminancia media a iluminancia mínima de 3 a 1.

Para las aceras al lado de la carretera, tipo A de bicicletas y de un uso intermedio se requiere una iluminancia de 6 luxes.

## A. Sistema actual

Para poder realizar un análisis completo se evaluó las características del sistema que actualmente se encuentra en el sector gastronómico de la zona 9 de la ciudad de Guatemala, Este cuenta con 162 luminarias, dentro de las cuales todas son del tipo de sodio de alta presión de 250 watts. El sector evaluado fue la segunda avenida y la décima calle, como se muestra a continuación:

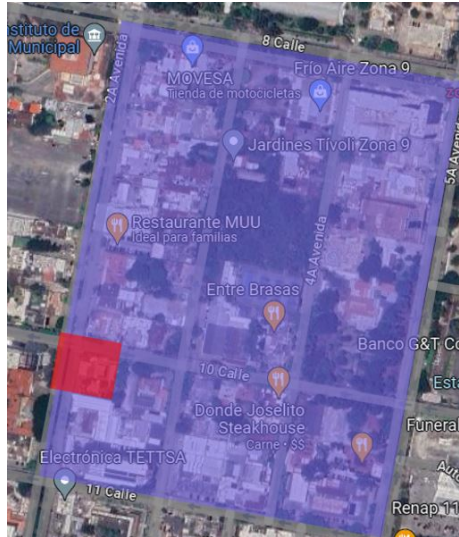


Figura 53. Área analizada

Para poder realizar un análisis del sistema actual del alumbrado público se requirieron tomar medidas de las luminarias actuales, para esto se tomaron las medidas en la rejilla de 3x3m realizada en el asfalto de la carretera. En cada punto de la rejilla se coloca el número de luxes y se crean las isolíneas, como se muestra a continuación:

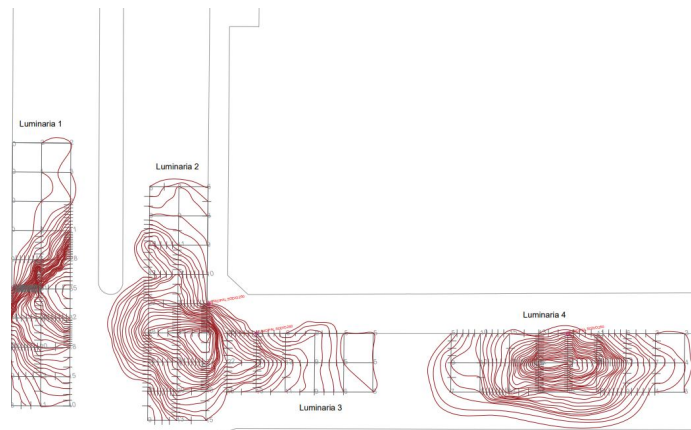


Figura 54. Resultados de las isolíneas de la 10a calle 2av de zona 9 de la Ciudad de Guatemala

Los resultados muestran como la iluminancia se distribuye en el asfalto, se puede observar cómo los valores que tienen el mismo valor están unidos por la misma curva. En la luminaria 1 una parte de la rejilla no contiene datos, esto se debe a la presencia de un árbol que cubre cierta parte de la lámpara.

Se pudo observar que las isolíneas de iluminación en cada luminaria tenían variaciones, esto se debe a que algunas han sido remplazadas recientemente por mal funcionamiento o vandalismo. Además, otro factor que influye es la distancia a la cual se encuentran los postes y el ancho de la carretera, en donde, cuando la distancia es menor en ambos casos la iluminancia es mayor, teniendo así una relación inversamente proporcional.

Valor/Luminaria	1	2	3	4
Media (lx)	10.47	15.81	10.39	11.93
Min(lx)	0	6	5	3
Máx(lx)	35	35	22	32
Min/ medio	0	0.38	0.48	0.25
Min/ máximo	0	0.17	0.23	0.094

Cuadro 1  
*Valores de iluminancia de las mediciones in situ de alumbrado público*

El modelo en Dialux se creó con el objetivo de evaluar el rendimiento del sistema actual del alumbrado público en condiciones ideales y controladas. El propósito era simular las condiciones óptimas en las que las luminarias deberían operar, para luego tener una base de comparación de los resultados con el rendimiento real en la vida. Este enfoque se debe a que hay una variedad de factores que pueden afectar el rendimiento de las luces de manera impredecible.

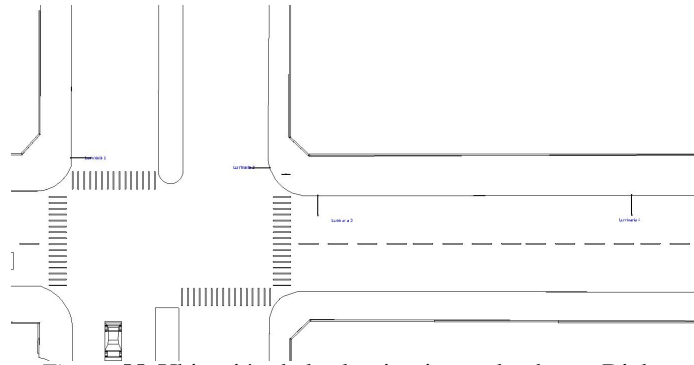
Para este se tomaron en cuenta los siguientes aspectos:

- La colocación de las luminarias, estas deben estar en los mismos puntos que los medidos en campo. Deben tener las mismas distancias entre postes y alturas de estos.
- Las superficies de los alrededores, donde se incluye los edificios y muros perimetrales. Para esto se tomó en cuenta la pintura con la cual estaban pintadas, los materiales utilizados y las alturas de los muros y edificios.
- Se tiene que tomar en cuenta el ancho de los carriles y de las aceras
- En las luminarias de sodio se tiene que buscar que bombillas se utilizaron para modificar el flujo luminoso, vida útil, CRI y la temperatura de color.

La comparación entre el rendimiento real y el esperado en el modelo revela las diferencias y ayuda a determinar los posibles problemas en el sistema de alumbrado público. Esto facilita la toma de decisiones para mejoras o ajustes necesarios para optimizar el funcionamiento del sistema en la vida real.

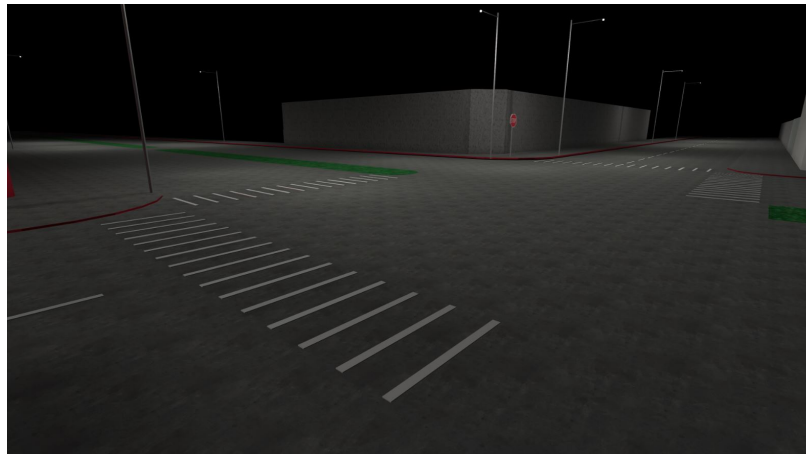
Las bombillas utilizadas en el modelo son de sodio de alta presión con un flujo luminoso útil de 19,000 lm, un promedio de vida de 24,000 hrs, una temperatura de color de 2800 °k y un CRI de 21.

Para el modelado del sistema actual se obtuvieron los planos de parte de la municipalidad, dentro de estos se observó que las distancias entre los postes no era la misma para todos los tramos. A continuación, se muestra el plano en Dialux con la posición de las luminarias en el área evaluada.

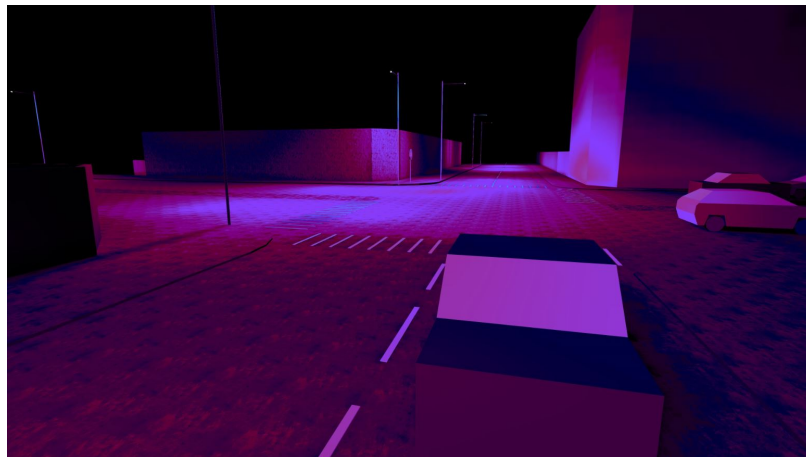


*Figura 55.* Ubicación de las luminarias evaluadas en Dialux

La iluminación de la simulación del sistema actual se observa de la siguiente manera:



*Figura 56.* Simulación de la iluminación en el sistema actual



*Figura 57.* Resultados de la luminancia del sistema actual

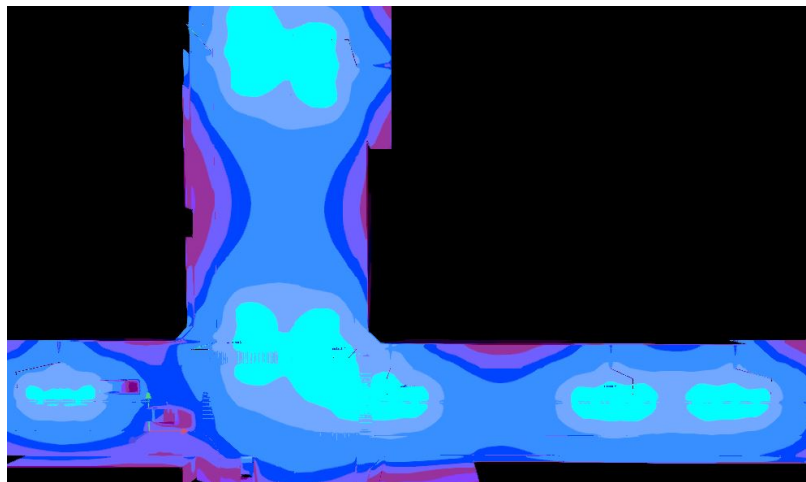


Figura 58. Resultados de iluminancia del sistema actual

Dentro del modelo de Dialux del sistema actual, con luminarias de sodio, se obtienen los siguientes resultados:

