



UNIVERSIDAD
DE PIURA

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Procedimiento para diseñar un sistema de iluminación vial
basado en normativa nacional y extranjera. Caso
Aplicativo: Avenida Vice- Piura**

Tesis para optar el Título de
Ingeniero Mecánico - Eléctrico

Héctor Javier Martínez Cayo

Asesor(es):
Mgtr. Ing. José Hugo Fiestas Chévez

Piura, julio de 2020



Resumen Analítico- Informativo

Procedimiento para diseñar un sistema de iluminación vial basado en normativa nacional y extranjera. Caso Aplicativo: Avenida Vice- Piura.

Martínez Cayo, Héctor Javier

Asesor(es): Mgtr. Ing. José Hugo Fiestas Chévez

Tesis.

Ingeniero Mecánico- Eléctrico

Universidad de Piura. Facultad de Ingeniería.

Piura, Julio de 2020

Palabras claves: Iluminación vial, seguridad, accidentes, Avenida Vice, Dialux

Introducción: La iluminación vial es uno de los factores claves para disminuir la fatalidad en accidentes de tránsito y aumentar la sensación de seguridad de los ciudadanos. En Perú, el diseño de los proyectos de iluminación vial se rige por la Norma Técnica DGE “Alumbrado de vías públicas en zonas de concesión de distribución”. Esta norma fue emitida en el año 2003, por lo que, a la fecha, no considera los avances tecnológicos conseguidos a nivel mundial en casi dos décadas.

Metodología: Se revisó y analizó la norma nacional de iluminación: Norma Técnica DGE “Alumbrado de vías públicas en zonas de concesión de distribución”, extrayendo la información relevante al cálculo de parámetros fotométricos. Se comparó la información extraída con la proporcionada por las normativas extranjeras, con el propósito de incluir la información relevante para el diseño vial que la norma nacional omite o solo menciona escuetamente. A partir de la información obtenida, se creó un diagrama de flujo, con el propósito de orientar al diseñador, desde la clasificación inicial de la vía a iluminar hasta la selección final de la lámpara a instalar.

Resultados: Con el procedimiento obtenido, se estudió el estado actual de la iluminación de la avenida Vice en Piura, obteniendo resultados desfavorables al ser evaluado frente a la norma nacional. Ante esta situación, se realizó un nuevo diseño de iluminación, el cual fue simulado y verificado con el software Dialux

Conclusiones: A partir del análisis y posterior comparación con las normativas extranjeras, se evidenció que la norma técnica de iluminación peruana tiene varias deficiencias que necesitan ser corregidas y/o actualizadas. Por ejemplo, el cálculo de los parámetros fotométricos iniciales, para una determinada situación (alumbrado de una vía peatonal o ciclovía), no deberían confiarse a la experiencia o criterio del diseñador. El autor considera que una norma técnica debe ser lo más directa posible y nunca estar abierta a interpretaciones, ya que esto podría comprometer la efectividad del diseño de iluminación y, por ende, la seguridad de los usuarios finales.

Fecha de elaboración del resumen: 03 de abril de 2020

Analytical-Informative Summary

Procedimiento para diseñar un sistema de iluminación vial basado en normativa nacional y extranjera. Caso Aplicativo: Avenida Vice- Piura.

Martínez Cayo, Héctor Javier

Asesor(es): Mgtr. Ing. José Hugo Fiestas Chévez

Tesis

Ingeniero Mecánico- Eléctrico

Universidad de Piura. Facultad de Ingeniería.

Piura, Julio de 2020

Keywords: Iluminación, seguridad, accidentes, Avenida Vice, luminancia

Introduction: Road lighting is one of the key factors in reducing road fatalities and increasing the public's sense of safety. In Peru, the design of road lighting projects is regulated by the DGE Technical Standard "Lighting of public roads in distribution concession areas". This standard was issued in 2003, hence it does not consider the technological progress achieved worldwide in almost two decades.

Methodology: The national lighting standard was reviewed and analyzed, extracting the information relevant to the calculation of photometric parameters. The extracted information was then compared with that provided by foreign standards, in order to include the pertinent details for road design that the national standard omits or only briefly mentions. From the obtained data, a flow chart was created, with the purpose of guiding the designer from the initial classification of the road to be illuminated to the final selection of the lamp to be installed.

Results: With the obtained procedure, the current state of the lighting of Vice Av. in Piura was studied, obtaining unfavorable results when evaluated against the national standard. In view of this situation, a new lighting design was made, which was simulated and verified with the software Dialux

Conclusions: From the analysis and subsequent comparison with foreign regulations, it became evident that the Peruvian technical lighting standard has several deficiencies that need to be corrected and/or updated. For example, the calculation of the initial photometric parameters, for a certain situation (lighting of a pedestrian or bicycle path), should not be entrusted to the experience or criteria of the designer. The author considers that a technical standard should be as straightforward as possible and never be open to interpretation, as this could potentially compromise the effectiveness of the lighting design and, therefore, the safety of the final users.

Summary date: April 3rd, 2020

Tabla de contenido

Introducción	1
Capítulo 1 Marco teórico.....	3
1.1 La visión humana.....	3
1.2 La luz visible	4
1.3 Percepción de color	6
1.3.1 Espacio de color CIE 1931	8
1.3.2 Temperatura de color	10
1.3.3 Reproducción cromática	10
1.4 Unidades fotométricas	12
1.4.1 Flujo Luminoso	13
1.4.2 Intensidad luminosa	13
1.4.3 Iluminancia	14
1.4.4 Luminancia	21
1.5 Lámparas para alumbrado público	29
1.5.1 Lámparas incandescentes.....	30
1.5.2 Lámparas de descarga.....	32
1.5.3 Lámparas LED	36
1.5.4 Factor de Mantenimiento	37

1.5.5 Información fotométrica	38
Capítulo 2 Análisis y comparación de la norma peruana de iluminación con normativas extranjeras	41
2.1 Norma Peruana de Iluminación	41
2.2 Norma Colombiana de Iluminación	44
2.3 Reporte técnico CIE 115: 2010, Iluminación vial para tráfico motorizado y peatonal. .	49
2.4 EN 13201-2:2013: Requisitos de desempeño.....	56
Capítulo 3 Procedimiento para determinar los parámetros fotométricos en un sistema de alumbrado público.....	59
3.1 Desarrollo	59
3.2 Presentación del procedimiento.....	61
3.3 Software a utilizar para la simulación	61
Capítulo 4 Aplicación del procedimiento y simulación	63
4.1 Documentación y situación actual de la vía a simular	63
4.2 Clasificación de la vía.....	67
4.3 Selección de lámparas y resultados	70
Conclusiones	77
Referencias bibliográficas	79
Apéndices	83

Lista de tablas

Tabla 1. Comparación de características, símbolos y unidades usadas en radiometría y fotometría.	12
Tabla 2. Método prescriptivo para determinar la iluminación necesaria para una carretera, basado en la Norma Británica de 1974.....	15
Tabla 3. Clasificación de superficies según el factor S1.....	25
Tabla 4. Designación aproximada de superficies en las clases típicas.....	25
Tabla 5. Propiedades de lámparas para alumbrado público.....	30
Tabla 6. Tipos de alumbrado según la clasificación vial.....	42
Tabla 7. Uniformidad de luminancia.....	43
Tabla 8. Uniformidad media de iluminancia.....	43
Tabla 9. Tipos de calzada.....	43
Tabla 10. Clasificación de vías para tráfico motorizado por complejidad de circulación y control del tráfico.	45
Tabla 11. Clases de iluminación para vías vehiculares.....	45
Tabla 12. Clases de iluminación para diferentes tipos de vías en áreas peatonales y de ciclistas.....	46
Tabla 13. Requisitos fotométricos mantenidos por clase de iluminación para tráfico motorizado con base en la luminancia de la calzada.....	46
Tabla 14. Valores mínimos mantenidos de iluminancias promedio (lx) en vías motorizadas.	47
Tabla 15. Requisitos mínimos de iluminación para tráfico peatonal.	47
Tabla 16. Requisitos fotométricos para áreas críticas.	47
Tabla 17. Método de cálculo para la categoría C a partir de la clasificación M.....	48
Tabla 18. Requisitos mínimos para vías con ciclorrutas y andenes adyacentes.	48
Tabla 19. Recomendación para disposición de luminarias.....	49
Tabla 20. Parámetros de selección para la categoría M.....	51