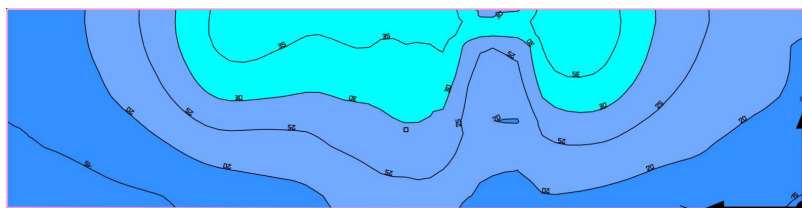


Figura 59. Resultados de las isólineas de la luminaria 1

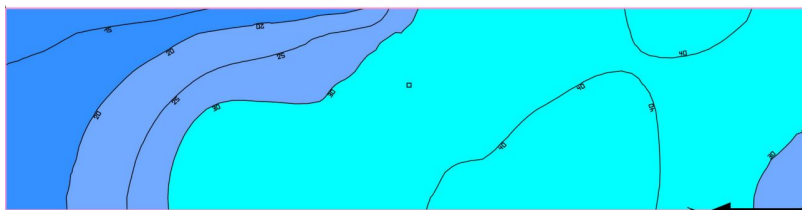


Figura 60. Resultados de las isólineas de la luminaria 2

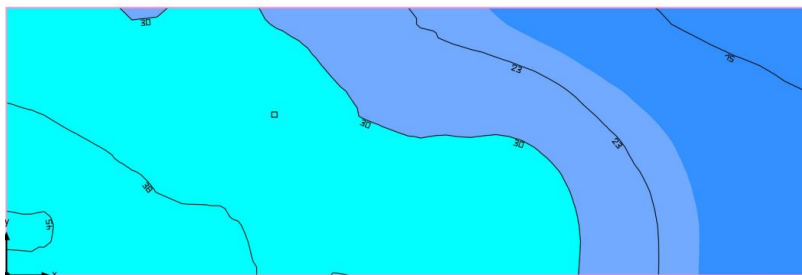


Figura 61. Resultados de las isólineas de la luminaria 3

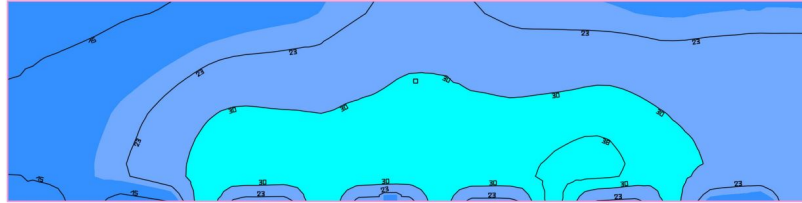


Figura 62. Resultados de las isólinas de la luminaria 4

Dentro de los resultados en Dialux se tienen los siguientes datos:

Iluminancia/Luminaria	1	2	3	4
Media (lx)	24.4	31.9	29.1	25.9
Min(lx)	11.0	12.0	11.9	10.8
Máx(lx)	39	48.1	45.5	39.5
Min/ medio	0.45	0.38	0.41	0.42
Min/ máximo	0.28	0.25	0.26	0.27

Cuadro 2

Valores de iluminancia en modelo del sistema actual de alumbrado público

En el análisis de la luminancia en el sector se obtuvieron valores entre el rango de 0 cd/m<sup>2</sup> hasta 3 cd/m<sup>2</sup>. Para la iluminancia se tienen valores de 6 luxes hasta 48 luxes. En ambos casos se puede observar que los valores más altos se concentran en los puntos donde está la luminaria. Cuando la distancia entre las luminarias es mayor, tanto la iluminancia como la luminancia, en los puntos más alejados disminuyen, lo que representa que existen áreas menos iluminadas. Cuando las luminarias están cerca la iluminación de estas se suman, por esto se tienen valores mayores en las intersecciones, donde la distancia entre postes es menor por ser un área crítica. Esto es esencial evaluarlo dado que tiene relación con la visibilidad y el riesgo de accidentes. Para esto también debe tomarse en cuenta la distribución que tienen las luminarias, tipo III, en donde su patrón es más ancho en los lados y más estrecho hacia la carretera, lo cual proporciona una iluminación más uniforme a lo largo de la vía.

Los resultados obtenidos en la simulación tienen una iluminación promedio por arriba de 20 luxes, lo cual constituye un valor adecuado para garantizar comodidad y seguridad al conductor. Sin embargo, al evaluar la iluminación promedio obtenida en el sector, se puede establecer que estos no cumplen con el mínimo. Además, se puede observar en las figuras y en las tablas, que los valores mínimos tienen una gran variación, en donde en las mediciones se tienen valores por debajo de 10 luxes mientras que en la simulación están por encima de dicho valor. Esta diferencia de valores se debe principalmente al hecho que las luminarias en el sitio no han sido recientemente cambiadas, por lo cual no están funcionando en su máximo rendimiento. Asimismo, se tiene que tomar en cuenta que el ambiente es limpio, en donde se produce una pequeña depreciación por suciedad. Se tiene que tomar en cuenta que en la vida real los árboles interferían en la cantidad de iluminación que llegaba a la superficie, especialmente en la luminaria 1.

Para el análisis del sistema de alumbrado se crearon dos simulaciones, en donde el primero evalúa todo el sector donde se tomaron los datos *in situ*, contando la intersección y los tramos rectos de este. Para el segundo modelo se evaluaron solamente los tramos rectos, en donde se tomó en cuenta

las diferentes distancias interpostales, en este caso se tiene dos distancias en el área analizada. La primera distancia es mayor debido a que está en una intersección y se tiene dos luminarias a menos de 5 metros de distancia, esto provoca que la luz de ambas luminarias se sume y la iluminación sea mayor, por esta razón la distancia a la siguiente luminaria en los tramos rectos es mayor. Para poder evaluar el sistema, esta adición de iluminación no se tomó en cuenta. Para el análisis se tomó en cuenta que la décima calle tiene un ancho de vía de 9 metros y la segunda avenida tiene un ancho de vía de 21m. Para la décima calle se tiene una implantación de luz bilateral mientras en la segunda avenida una unilateral. A continuación, se muestran los resultados:

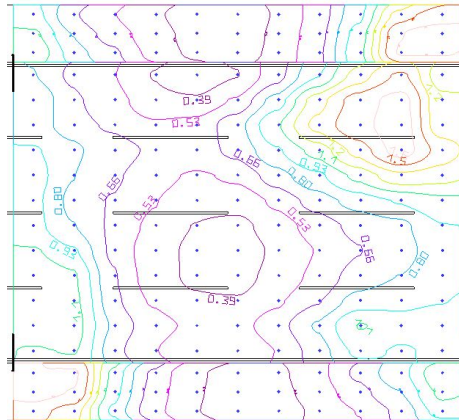


Figura 63. Resultados de la luminancia de un tramo recto en la segunda avenida con una distancia interpostal de 31.4 m

En este tramo se tiene que la luminancia media es de 0.77 cd/m<sup>2</sup>, la uniformidad total es de 0.37, la uniformidad longitudinal de 0.31 y el incremento de umbral es de 13 %. La iluminación en ambas aceras es la misma, en donde la iluminancia media es de 15.04 luxes y la mínima es de 4.06 luxes. Con los resultados obtenidos se puede establecer que el tramo no cumple con las normativas, el incremento de umbral es el único que cumple según la normativa española. Para las aceras se tiene que la iluminancia media si cumple sin embargo, la iluminancia mínima no.

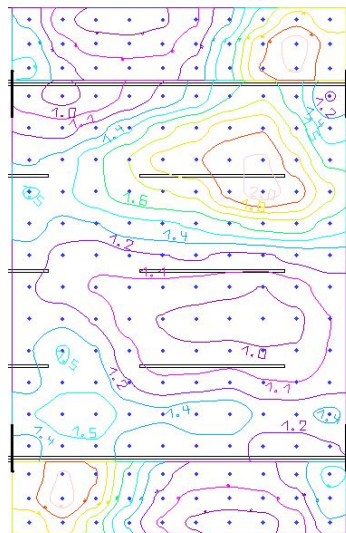


Figura 64. Resultados de la luminancia de un tramo recto en la segunda avenida con una distancia interpostal de 18.4m



luminancia media del lado de las luminarias es de 11.84 luxes y una mínima de 7.32 luxes. Y para la acera del lado contrario se tiene una luminancia media de 22.5 luxes y una mínima de 12.7 luxes. Según la normativa española y la IESNA la luminancia media y el incremento de umbral si cumple, sin embargo, según la normativa colombiana este valor está por debajo del aceptado. Por otro lado, la uniformidad total y longitudinal no cumplen según las normativas española y colombiana, pero si según la IESNA. Ambas aceras tienen valores por arriba de lo establecido en las normativas, sin embargo, la acera donde se encuentran los puntos de luz la luminancia media tiene un valor que sobrepasa los 15 luxes recomendados.

En base a los resultados obtenidos en la segunda simulación se puede determinar que no se cumple con las normativas en su totalidad, en donde el principal fallo se encuentra en la uniformidad de iluminación. Se puede establecer que existe una relación inversamente proporcional entre los valores de uniformidad y luminancia con la distancia y ancho de las vías.

La luminaria utilizada actualmente tiene la siguiente curva de distribución luminosa:

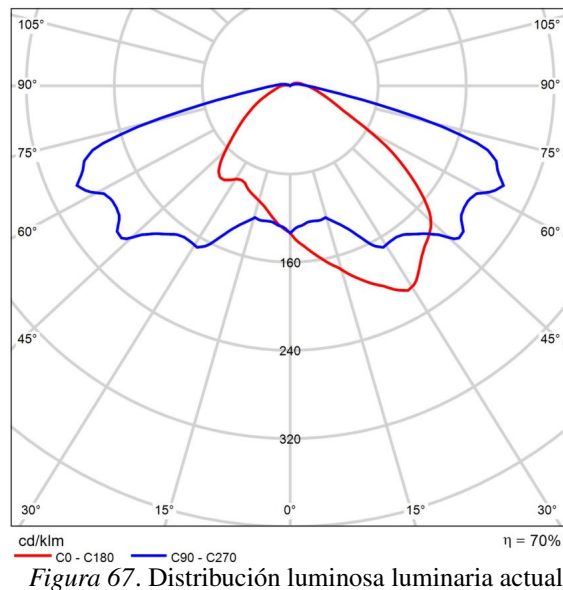
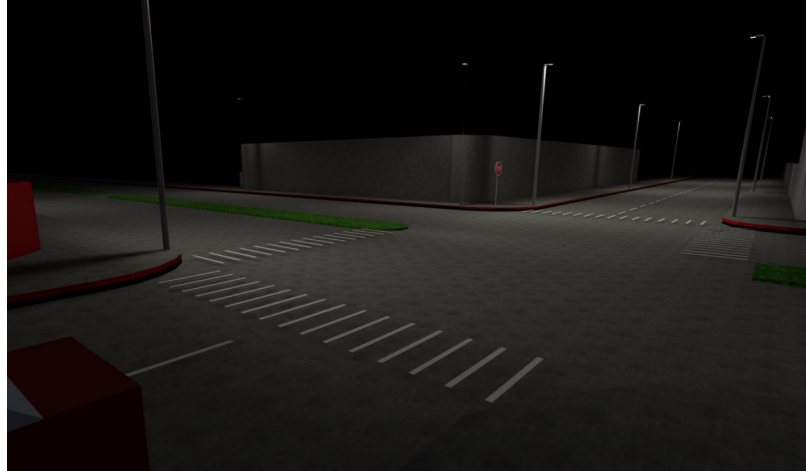


Figura 67. Distribución luminosa luminaria actual

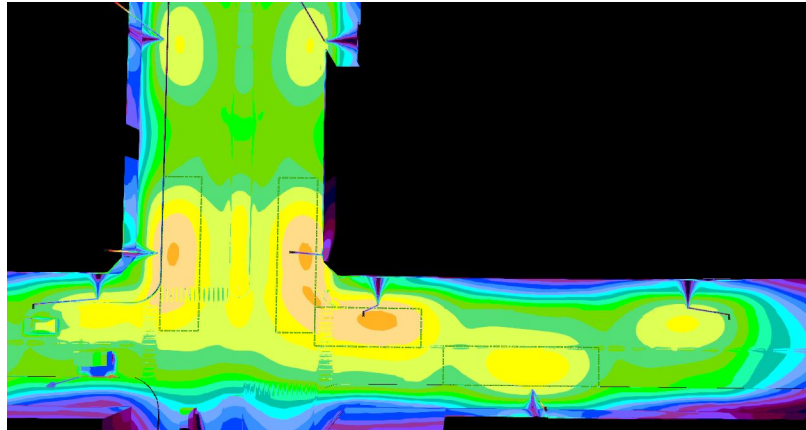
La curva roja que va de 0° abajo de la luminaria hasta 180°, representa la distribución de la luz en un plano horizontal. La curva azul es la que va desde los 90° hacia el suelo hasta 270° hacia el techo, la cual representa la distribución de la luminaria en el plano vertical. En este caso la curva azul es ancha, lo cual representa que tiene una mayor distribución en el plano vertical, lo cual puede llegar a representar una fuente de deslumbramiento, así como una ineficiencia de la iluminación y un aumento de consumo de energía. Cuando la distribución vertical es excesiva se presenta una contaminación lumínica.