Tabla 21. Clases de iluminación para tráfico motorizado	52
Tabla 22. Parámetros de selección para la categoría C	53
Tabla 23. Comparación de las categorías M y C para distintos valores de q_0	54
Tabla 24. Clases de iluminación para zonas de conflicto	54
Tabla 25. Parámetros de selección para la clase P	55
Tabla 26. Clases de iluminación para vías peatonales.	56
Tabla 27. Clases de iluminación para tráfico motorizado	57
Tabla 28. Clases de iluminación áreas críticas.....	57
Tabla 29. Clases de iluminación para vías peatonales	58
Tabla 30. Cálculo de la clase vehicular de la vía de estudio.....	68
Tabla 31. Cálculo de la clase vehicular de la vía de estudio.....	69
Tabla 32. Recomendaciones para la instalación de un sistema de alumbrado vial	73



Lista de figuras

Figura 1.a) Sección transversal de un ojo humano. b) Vista esquemática de la retina, incluyendo a los fotorreceptores conos y bastones.....	3
Figura 2. Rango aproximado de los tipos de percepción visual y de los receptores involucrados.....	4
Figura 3. Banda de longitudes de onda sobre la cual la radiación electromagnética genera la sensación de luz.....	5
Figura 4. Funciones de luminosidad $V_{mes}; m\lambda$ para distintos valores de coeficiente de adaptación m	6
Figura 5. Sensibilidad de los conos dentro del espectro visible.....	7
Figura 6. Factores de reflectancia espectral de un par de pinturas metaméricas.	8
Figura 7. Diagrama de cromaticidad xyY	9
Figura 8. Rangos de temperatura de color.....	10
Figura 9. Reflectividad espectral de una superficie roja	11
Figura 10. Curva $V(\lambda)$, espectro de luz solar y la curva producto de ambas.	13
Figura 11. Ángulo sólido.....	14
Figura 12. Luxómetro.....	15
Figura 13. Tasa de accidentes noche/día versus iluminancia.....	16
Figura 14. Cálculo de iluminancia promedio. Método europeo de los 9 puntos.....	17
Figura 15. Selección de los 9 puntos según configuración de luminarias.....	18
Figura 16. Campo de cálculo de iluminancia.....	19
Figura 17. Iluminancia de una superficie	22
Figura 18. Parámetros para considerar en el cálculo de luminancia	23
Figura 19. Campo de cálculo de luminancia en una calzada	26
Figura 20. Posición de los puntos de cálculo en un carril	27
Figura 21. Tipos de lámparas utilizadas en alumbrado público	29

Figura 22. Relación entre la temperatura absoluta del filamento y la eficiencia luminosa de la lámpara	31
Figura 23. Lámpara incandescente moderna utilizada para iluminación general	32
Figura 24. Principio de generación de luz de una lámpara de descarga de gas.	32
Figura 25. Lámpara de sodio de baja presión en funcionamiento.....	33
Figura 26. Lámparas de vapor de sodio de alta presión	34
Figura 27. Ejemplos de leds y módulos led	37
Figura 28. Factores que influyen en la depreciación luminosa de una fuente	38
Figura 29. Sistema de coordenadas utilizado para proporcionar la información fotométrica de una lámpara	39
Figura 30. Curva isolux de una lámpara led.....	40
Figura 31. Curva polar de una lámpara de alumbrado vial.	40
Figura 32. Disposición Unilateral de Luminarias	49
Figura 33. Ubicación del tramo a simular en el mapa de Piura	64
Figura 34. Sección transversal del tramo a simular	64
Figura 35. Vista longitudinal del tramo de estudio durante el año 2014. En rojo se observan las luminarias ya instaladas en el lado izquierdo de la vía.	64
Figura 36. Vista longitudinal del tramo del tramo de estudio.....	65
Figura 37. Vista longitudinal de los primeros metros de la vía. A la izquierda, se observan dos de las tres únicas luminarias instaladas en ese lado a lo largo de todo el tramo.	65
Figura 38. Lado derecho de la vía, donde se aprecia la ausencia de postes y la iluminación del centro comercial.	66
Figura 39. Lado izquierdo de la vía, notoriamente más iluminado que el derecho. Sin embargo, se verificó que la iluminancia sobre la vía es insuficiente según la norma peruana.	66
Figura 40. Resultados de la simulación de la configuración actual..	70
Figura 41. Simulación de la configuración actual.	71
Figura 42. Lámpara de la colección ClearWay gen 2.	71
Figura 43. Resultados de la simulación de la configuración 1.	74
Figura 44. Simulación de la configuración 1. Nótese la evidente distancia entre el mástil y la acera.	74
Figura 45. Simulación de la configuración 2	75
Figura 46. Resultados de la simulación de la configuración 2	76

Introducción

Es un hecho innegable que, durante la noche, la destreza visual disminuye. Nos resulta más difícil estimar las distancias, diferenciar los colores y somos más susceptibles al deslumbramiento. Si combinamos esta reducción de la capacidad visual con los típicos factores causantes de accidentes de tránsito, como: fatiga (física o mental), imprudencia, impericia y consumo de sustancias estupefacientes, resulta evidente que la oscuridad puede ser un elemento agravante que contribuye a aumentar la frecuencia y severidad de los accidentes.

Esta hipótesis ha sido estudiada en varias ocasiones, por ejemplo, G. Crabb et al. (2012), analizaron la relación entre la iluminación vial y los accidentes de tránsito en el Reino Unido durante un lapso de 5 años. Ellos concluyeron que, a pesar de que existen numerosos factores a considerar, y que la iluminación vial es solo uno de ellos, esta juega un papel importante cuando se trata de disminuir la fatalidad de los accidentes de tránsito.

Además, es necesario mencionar que debido a la inseguridad ciudadana que parece reinar sobre todo nuestro país, una vía vehicular o peatonal a oscuras, puede ser el lugar ideal para encubrir asaltos, robos al paso, secuestros y otras actividades ilícitas. Lamentablemente, esta situación es bien conocida por todos nosotros, quienes día a día debemos acelerar el paso cuando transitamos por una zona oscura o mal iluminada.

Es la intención del autor, con este estudio, simplificar la implementación de un sistema de alumbrado vial eficiente, con el objetivo de disminuir la frecuencia de los accidentes de tránsito y aumentar la sensación de seguridad en los ciudadanos.



Capítulo 1

Marco teórico

1.1 La visión humana

Debido a su papel como principal receptor de la luz emitida por la mayoría de sistemas de iluminación, resulta fundamental conocer las características del ojo humano, particularmente las relacionadas a su sensibilidad y a la fotometría.

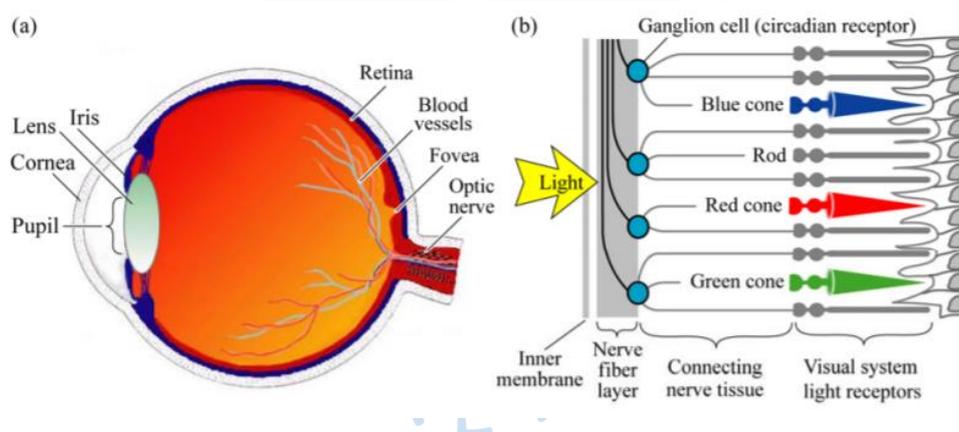


Figura 1.a) Sección transversal de un ojo humano. b) Vista esquemática de la retina, incluyendo a los fotorreceptores conos y bastones.
Fuente: Schubert (2018).

La figura 1, extraída del libro Light Emitting Diodes, presenta una ilustración esquemática del ojo humano. El interior del globo ocular está revestido por la retina, la parte fotosensible del ojo. Esta contiene dos grupos de células fotorreceptoras: los bastones y los conos. En cada ojo, existen aproximadamente 100 millones de bastones, encargados de percibir la luz en todo el espectro visible y 6 millones de conos, especializados en detectar el color. Asimismo, existen tres tipos de conos, los cuales reciben su nombre de acuerdo con los colores que son capaces de detectar: rojos, verdes y azules. La figura b, presenta un esquema de la

estructura celular de la retina, incluyendo a las células ganglionares y las fibras nerviosas que transmiten la información visual al cerebro.