Las luminarias de sodio utilizadas actualmente tienen una emisión de 466 cd/klm a 70° y por encima, un valor de 220 a 80° y por encima y por último un valor de 29.8 cd/klm por encima de 90°. Esto nos demuestra que cierta parte de la iluminación es hacia arriba, en donde esta se desaprovecha y contribuye a la contaminación lumínica del lugar.

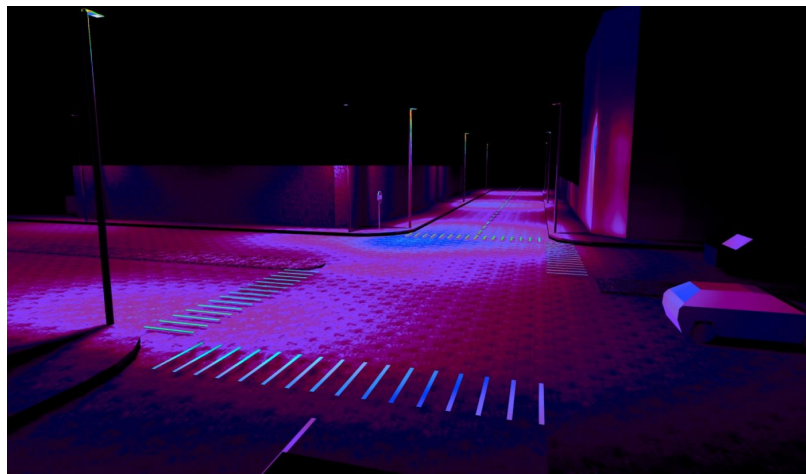




*Figura 69.* Simulación de la iluminación de la propuesta



*Figura 70.* Resultados de la iluminancia de la propuesta



*Figura 71.* Resultados de la luminancia de la propuesta

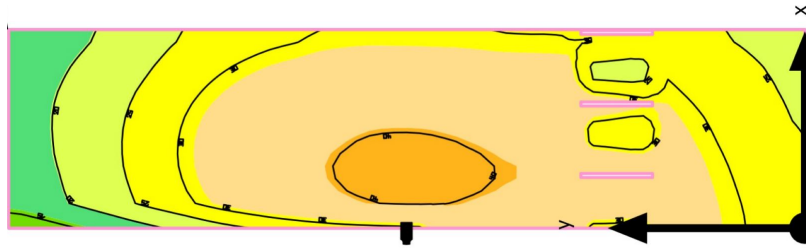


Figura 72. Resultados de las curvas de iluminación de la propuesta luminaria 1

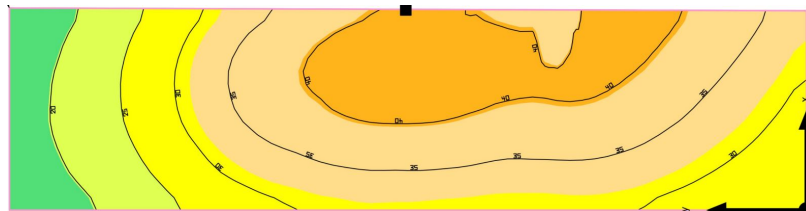


Figura 73. Resultados de las curvas de iluminación de la propuesta luminaria 2

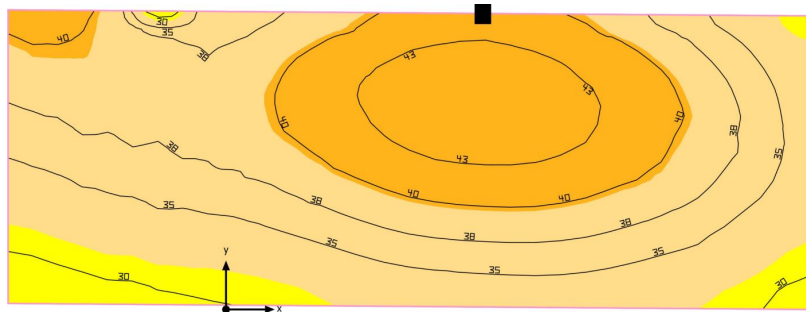


Figura 74. Resultados de las curvas de iluminación de la propuesta luminaria 3

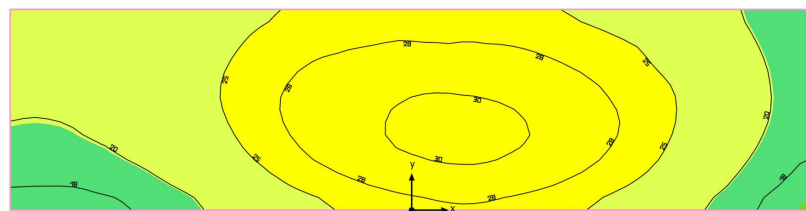


Figura 75. Resultados de las curvas de iluminación de la propuesta luminaria 4

Illuminancia/Luminaria	1	2	3	4
Media (lx)	30.7	32.9	37.4	24.4
Min(lx)	12.4	16.3	27.8	15.6
Máx(lx)	41.5	43.3	44.3	30.7
Min/ medio	0.40	0.50	0.74	0.64
Min/ máximo	0.30	0.38	0.63	0.51

Cuadro 3

Valores de iluminancia en propuesta de alumbrado público

La luminaria utilizada tiene la siguiente curva de distribución luminosa:

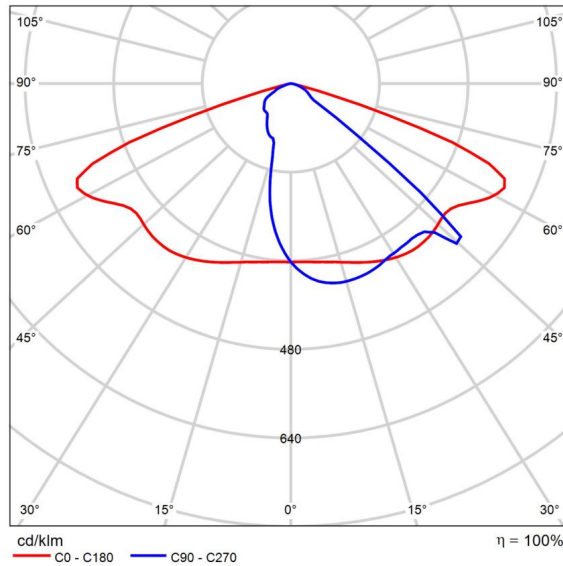


Figura 76. Distribución luminosa luminaria nueva

En la figura se puede observar que la curva roja, que representa la distribución horizontal, predomina ante la azul. Esta es más ancha por lo cual tiene una distribución más amplia y permite tener una iluminación uniforme y eficiente sin generar deslumbramiento o contaminación lumínica. Por otro lado, una pequeña parte de distribución vertical como se tiene en este caso ayuda a reducir la sensación de oscuridad en la calle y proporciona una sensación de seguridad. Al comparar los resultados con la luminaria de sodio de 250 watts se observa que la luminaria LED tiene una mejor distribución horizontal, demostrando que esta tiene un mejor uso de la energía y ayuda al medio ambiente al reducir la cantidad de contaminación.

La luminaria seleccionada tiene las siguientes características:

- Es una luminaria LED
- Tiene una protección IP66 y un IK09
- Su potencia es de 66.1 watts
- Tiene una eficiencia luminosa de 154.5 lm/W
- Posee un CRI de 70 y una temperatura de color de 4000 K
- Tiene un flujo de luz de 0 lm arriba de los 90°
- Tiene una vida útil de 100,000 horas
- Posee un voltaje de 230 Vin
- Tiene una pérdida por balastos de 5.1
- Tiene un conjunto óptico de 1, en donde la distancia hacia los lados de la luminaria es 4 veces la altura del punto de luz

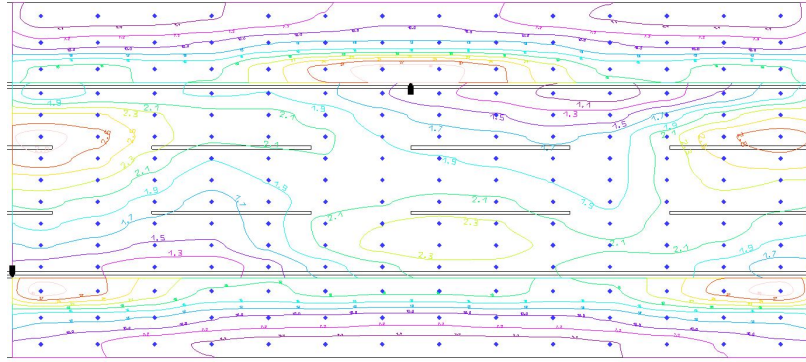


Figura 77. Resultados de la luminancia de un tramo recto en la décima calle con una distancia interpostal de 20 m

En este tramo se tiene que la luminancia media es de 1.96 cd/m<sup>2</sup>, la uniformidad total es de 0.52, la uniformidad longitudinal de 0.61 y el incremento de umbral es de 7 %. Debido a que la iluminación es bilateral, la iluminación en ambas aceras es la misma, en donde la iluminancia media es de 2.68 luxes y la mínima es de 2.96 luxes.

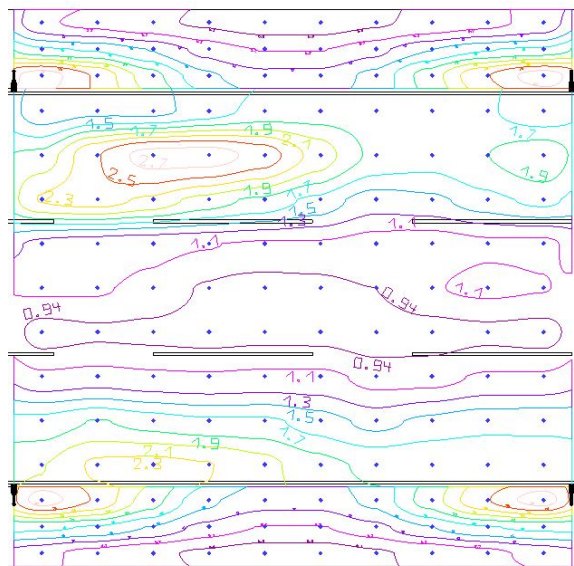


Figura 78. Resultados de la luminancia de un tramo recto en la segunda avenida con una distancia interpostal de 28 m

En este tramo se tiene que la luminancia media es de 1.53 cd/m<sup>2</sup>, la uniformidad total es de 0.55, la uniformidad longitudinal de 0.75 y el incremento de umbral es de 10 %. La iluminación en ambas aceras es la misma, en donde la iluminancia media es de 14.66 luxes y la mínima es de 4.88 luxes.

Ambos tramos tienen valores que cumplen con las normativas evaluadas en el trabajo.

Entre las alternativas de tecnologías a utilizar se decidió utilizar las luminarias LED, esto debido a que tienen una eficiencia energética mejor que las demás, tienen una vida útil más larga y ofrecen una iluminación más brillante y uniforme. Este tipo de tecnología es capaz de reducir la emisión de luz azul; la cual tiene relación con la perturbación del sueño y el ciclo circadiano de las personas.

En la elección de las luminarias se tomó en cuenta el impacto ambiental, en donde se busca que la luminaria no contribuya con la contaminación lumínica. Dentro de esto se evalúa la cantidad de luz que se dirige hacia la carretera, las aceras y hacia el cielo. Una de las razones para evaluar dicho aspecto es para no afectar la flora y el fauna, en donde el ciclo natural de la luz es importante para el bienestar de los organismos terrestres.

Se considera que la luz blanca fría proporciona una mejor visibilidad nocturna, valores mayores a 5000 K, en donde el ojo es más sensible a la luz azul. sin embargo, este tipo de luz fría puede llegar a provocar fatiga visual y deslumbramiento, lo cual es peligroso para los conductores. Las temperaturas de color utilizadas en las carreteras suelen variar de 3000 K a 4000 K, la luz cálida colores (inferiores a 3000K) se utiliza para crear ambientes más acogedores ya agradables, pero no es eficiente en términos de visibilidad. Se eligió la de 4000 K ya que esta permite una mejor visibilidad de la carretera y no genera un efecto excesivo de deslumbramiento. Esta tiene una luz más brillante, la cual se asemeja a la luz natural del día y es detectada con mayor facilidad por los bastones, Además, tiene suficiente energía en la región azul para alterar los conos del ojo humano y así mejorar la percepción del color y los detalles, lo cual es necesario para que no haya accidentes y proveen una mayor seguridad en el área.

El CRI de la luminaria seleccionada es de 70, donde esta puede mostrar los colores con un nivel de precisión moderado. Se suelen utilizar tanto en exteriores como interiores.

La luminaria cuenta con un IP67, las cuales son adecuadas para su uso en exteriores ya que soportar condiciones climáticas extremas, como lluvia, polvo y nieve. Además, estas reducen el costo en mantenimiento y reemplazo de luminarias en el futuro. Por otro lado, cuenta con un IK09, la cual es resistente a impactos mecánicos. Esta es importante dado que en las carreteras estas suelen estar expuestas a vibraciones e impacto de vehículos u otros objetos.

Se seleccionó una altura de montaje de 9 metros, esta se considera que es adecuada dado que provee una buena cobertura lumínica y distribución de esta. La distancia de los postes varía según los sectores, para esto se fueron cambiando las distancias en base a la uniformidad que cada una proveía. Estas varían en el modelo debido a que el ancho de las calles es diferente para la segunda avenida y para la décima calle. Para la primera se tiene una separación de 24.5 metros entre postes, dado que el ancho de la carretera es de aproximadamente 21 metros. Y para la décima calle se determinó una distancia interpostal de metros, en donde el ancho de la vía es de 9.8 metros. La implantación de puntos de luz es pareada, donde estos están en ambos sentidos de la vía, uno opuesto al otro. Se realizó dicha decisión para poder tener una mayor uniformidad en la vía, así como iluminar de igual manera ambas aceras.

La pupila del ojo humano se dilata o contrae en base a la cantidad de luz disponible, cuando la luz es escasa esta se dilata para que entre más luz. En el modelo se tiene una iluminancia superior a los 10 luxes pero por debajo de los 100 luxes, en donde se establece que la pupila tiene un diámetro entre 4 y 4.5 milímetros, la cual es adecuada para tener una buena visión nocturna y percepción de la profundidad. Si se aumentara demasiado la cantidad de luxes la pupila se dilataría, causando que haya fatiga visual y deslumbramiento. Por otro lado, si la iluminación es muy baja la pupila se contrae se reduce la visibilidad nocturna.

Dentro de los resultados del modelo se tiene una uniformidad por arriba del 40 %, los objetos se ven con un brillo constante y esto permite que el ojo pueda adaptarse fácilmente a las diferentes distancias, lo cual es el mecanismo de acomodación del ojo humano. Si se tuvieran valores por

debajo del 0.4 establecido en las normativas, se tiene un paso de sombra, en el cual se tienen áreas muy iluminadas y otras oscuras, causando dificultades al conductor para poder enfocar los objetos a las diferentes distancias. La uniformidad también afecta la fatiga visual del conductor, en donde si hay cambios bruscos de iluminación el ojo requiere de un mayor esfuerzo para ajustarse a estos.

La iluminación en el alumbrado público puede tener diferentes tipos de emisión de luz, como se indica en la Figura 14. Dentro de los resultados obtenidos en el software se obtuvieron los siguientes resultados: un valor máximo de 646 cd/klm por arriba de los 70°, un valor de 12 de 80° arriba de la horizontal y por arriba de 90° se tiene un valor de 0 cd/klm. Con esto se puede establecer que cumple con la normativa española conforme a la contaminación lumínica permitida.

En general, todas las decisiones de la simulación se basaron en criterios técnicos y de seguridad de las personas, donde se tomaron en cuenta las necesidades de la zona y las normativas internacionales. Con base a los resultados obtenidos de la propuesta se puede establecer que estos fueron positivos, en donde la distribución de las luminarias LED cumplen con los requisitos de uniformidad y de iluminancia en toda la zona del sector gastronómico. Además, se encontró que la iluminación tiene un bajo impacto en la contaminación lumínica del sector, lo cual previene un impacto negativo en la visibilidad del cielo nocturno y la perturbación del ciclo circadiano de las personas. Respecto a la salud se determinó que las luminarias LED tienen un bajo impacto en las personas, en donde estas tienen un bajo contenido de radiación UV y no emiten radiación infrarroja.

### **C. Análisis económico**

Según los planos realizados por la municipalidad se determinaron la cantidad de las luminarias y el tipo utilizado. La inversión en el proyecto para las municipalidades o ciudades se puede justificar realizando un análisis económico del cambio de luminarias de alumbrado público de sodio de 250 watts a LED. Una de las principales ventajas de la tecnología LED es que consumen hasta un 60 % menos de energía, lo cual es un menor gasto en el consumo energético y al tener una mayor cantidad de horas de vida útil significa que estas no tendrán que ser reemplazadas con tanta frecuencia. Además, de los beneficios económicos también se tienen beneficios adicionales que se deben tomar en cuenta a la hora de tomar una decisión. Dentro de estos se encuentra la mayor visibilidad que las luminarias LED proporcionan, en donde la iluminación es más uniforme y brillante, mejorando así la seguridad de las vías y la prevención de accidentes vehiculares. Por otro lado, dicha tecnología ofrece beneficios ambientales, en donde las luminarias LED no contienen mercurio, el cual es un elemento presente en las de sodio de alta presión. Además, al tener una mayor eficiencia energética se reduce la huella de carbono de la ciudad y las emisiones de gases de efecto invernadero.

Se realizó un análisis de la inversión con el valor presente neto, esta evalúa la rentabilidad de una inversión o proyecto. Esta se calcula como la diferencia entre los flujos de efectivo futuros generados por la inversión y el costo de esta. Si el VPN es positivo, se determina que esta es rentable, si es negativo no lo es. Para la evaluación del valor presente neto se requiere tomar en cuenta la tasa de retorno interno, la cual es una medida financiera para evaluar la rentabilidad de un proyecto de inversión, es la tasa de interés que hace que el valor presente neto sea igual a cero. Si el TIR es mayor a la tasa de descuento requerida en el proyecto (TMAR) entonces el proyecto es rentable.

Para la obtención de los precios y requerimientos se consultó con la municipalidad, la empresa eléctrica y con la empresa eléctrica IMPELSA. Los datos utilizados para el análisis se muestran a continuación:

Dato	Valor
Costo de la energía (Q/kWh)	1.434304
Horas de uso de las luminarias por año (hr)	4380
Cantidad de luminarias de sodio	162
Costo de luminaria de sodio (Q)	2535.54
Potencia de sodio (W)	250
Vida útil de luminaria de sodio (W)	24,000
Cantidad de luminarias LED	190
Potencia de luminaria LED (W)	66.1
Vida útil de luminaria LED (hr)	100,000
Costo de la luminaria LED (Q)	3035.025
Instalación de luminaria LED (Q)	877
Limpieza de luminaria (Q)	213.60
Costo de la colocación de poste (Q)	63,000
Costo del movimiento de poste (Q)	7,000
Costo de cable por metro (Q/m)	3.50
Distancia total que el cable recorre (m)	6117

Cuadro 4  
Valores para el análisis económico

El costo total del proyecto con luminarias LED se obtuvo de la siguiente manera:

$$S_o = (C_a + C_i) \times N_p \quad (7)$$

Donde:

$S_o$ = Inversión inicial

$C_a$ = Costo de adquisición de la luminaria

$C_i$ = Costo de instalación de la luminaria

$N_p$ = Número de luminarias de la propuesta

Teniendo en cuenta que el costo de adquisición es de Q3,3035.025 y el costo de instalación se obtuvo de la siguiente manera:

$$C_i = (I_l \times N_p) + (M_p \times N_s) + (C_p \times (N_p - N_s)) + C_c \quad (8)$$

Donde:

$C_i$ = Costo de instalación de la luminaria

$I_l$ = Instalación de la luminaria LED

$M_p$ = Movimiento del poste

$N_s$ = Número de luminarias de sodio

$C_p$ = Costo de poste

$N_p$ = Número de luminarias de la propuesta

$C_c$ = Costo del cableado

El costo de cableado se obtiene de la siguiente manera:

$$C_c = D_t \times C_{(cm)} \quad (9)$$

Donde:

$C_c$  = Costo del cableado

$C_{(cm)}$  = Costo del cable por metro

$D_t$  = Distancia total que el cable recorre

Como resultado de dicha ecuación se tiene un costo de instalación de Q3,167,492.50. Y colocando dicho dato en la ecuación anterior se tiene un costo total del proyecto de Q3,744,147.25.

Para obtener el consumo anual de la luminaria se utilizó la siguiente ecuación:

$$E = (P + (P_c * P)) \times t \times N \quad (10)$$

Donde:

E = Consumo energético anual en kWh

P = potencia de la luminaria en kW (si el valor está en W el valor se debe dividir dentro de 1000 para convertirlo a kWh)

$P_c$  = Potencia del componente adicional, en el caso de sodio es el balastro y en el caso de LED es el driver.

t = horas de uso de la luminaria en hr al año (se toma como 4380 horas dado que se utiliza 12 horas los 365 días del año)

N = número de luminarias

Teniendo en cuenta que el balastro consume un 25 % del total de la potencia de la luminaria de sodio y el driver un 5.1 % de la luminaria LED, se obtienen los siguientes resultados:

$$E1 = (0.25kW + 0.25*0.25kW) \times 4380 \text{ hr} \times 162 = 221,737.50 \text{ kWh}$$

$$E2 = (0.0661kW + 0.051*0.0661kW) \times 4380 \text{ hr} \times 190 = 57813.85 \text{ kWh}$$

Para calcular el ahorro energético del sistema, el cual se tomará luego como los ingresos en el análisis, se realizó el siguiente proceso:

$$A = (E_1 - E_2) \times C \quad (11)$$

Donde:

A = Ahorro anual de energía eléctrica

E1 = energía consumida por las luminarias de sodio

E2 = energía consumida por las luminarias LED

C = Costo de la energía eléctrica (Q/kWh)

En base a esto se tiene un ahorro anual de Q235,116.35.