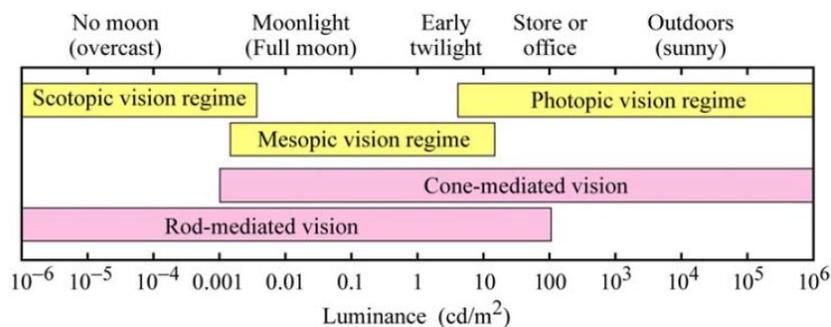


Figura 2. Rango aproximado de los tipos de percepción visual y de los receptores involucrados.
Fuente: Schubert (2018)

De acuerdo con nivel de iluminación, la visión humana se adapta combinando la activación de los fotorreceptores, con el propósito de obtener la mejor definición y claridad posible. En la figura 2, se muestran los tres tipos de percepción visual con los receptores relevantes para cada uno. La visión fotópica se da en condiciones de abundante luz natural, utilizando los conos. Corresponde a valores de luminancia mayores que 3 cd/m². La visión escotópica se da en condiciones de poca luz ambiental (ambientes nocturnos). En este caso, son los bastones quienes hacen posible percibir la luz. Sin embargo, la definición de los colores prácticamente desaparece durante este tipo de visión. En una noche sin luna, por ejemplo, los objetos pierden casi todos sus colores y solo se perciben en diferentes gamas de grises. El nivel escotópico aplica para niveles de luminancia menores que 0.003 cd/m². Finalmente, La visión mesotópica corresponde a los niveles de luminancia entre los valores de las visiones fotópica y escotópica. (Schubert, 2018)

1.2 La luz visible

La radiación electromagnética que provoca la sensación de luz en el ojo humano, llamada comúnmente luz visible, pertenece a una angosta banda de longitudes de onda dentro del espectro electromagnético, normalmente entre 380 a 700 nm. (Sørensen, 2013)

Debido a la complejidad del proceso de visión humano, es imposible definir una sola función de luminosidad que permita predecir el desempeño visual de una persona a través de todos los escenarios posibles de iluminación.

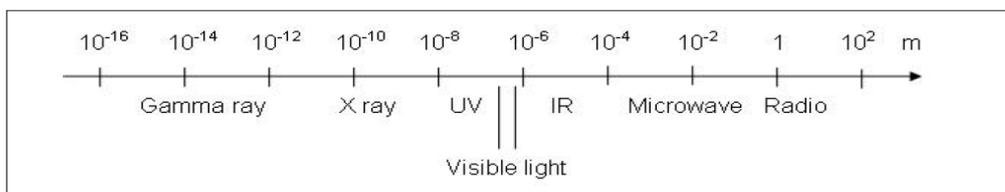


Figura 3. Banda de longitudes de onda sobre la cual la radiación electromagnética genera la sensación de luz.

Fuente: Sørensen (2013)

En lugar de esto, las normativas, especificaciones y descripciones de productos se basan en un pequeño número de funciones de luminosidad internacionalmente aceptadas, que, si bien no representan a detalle el desempeño visual humano, permiten establecer un marco de medición para cuantificar la luz según es percibida por el ojo humano. Estas funciones conforman la base de toda la fotometría y crean un nexo directo entre una determinada cantidad radiométrica y su correspondiente valor fotométrico a través de la siguiente ecuación:

$$X_{V,X} = \frac{K_{cd}}{V_x(\lambda_a)} \int X_{e,\lambda}(\lambda) V_x(\lambda) d\lambda$$

Donde $V_x(\lambda)$ es la función de luminosidad relevante. $V_x(\lambda_a)$ es el valor de esta función en la longitud de onda λ_a en aire estándar correspondiente a una frecuencia de 540×10^{12} Hz; K_{cd} es la eficiencia luminosa espectral para la radiación monocromática de 540×10^{12} Hz, la cual tiene un valor de $683 \text{ lm} \cdot \text{W}^{-1}$ de acuerdo a la definición del Sistema Internacional de la unidad de intensidad luminosa: la candela. (CIE, 2016)

En un principio, solo dos funciones de luminosidad habían sido aceptadas internacionalmente:

- La función fotópica de luminosidad $V(\lambda)$, la cual aplica para “altos” niveles de iluminación (por ejemplo, luz diurna o interiores iluminados). Donde la visión humana es dominada por la actividad de los conos en la retina, mientras los bastones se mantienen relativamente inactivos. La definición de los colores y la capacidad para percibir detalles en el campo visual son óptimas.
- La función escotópica de luminosidad $V'(\lambda)$, aplicable en ambientes de “baja” iluminación (por ejemplo, escenarios nocturnos). Donde solos los bastones están activos, por lo tanto, la agudeza visual y la definición de colores es pobre.