En el flujo de efectivo se toma el ahorro anual como un ingreso mientras que el costo del proyecto se toma como una salida. Las luminarias LED tienen un IP de 66 lo cual hace que las luminarias sean capaces de soportar de mejor manera las condiciones ambientales, como la humedad, polvo y suciedad. Al contar con una mayor protección, estas no requieren de una limpieza como lo hacen las luminarias de sodio, lo cual se toma como un flujo de ingreso. Se toma en cuenta que en este proyecto no se tiene un valor de salvamento. Además, se toma como supuesto el hecho que las luminarias no tienen accidentes y solo se cambian a la hora que su vida útil se acabe.

Actualmente para las luminarias no se tiene un calendario o fechas fijas para su mantenimiento, en donde conforme las alcaldías van estableciendo los puntos donde han estado fallando las lumina-

rias se le da prioridad al mantenimiento, este ciclo se realiza hasta darle vuelta a todo el campo de iluminación, en donde se aproxima que este tarda alrededor de 5 años para volver al mismo punto.

El cambio de las bombillas en luminarias de sodio y LED es diferente debido a su vida útil, para esto se realizó el siguiente proceso:

$$Costo\ anual\ de\ bombilla = \frac{Costo\ luminaria}{t_v} \times N \quad (12)$$

Donde:

$t_v$ = Años de vida útil

Para obtener los años de vida se divide las horas de vida útil de la luminaria dentro de las horas que funciona la luminaria durante el año (4380 hr)

N= Número de luminarias

Con esta ecuación se obtuvo que por año el costo del cambio de bombillas de sodio es de Q82,151.50 y el de las luminarias LED es de Q 26,211.58. El valor es menor para las luminarias LED debido a que estas tienen una vida útil de 22 años mientras que las de sodio tienen una vida útil de 5 años. La diferencia entre los costos de ambas es de Q55,939.92, lo cual se toma como un ingreso en el análisis del flujo neto.

Año	Inversión inicial	Ahorro de energía	Bombillas	Limpieza	Flujo neto
0	-Q3,744,147.25	0	0	0	-Q3,744,147.25
1	0	Q235,116.35	Q55,939.92	0	Q291,056.26
2	0	Q235,116.35	Q55,939.92	0	Q291,056.26
3	0	Q235,116.35	Q55,939.92	0	Q291,056.26
4	0	Q235,116.35	Q55,939.92	0	Q291,056.26
5	0	Q235,116.35	Q55,939.92	Q213.60	Q291,269.86
6	0	Q235,116.35	Q55,939.92	0	Q291,056.26
7	0	Q235,116.35	Q55,939.92	0	Q291,056.26
8	0	Q235,116.35	Q55,939.92	0	Q291,056.26
9	0	Q235,116.35	Q55,939.92	0	Q291,056.26
10	0	Q235,116.35	Q55,939.92	Q213.60	Q291,269.86
11	0	Q235,116.35	Q55,939.92	0	Q291,056.26
12	0	Q235,116.35	Q55,939.92	0	Q291,056.26
13	0	Q235,116.35	Q55,939.92	0	Q291,056.26
14	0	Q235,116.35	Q55,939.92	0	Q291,056.26
15	0	Q235,116.35	Q55,939.92	Q213.60	Q291,269.86
16	0	Q235,116.35	Q55,939.92	0	Q291,056.26
17	0	Q235,116.35	Q55,939.92	0	Q291,056.26
18	0	Q235,116.35	Q55,939.92	0	Q291,056.26
19	0	Q235,116.35	Q55,939.92	0	Q291,056.26

Cuadro 5

*Flujo neto de la propuesta de alumbrado público parte 1*

Año	Inversión inicial	Ahorro de energía	Bombillas	Limpieza	Flujo neto
20	0	Q235,116.35	Q55,939.92	Q213.60	Q291,269.86
21	0	Q235,116.35	Q55,939.92	0	Q291,056.26
22	0	Q235,116.35	Q55,939.92	0	Q291,056.26
23	0	Q235,116.35	Q55,939.92	0	Q291,056.26
24	0	Q235,116.35	Q55,939.92	0	Q291,056.26
25	0	Q235,116.35	Q55,939.92	Q213.60	Q291,269.86
26	0	Q235,116.35	Q55,939.92	0	Q291,056.26
27	0	Q235,116.35	Q55,939.92	0	Q291,056.26
28	0	Q235,116.35	Q55,939.92	0	Q291,056.26
29	0	Q235,116.35	Q55,939.92	0	Q291,056.26
30	0	Q235,116.35	Q55,939.92	Q213.60	Q291,269.86

Cuadro 6

*Flujo neto de la propuesta de alumbrado público parte 2*

$$VPN = S_o + \sum_{t=1}^n \frac{S_t}{(1+i)^t} \quad (13)$$

Donde:

VPN= Valor presente neto

$S_o$ =Inversión inicial

n= número de años del proyecto

$S_t$ = flujo de efectivo neto del periodo t

i= tasa de recuperación mínima atractiva (TMAR)

Excel provee la función de VNA la cual devuelve el valor presente neto de una inversión a partir de una tasa de descuento y una serie de pagos futuros. Debido a que la tasa varía con el tiempo y conforme a las municipalidades. Teniendo esto en cuenta se obtuvo la TIR por medio de la función TIR de los flujos netos de todos los años, obteniendo un resultado de 6.65 %. En este punto el valor presente neto se vuelve cero.

Para poder comprender de mejor manera la relación de la tasa interna de retorno y el valor presente neto se realizó una gráfica que se muestra a continuación:

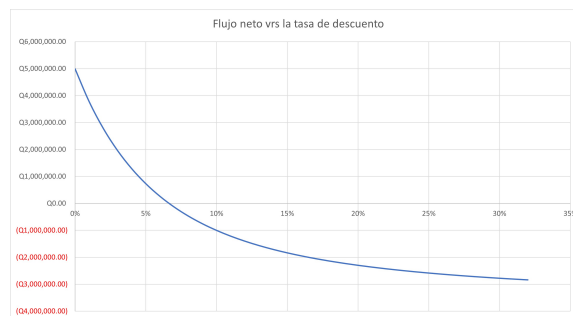


Figura 79. Gráfica del valor presente neto y la tasa de retorno interna propuesta

En este se puede determinar que si la TMAR es menor a 6.65 % el proyecto es rentable, a partir

de este valor para arriba el valor presente neto se vuelve negativo. El valor obtenido es positivo, por lo cual se establece que si existe un retorno a largo plazo.

La conversión de un sistema de iluminación de sodio público en un LED es un proceso complejo y costoso que requiere la reubicación de un puesto de servicio público y la instalación de un nuevo accesorios. Este proyecto debe evaluarse mediante el análisis del valor presente neto (VPN) y las tasas de desempeño para determinar las posibilidades de ejecución económica. Sin embargo, es importante tener en cuenta las ventajas adicionales de este cambio a la comunidad. Las luces LED mejoran en gran medida la calidad de la iluminación y proporcionan una luz más uniforme y de mayor calidad que las lámparas de sodio. Esto mejora la visibilidad de los peatones y la seguridad del tráfico, reduciendo el riesgo de accidentes y delitos. Además, las luminarias LED emiten luz de manera direccional lo cual reduce la contaminación lumínica de la zona y mejora la calidad del cielo nocturno, lo que beneficia tanto a los residentes como al medio ambiente natural.

Si la TMAR es mayor a 6.65 % se considera que el proyecto no es rentable, pero los beneficios sociales, ambientales y de calidad de vida deben tomarse en consideración en el proceso de decisión. Estos beneficios son positivos para la comunidad local y el medio ambiente, justifican la implementación del proyecto para mejorar la calidad de los residentes, reducir el impacto en el medio ambiente y promover entornos sostenibles. Por lo tanto, es importante adoptar un enfoque general al evaluar no solo los aspectos económicos sino también las cosas sociales y ambientales.

La propuesta ideal consiste en el cambio de la ubicación de los postes, lo cual requiere una inversión inicial elevada. Debido a esto se propone el cambio de solamente la luminaria, en donde se busca que la vía cumpla con las normativas, sin embargo se debe tomar en cuenta que los peatones en las aceras no obtiene la iluminación suficiente para cumplir con el valor promedio de iluminancia para la clasificación P2. Si llegan a cumplir con los valores de la clasificación P4, en donde es un paso donde hay bajo flujo de peatones, esto no es ideal dado que el área analizada es un sector gastronómico, en donde se desea que las personas puedan transitar de forma segura y promover el turismo y comercio dentro de este. Los resultados de la simulación y del análisis económico se muestran en los anexos, en este se tiene un 17.80 % de tasa de retorno interna, lo cual indica que el proyecto es económicamente viable.

## VIII. CONCLUSIONES

Al realizar el análisis del sistema actual de alumbrado público, se determinó que este no cumple con los requisitos mínimos de las normativas internacionales analizadas, como las normativas de Colombia, España y Estados Unidos. Aunque los valores de iluminancia son aceptables, los valores de luminancia media, uniformidad total y uniformidad longitudinal no cumplen con los estándares establecidos en la normativa. Estos resultados resaltan la importancia de diseñar un nuevo sistema de alumbrado público que cumpla con las normativas y mejore la calidad de las vías públicas.

Con base a los resultados se pudo determinar que al cambiar las tecnologías de sodio de alta presión a LED se reduce el consumo energético del sistema y los costos de reposición de las luminarias. Esto contribuye a la eficiencia energética y económica del sector de alumbrado público, al tiempo que ayuda a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y la contaminación lumínica.

Para la nueva propuesta del diseño del alumbrado público, se realizó una simulación que logra una distribución de luz uniforme. Mediante el uso de software DIALux, se determinaron las distancias ideales para crear un sistema eficiente que cumpla con los requisitos. Se estableció que la distancia entre las luminarias no puede ser la misma en todas las vías, ya que varía principalmente según el ancho de la vía, tipo de vía. etc.

Tras realizar el análisis económico, se concluyó que el proyecto puede no ser considerado altamente rentable debido al elevado costo inicial que implica la reubicación de los postes existentes. Sin embargo, a pesar de dichas circunstancias, existen factores que hacen que la inversión sea valiosa y necesaria para la población, ya que al cumplir con las normas de iluminación se proporciona un lugar seguro y de calidad para la población. Esto no solo beneficia la seguridad y el bienestar de las personas, si no que también tiene un impacto positivo en su calidad de vida. Además, es importante considerar que las luminarias LED son reconocidas por su menor consumo energético y alta calidad de iluminación, lo que reduce los costos de energía a largo plazo y contribuye a la preservación del medio ambiente al disminuir la huella de carbono.

## **IX. RECOMENDACIONES**

### **A. Para las municipalidades**

Para futuros análisis de alumbrado público se recomienda utilizar el software de iluminación Dialux para evaluar diversas opciones de normativas internacionales de iluminación, para poder prever los problemas que se puedan presentar y observar el funcionamiento del sistema.

El sistema actual de alumbrado público no contiene uniformidad en su distribución de luz, en donde los postes de iluminación no tienen distancias fijas, con base en esta observación se recomienda que los diseños de alumbrado sean homogéneos, para proveer un sistema con una distribución más uniforme.

Para el diseño de alumbrado público y la evaluación de este se recomienda la creación de una normativa específica de Guatemala que tome en cuenta las necesidades de los conductores y peatones.

Se recomienda realizar más análisis del alumbrado público en diversas partes de Guatemala, esto con el fin de determinar si estos cumplen con los requisitos para proveer vías seguras, además de verificar como está funcionando el sistema y poder prever accidentes vehiculares.

Es importante llevar a cabo un monitoreo continuo y un mantenimiento regular del alumbrado público para asegurar que las luminarias estén en buen estado de funcionamiento.

Se recomienda que se promueva la tecnología LED en el alumbrado público para lograr una mayor eficiencia energética y reducir los costos de mantenimiento y reemplazo de luminarias.

Desarrollar un plan de reemplazo progresivo donde se priorice las zonas más concurridas e importantes para poder así tener una transición gradual a tecnologías más eficientes.

### **B. Para la academia**

Se recomienda promover la investigación y el desarrollo de tecnologías y metodologías más eficientes para el alumbrado público.

En el curso de iluminación en la carrera de Ingeniería Civil Arquitectónica evaluar las normas

internacionales y establecer un criterio acerca de los requerimientos mínimos que se deben tener.

Se recomienda establecer alianzas con las instituciones y las municipalidades para poder colaborar en proyectos de investigación y desarrollo de soluciones para el alumbrado público.

Realizar laboratorios para que los estudiantes obtengan conocimiento de como realizar las mediciones y observar que factores intervienen en los resultados.

Fomentar la capacitación y formación de estudiantes en al ámbito de alumbrado público, para mantenerse actualizados de las nuevas tecnologías, normativas y metodologías.

### **C. Para estudiantes**

Explorar tecnologías emergentes en el campo de la iluminación para exteriores, como la iluminación con luminarias LED.

La utilización de luminarias LED solares es una opción respetuosa con el medio ambiente que se recomienda para el diseño de alumbrado público. Sin embargo, para asegurar su correcto funcionamiento, es imprescindible realizar un análisis minucioso del sitio y una evaluación de costes rigurosa. De esta forma, se podrá determinar si el proyecto es viable y adecuado para las necesidades específicas del lugar en cuestión.

Fomentar la participación y colaboración de las partes interesadas, cómo las municipalidades, instituciones, profesionales y la comunidad, esto con el fin de asegurar el éxito del proyecto.

Si la municipalidad provee los planos del lugar, se recomienda revisar la cantidad de luminarias, dado que los planos en ciertas ocasiones no suelen estar actualizados.

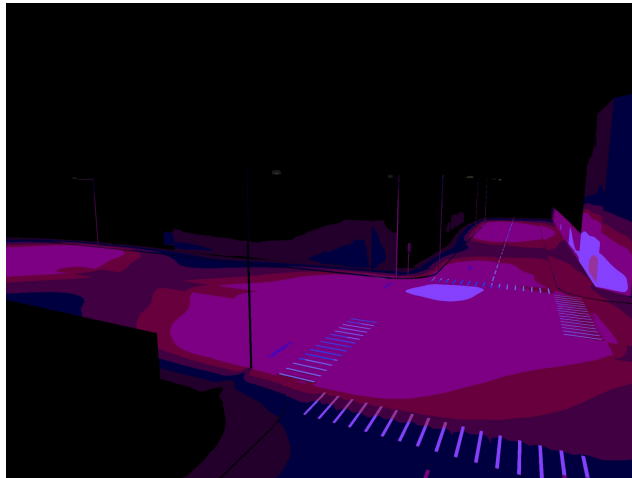
## X. BIBLIOGRAFÍA

- ARUP. (2019). Circadian Lighting. <https://www.arup.com/-/media/arup/files/publications/c/circadian-lighting-definition-and-strategy.pdf>
- Barba, M. N. (2010). Contaminación lumínica. [http://www.conama9.conama.org/conama9/download/files/GTs/GT\\_LUZ/LUZ\\_final.pdf](http://www.conama9.conama.org/conama9/download/files/GTs/GT_LUZ/LUZ_final.pdf)
- CNEE. (2018). La Comisión Nacional de Energía Eléctrica. <https://www.cnee.gob.gt/pdf/resoluciones/2018/CNEE%5C%20155%5C%202018.pdf>
- Cortés, A. B. C. (2010). Luz y Emociones: Estudio sobre la influencia de la Iluminación Urbana en las Emociones tomando como base el Diseño Emocional. <https://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/6138/TABCC1de1.pdf>
- Devki Energy Consultancy Pvt. Ltd. (2015). *Best Practice Manual for Lighting*. [https://nredcap.in/PDFs/BEE\\_manuals/BEST\\_PRACTICE\\_MANUAL\\_LIGHTING.pdf](https://nredcap.in/PDFs/BEE_manuals/BEST_PRACTICE_MANUAL_LIGHTING.pdf)
- DIALux. (2021). DIALux. <https://www.dialux.com/es-ES/dialux>
- Empresa Eléctrica de Guatemala, S.A. (EEGSA). (2018). *Información de Tarifas*. <https://eegsa.com/factura-eegsa-2/calculadora-de-facturas/informacion-de-tarifas/>
- European Committee for Standardization. (2015). *Road lighting - Part 1: Selection of lighting classes*. [https://www.oxytech.it/PDF/EN13201-2015\\_La\\_nueva\\_norma\\_de\\_iluminacion\\_de\\_carreteras-Rv01\\_210316.pdf](https://www.oxytech.it/PDF/EN13201-2015_La_nueva_norma_de_iluminacion_de_carreteras-Rv01_210316.pdf)
- Fonseca, J., Secue, J., Páez, O., & Muela, E. (2018). *Análisis de tecnologías y normatividad de iluminación eficiente en alumbrado público* (inf. téc.). Organización Latinoamericana de Energía (OLADE). <https://biblioteca.olade.org/opac-tmpl/Documentos/old0411.pdf>
- Illuminating Engineering Society of North America. (2021). *The IESNA Lighting Handbook: Reference & Application* (9.<sup>a</sup> ed.).
- Iowa State University, Center for Transportation Research and Education. (2013). *Design Manual*. [https://intrans.iastate.edu/app/uploads/sites/15/2018/09/Chapter\\_11-2017.pdf](https://intrans.iastate.edu/app/uploads/sites/15/2018/09/Chapter_11-2017.pdf)
- Leds Universe. (2021). Iluminación LED para calles y carreteras – Iluminación para el público [11/05/2022]. <https://www.ledsuniverse.com/iluminacion-led-para-calles-y-carreteras-iluminacion-para-el-publico/>
- Mejía, V. (2017). Contaminación visual: el exceso de carteles lumínicos contribuye al estrés. *La Nación*. <https://www.lanacion.com.ar/buenos-aires/contaminacion-visual-el-exceso-de-carteles-luminicos-contribuye-al-estres-nid2000031/>
- Ministerio de Vivienda y Urbanismo. (2017). Manual de elementos urbanos sustentables. <https://csustentable.minvu.gob.cl/wp-content/uploads/2018/03/MANUAL-DE-ELEMENTOS-URBANOS-SUSTENTABLES-TOMO-I.pdf>
- Moura, F., & de Abreu e Silva, J. (2018). Street Lighting System for Smart Cities Using Micro-Controllers. [https://www.researchgate.net/publication/325869860\\_Street\\_Lighting\\_System\\_for\\_Smart\\_Cities\\_Using\\_Micro-Controllers](https://www.researchgate.net/publication/325869860_Street_Lighting_System_for_Smart_Cities_Using_Micro-Controllers)
- Orejon, R., Andres, J., & Gago, A. (2021). Autonomous Photovoltaic LED Urban Street Lighting: Technical, Economic, and Social Viability Analysis Based on a Case Study. *Proceedings of the 8th International Conference on Renewable Energy Research and Applications*, 1-6. <https://doi.org/10.3390/su132111746>

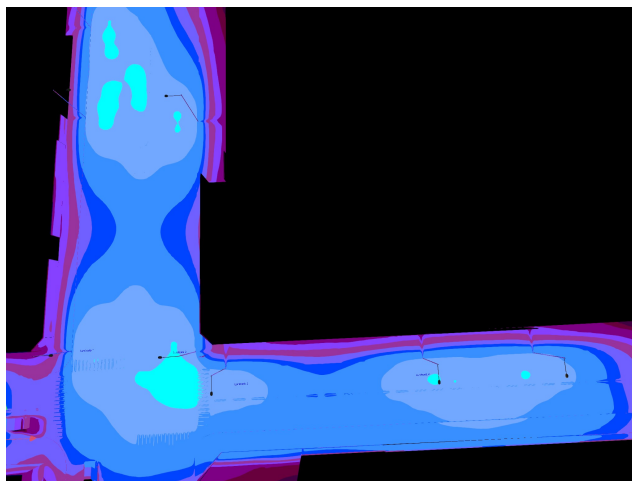
- Organización Latinoamericana de Energía (OLADE). (2018). *Análisis de Tecnologías y Normatividad de Iluminación Eficiente en Alumbrado Público* (inf. téc.). <http://biblioteca.olade.org/opac-tmpl/Documentos/old0411.pdf>
- Patiño, R. A. E. (2004). Principios básicos de iluminación. [http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/15844/dec\\_d\\_4117.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/15844/dec_d_4117.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- RETILAP. (2010). Reglamento técnico de iluminación y alumbrado público RETILAP. <https://www.minenergia.gov.co/documents/3899/36906-Resolucion-40122-8Feb2016.pdf>
- Secretaría de Comunicaciones y Transportes. (2015). *Manual de iluminación vial*. [https://www.sct.gob.mx/fileadmin/DireccionesGrales/DGST/Manuales/Manual\\_iluminacion/Manual\\_de\\_Iluminacion\\_Vial\\_2015.pdf](https://www.sct.gob.mx/fileadmin/DireccionesGrales/DGST/Manuales/Manual_iluminacion/Manual_de_Iluminacion_Vial_2015.pdf)
- Slowlight. (2022). Iniciativa Slowlight. [https://www.slowlight.es/pdf/manifiesto2022\\_es.pdf](https://www.slowlight.es/pdf/manifiesto2022_es.pdf)
- Susanne Seiting, A. W. (2018). Light for Public Space. *Light for Public Space*, 4-63.
- van Bommel, W., & Rouhana, A. (2011). Fundamentos sobre la generación de la luz y el alumbrado. <http://images.philips.com/is/content/PhilipsConsumer/PDFDownloads/Spain/Basics-of-lighting.pdf>
- Wong, F. (2014). *A cost effective solar powered LED street light* [Tesis de máster]. Universiti Tun Hussein Onn Malaysia. <https://core.ac.uk/download/pdf/42955047.pdf>

## XI. APÉNDICES

El trabajo propone un cambio de ubicación de luminarias para poder cumplir con las normativas internacionales y obtener una iluminación eficiente para los conductores y los peatones del área. Debido a que la re ubicación de los postes tiene un costo elevado se propone el cambio de las luminarias solamente. La distribución actual de los postes se realizó en base a la distribución eléctrica y no se tomó conforme al diseño de iluminación, en donde las distancias no son uniformas y varían según la calle. En las calles con ancho de 9.8m se tiene el problema que las luminarias solo se colocan de un solo lado de la acera, creando que la iluminación sea menos uniforme y que la iluminancia en las aceras no sea la adecuada. La propuesta del cambio de solo luminarias tiene los siguientes resultados:



*Figura 80.* Resultados de la iluminancia de la propuesta



*Figura 81.* Resultados de la luminancia de la propuesta

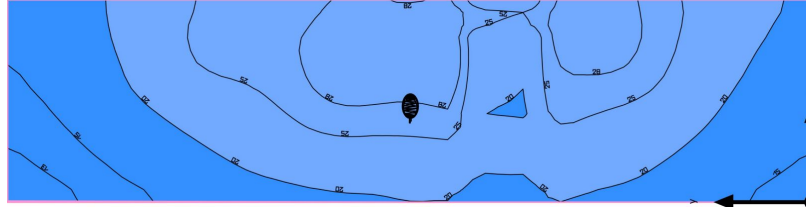


Figura 82. Resultados de las curvas de iluminación de la propuesta luminaria 1

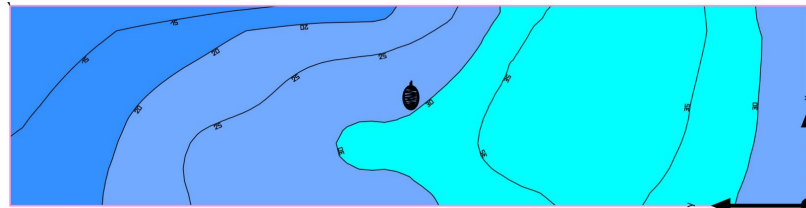


Figura 83. Resultados de las curvas de iluminación de la propuesta luminaria 2

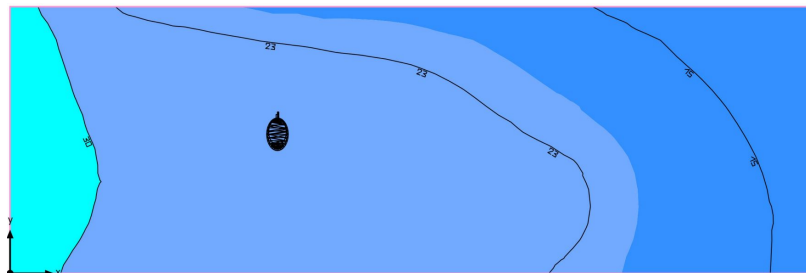


Figura 84. Resultados de las curvas de iluminación de la propuesta luminaria 3

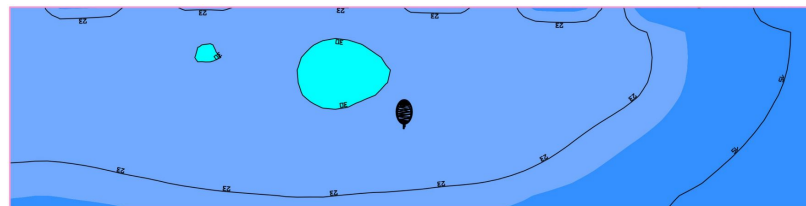


Figura 85. Resultados de las curvas de iluminación de la propuesta luminaria 4

Iluminancia/Luminaria	1	2	3	4
Media (lx)	21.90	27.6	23.1	23.5
Min(lx)	10.50	10.7	10.4	10.7
Máx(lx)	29.5	38.3	36.8	31.1
Min/ medio	0.48	0.39	0.45	0.46
Min/ máximo	0.36	0.28	0.28	0.34

Cuadro 7

Valores de iluminancia en propuesta de cambio de luminarias en el alumbrado público

La luminaria utilizada tiene la siguiente curva de distribución luminosa:

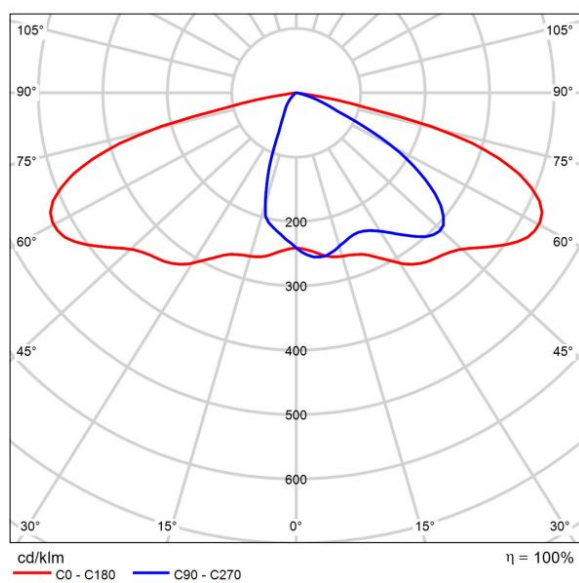


Figura 86. Distribución luminosa luminaria nueva

En la figura se puede observar que la curva roja, que representa la distribución horizontal, predomina ante la azul. Esta es más ancha por lo cual tiene una distribución más amplia y permite tener una iluminación uniforme y eficiente sin generar deslumbramiento o contaminación lumínica. Esta tiene una tendencia parecida a la luminaria planteada en la propuesta de alumbrado público en el apartado de análisis de resultados. La luminaria seleccionada tiene las siguientes características:

- Es una luminaria LED
- Tiene una protección IP66 y un IK09
- Su potencia es de 83.8 watts

- Tiene una eficiencia luminosa de 118.7 lm/W
- Posee un CRI de 70 y una temperatura de color de 4000 K
- Tiene un flujo de luz de 0 lm arriba de los 90°
- Tiene una vida útil de 100,000 horas
- Tiene una pérdida por balastos de 7.8
- Tiene un conjunto óptico de 1.2

En la simulación en el área específica de carreteras se obtienen los siguientes resultados:

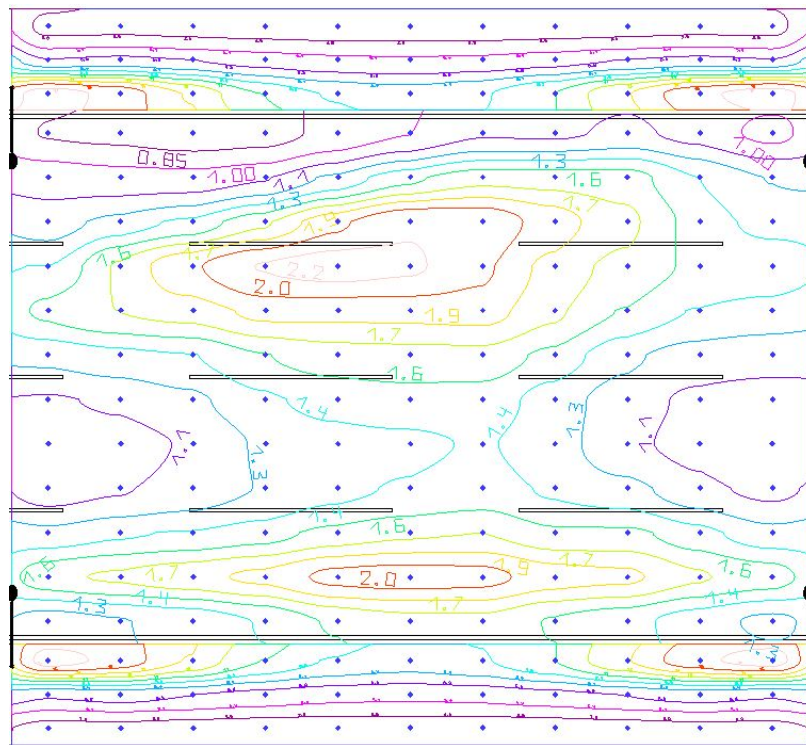


Figura 87. Resultados de la luminancia de un tramo recto en la segunda avenida con una distancia interpostal de 31.4 m

En este tramo se tiene que la luminancia media es de 1.48 cd/m<sup>2</sup>, la uniformidad total es de 0.52, la uniformidad longitudinal de 0.70 y el incremento de umbral es de 8 %. La iluminación en ambas aceras es la misma, en donde la iluminancia media es de 7.87 luxes y la mínima es de 3.18 luxes. Con los resultados obtenidos se puede establecer que el tramo cumple con las normativas. Para las aceras no se tiene que la iluminancia media mínima, sin embargo, la iluminancia mínima sí cumple.

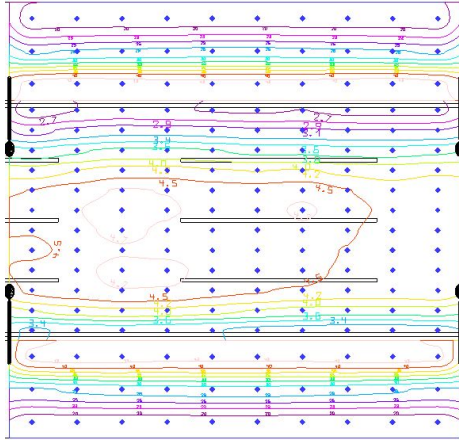


Figura 88. Resultados de la luminancia de un tramo recto en la segunda avenida con una distancia interpostal de 18.4m

En este tramo se tiene que la luminancia media es de 4.04 cd/m<sup>2</sup>, la uniformidad total es de 0.64, la uniformidad longitudinal de 0.91 y el incremento de umbral es de 8 %. La iluminación en ambas aceras es la misma, en donde la iluminación media es de 30.45 luxes y la mínima es de 19.05 luxes. Para las aceras se tiene que los valores si cumplen, sin embargo, la iluminación media y mínima es superior a lo recomendado, lo cual es 15 lx.

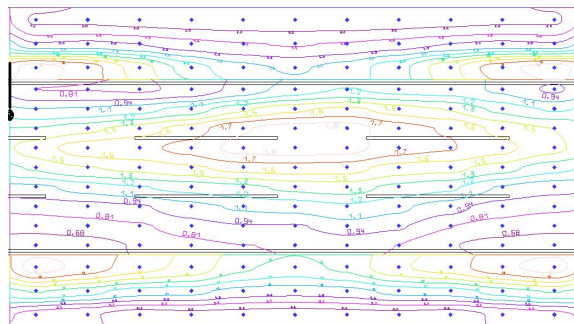


Figura 89. Resultados de la luminancia de un tramo recto en la décima calle con una distancia interpostal de 32 m

En este tramo se tiene que la luminancia media es de 1.13 cd/m<sup>2</sup>, la uniformidad total es de 0.50, la uniformidad longitudinal de 0.70 y el incremento de umbral es de 9 %. Para dicho tramo la iluminación media no cumple con la normativa colombiana, pero si para la española. La iluminación difiere en las aceras al tener de un solo lado las luminarias, la iluminación media es de 10.79 lx y de 6.73 lx, y la iluminación mínima es de 8.31 lx y de 2.27 lx. En el caso de la segunda acera el valor es muy pequeño para cumplir con la categoría P2 de las aceras.

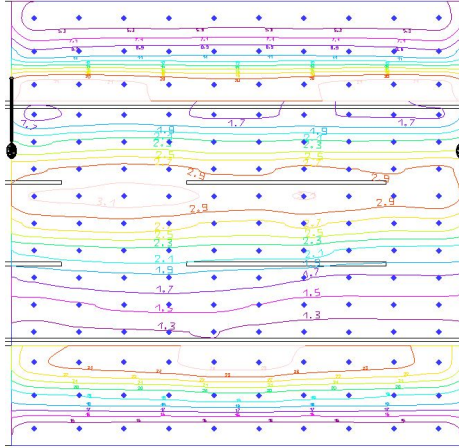


Figura 90. Resultados de la luminancia de un tramo recto en la décima calle con una distancia interpostal de 18 m

En este tramo se tiene que la luminancia media es de 2.00 cd/m<sup>2</sup>, la uniformidad total es de 0.56, la uniformidad longitudinal de 0.91 y el incremento de umbral es de 7%. Al igual que el resultado anterior, al solo tener de un solo lado las luminarias la iluminación en las aceras difiere, en donde la luminancia media del lado de las luminarias es de 19.17lx y una mínima de 15.13 lx. Y para la acera del lado contrario se tiene una luminancia media de 11.95 lx y una mínima de 4.45 lx. En este caso en la primera acera se supera la iluminación recomendada de 15 lx para paso de peatones clasificación P2.

Para el análisis económico de dicha propuesta se tienen los siguientes datos:

Dato	Valor
Costo de la energía (Q/kWh)	1.434304
Horas de uso de las luminarias por año (hr)	4380
Cantidad de luminarias	162
Costo de luminaria de sodio (Q)	2535.54
Potencia de sodio (W)	250
Vida útil de luminaria de sodio (W)	24,000
Cantidad de luminarias LED	162
Potencia de lumiaria LED (W)	83.8
Vida útil de luminaria LED (hr)	100,000
Costo de la luminaria LED (Q)	7766.29
Instalación de luminaria LED (Q)	877
Limpieza de luminaria (Q)	213.60

Cuadro 8

Valores para el análisis económico

El costo total del proyecto con luminarias LED se obtuvo con la ecuación número 7, en donde en vez de  $N_p$  se tiene el número de luminarias del proyecto, el cual es de 162. Teniendo en cuenta que el costo de adquisición es de Q1,258,138.98 y el costo de instalación se obtuvo de la siguiente manera:

$$C_i = (I_l \times N) \quad (14)$$

Donde:

$C_i$ = Costo de instalación de la luminaria

$I_l$ = Instalación de la luminaria

$N$ = Número de luminarias

Como resultado de dicha ecuación se tiene un costo de instalación de Q142,074. Y colocando dicho dato en la ecuación del costo total se tiene un valor del proyecto de Q1,400,212.98.

Para obtener el consumo anual de la luminaria se utilizó la ecuación 10 descrita en el análisis de resultados. Teniendo en cuenta que el balastro consume un 25 % del total de la potencia de la luminaria de sodio y el diver un 7.8 % de la luminaria LED, se obtienen los siguientes resultados:

$$E1 = (0.25\text{kW} + 0.25*0.25\text{kW}) \times 4380 \text{ hr} \times 162 = 221,737.50 \text{ kWh}$$

$$E2 = (0.0661\text{kW} + 0.078*0.0838\text{kW}) \times 4380 \text{ hr} \times 162 = 64099.096 \text{ kWh}$$

Para calcular el ahorro energético del sistema se utilizó la ecuación número 11. En base a esto se tiene un ahorro anual de Q226,101.39.

En el flujo de efectivo se toma el ahorro anual, la diferencia del cambio de bombillas y el mantenimiento como un ingreso mientras que el costo del proyecto se toma como una salida. De la misma manera que el análisis anterior, el valor de salvamiento no se toma en cuenta.

El cambio de las bombillas en luminarias de sodio y LED es diferente debido a su vida útil, para esto se utilizó la ecuación número 12. Con esta ecuación se obtuvo que por año el costo del cambio de bombillas de sodio es de Q82,151.50 y el de las luminarias LED es de Q57,188.14. El valor es menor para las luminarias LED debido a que estas tienen una vida útil de 22 años mientras que las de sodio tienen una vida útil de 5 años. La diferencia entre los costos de ambas es de Q24,963.36, lo cual se toma como un ingreso en el análisis del flujo neto.

Año	Inversión inicial	Ahorro de energía	Bombillas	Limpieza	Flujo neto
0	-Q1,400,212.98	0	0	0	-Q1,400,212.98
1	0	Q226,101.39	Q24,963.36	0	Q251,064.75
2	0	Q226,101.39	Q24,963.36	0	Q251,064.75
3	0	Q226,101.39	Q24,963.36	0	Q251,064.75
4	0	Q226,101.39	Q24,963.36	0	Q251,064.75
5	0	Q226,101.39	Q24,963.36	Q213.60	Q251,278.35

Cuadro 9

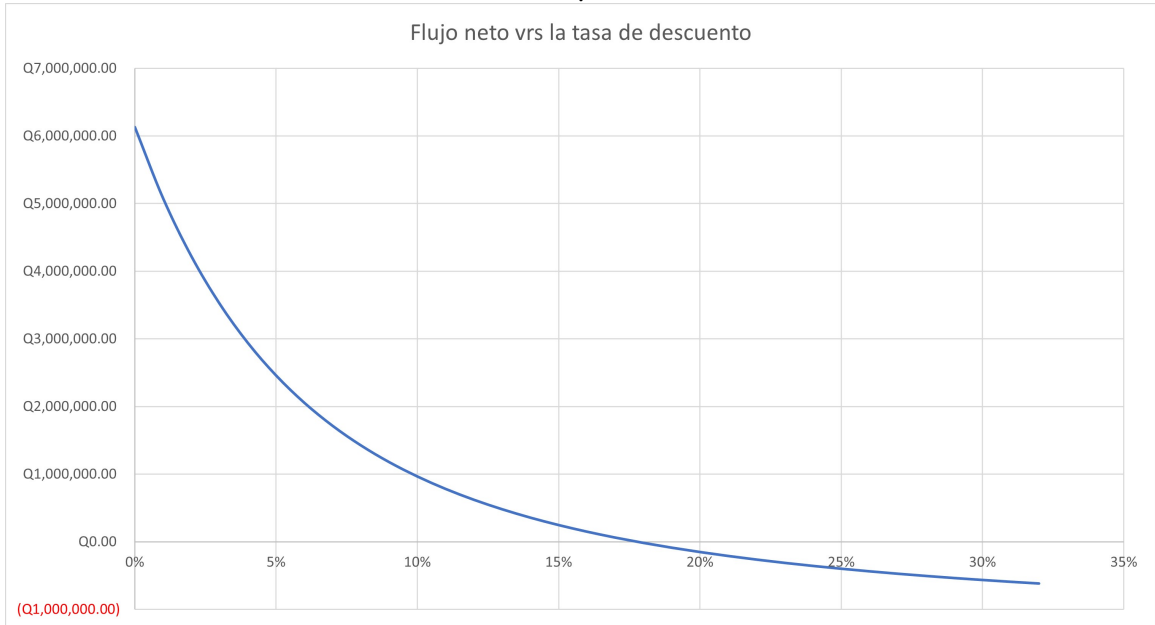
*Flujo neto de la propuesta de alumbrado público sin cambio de postes parte 1*

Año	Inversión inicial	Ahorro de energía	Bombillas	Limpieza	Flujo neto
6	0	Q226,101.39	Q24,963.36	0	Q251,064.75
7	0	Q226,101.39	Q24,963.36	0	Q251,064.75
8	0	Q226,101.39	Q24,963.36	0	Q251,064.75
9	0	Q226,101.39	Q24,963.36	0	Q251,064.75
10	0	Q226,101.39	Q24,963.36	Q213.60	Q251,278.35
11	0	Q226,101.39	Q24,963.36	0	Q251,064.75
12	0	Q226,101.39	Q24,963.36	0	Q251,064.75
13	0	Q226,101.39	Q24,963.36	0	Q251,064.75
14	0	Q226,101.39	Q24,963.36	0	Q251,064.75
15	0	Q226,101.39	Q24,963.36	Q213.60	Q251,278.35
16	0	Q226,101.39	Q24,963.36	0	Q251,064.75
17	0	Q226,101.39	Q24,963.36	0	Q251,064.75
18	0	Q226,101.39	Q24,963.36	0	Q251,064.75
19	0	Q226,101.39	Q24,963.36	0	Q251,064.75
20	0	Q226,101.39	Q24,963.36	Q213.60	Q251,278.35
21	0	Q226,101.39	Q24,963.36	0	Q251,064.75
22	0	Q226,101.39	Q24,963.36	0	Q251,064.75
23	0	Q226,101.39	Q24,963.36	0	Q251,064.75
24	0	Q226,101.39	Q24,963.36	0	Q251,064.75
25	0	Q226,101.39	Q24,963.36	Q213.60	Q251,278.35
26	0	Q226,101.39	Q24,963.36	0	Q251,064.75
27	0	Q226,101.39	Q24,963.36	0	Q251,064.75
28	0	Q226,101.39	Q24,963.36	0	Q251,064.75
29	0	Q226,101.39	Q24,963.36	0	Q251,064.75
30	0	Q226,101.39	Q24,963.36	Q213.60	Q251,278.35

Cuadro 10

*Flujo neto de la propuesta de alumbrado público sin cambio de postes parte 2*

Con la fórmula de VNA y tasa de retorno interna se tiene un resultado de TIR de 17.80 %. En este punto el valor presente neto se vuelve cero. En este se puede determinar que si la TMAR es menor a 17.8 % el proyecto es rentable, a partir de este valor para arriba el valor presente neto se vuelve negativo. En base a dicho análisis se tiene una tasa de retorno interno mayor a la propuesta de alumbrado en la sección de análisis de resultados, en donde se establece que tiene una mayor rentabilidad cambiar solamente las luminarias. Sin embargo, la distribución actual de los puntos de luz no es homogénea y las distancias no son las mismas en las calles, lo cual provoca que la iluminación no sea uniforme en todas las áreas y provoca que en ciertos lugares no se pueda cumplir con los requerimientos de las normativas. A continuación se muestra la relación de la tasa interna de retorno y el valor presente neto:



*Figura 91.* Gráfica del valor presente neto y la tasa de retorno interna propuesta sin cambio de postes

## XII. GLOSARIO

**Conos:** Prolongación conoidea, de forma semejante a la de una botella, de cada una de ciertas células de la retina de los vertebrados, que está situada en la llamada capa de los conos y bastoncillos y recibe las impresiones luminosas de color.

**Contraste:** inexistencia o escasez de tonos intermedios, de tal manera que resaltan mucho lo claro y lo oscuro.

**Corriente:** Magnitud física que expresa la cantidad de electricidad que fluye por un conductor en la unidad de tiempo, y cuya unidad en el sistema internacional es el amperio.

**Deslumbramiento:** Turbación de la vista por luz excesiva o repentina.

**Difusión:** Transformar los rayos procedentes de un foco luminoso en luz que se propaga en todas direcciones.

**Eficiencia luminosa:** indica el flujo (radiación visible) que emite la misma por cada unida de potencia eléctrica consumida para su obtención

**Espectro:** Parte de la radiación electromagnética perceptible para el ojo humano, comprendida entre 400 y 700 nm de longitud de onda.

**Fotocelda:** dispositivo usado para controlar el encendido y apagado automático de las luminarias de alumbrado público.

**Fotoeléctrica:** Electricidad producida por el desprendimiento de electrones debido a la acción de la luz y de otras radiaciones electromagnéticas.

**Fotométricas:** Perteneciente o relativo al fotómetro o a la fotometría.

**Intensidad:** Grado de fuerza con que se manifiesta un agente natural, una magnitud física, una cualidad, una expresión

**Reflexión:** Acción y efecto de reflejar o reflejarse.

**Refractor:** se utiliza para dar cierto control direccional a la luz procedente de las lámparas de forma que establecen un control de las intensidades luminosas y, parcialmente, del deslumbramiento

**Renderizado:** el proceso de render se encarga de convertir una descripción de una escena 3D en una imagen 2D

**Resistencia mecánica:** es la capacidad de los cuerpos para resistir las fuerzas aplicadas sin romperse. La resistencia mecánica de un cuerpo depende de su material y de su geometría.

**Retina:** Membrana interior del ojo, constituida por varias capas de células, que recibe imágenes y las envía al cerebro a través del nervio óptico.

**Software:** Conjunto de programas, instrucciones y reglas informáticas para ejecutar ciertas tareas en una computadora.

**Tensión:** Voltaje con que se realiza una transmisión de energía eléctrica.

**Ultravioleta:** Que se encuentra entre el extremo violeta del espectro visible y los rayos X, y provoca reacciones químicas de gran repercusión biológica.