Sin embargo, con el pasar de los años, se establecieron otras funciones de luminosidad aplicables para diferentes condiciones específicas. En el 2010, con el objetivo de ofrecer una

transición fluida entre las condiciones fotópicas y escotópicas, el CIE estableció un procedimiento integral para la medición de magnitudes fotométricas para todos los niveles de luz. Bajo este sistema, llamado MES2, la función de luminosidad relevante se define como:

$$M(m)V_{mes;m}(\lambda) = mV(\lambda) + (1 - m)V'(\lambda) \quad 0 \leq m \leq 1$$

Donde el coeficiente de adaptación m , puede determinarse a través de la luminancia fotópica de adaptación y la función $M(m)$ es un factor normalizador, tal que $V_{mes;m}(\lambda)$ siempre alcance un valor máximo de 1. Si la luminancia mesópica del campo de adaptación es de $5 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$ o más, el valor de m es la unidad, pero si es menor que $0.005 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$, entonces su valor es cero.

Las funciones de luminosidad para distintos valores del coeficiente de adaptación m , se muestran en la figura 3. (CIE, 2010)

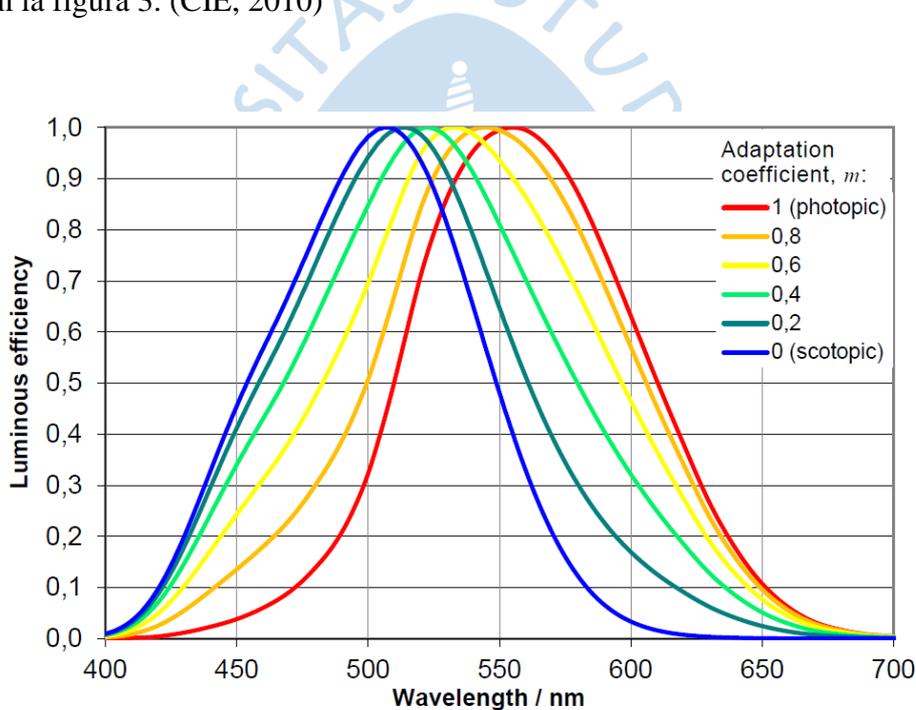


Figura 4. Funciones de luminosidad $V_{mes;m}(\lambda)$ para distintos valores de coeficiente de adaptación m
Fuente: CIE (2016)

1.3 Percepción de color

Cuando la luz estimula la retina, esta es absorbida por las células fotorreceptoras e interpretada en señales neurológicas. Como se ilustra en la figura 5, cada uno de los tres tipos de conos tiene una curva de sensibilidad espectral diferente, las cuales, además, presentan una evidente superposición entre ellas, la cual es necesaria para distinguir la luz en diferentes

longitudes de onda. Por ejemplo, si las longitudes de onda en el rango de 540 a 570 nm activasen solamente uno de los tres tipos de conos, sería imposible distinguir la gama de colores en ese rango (A. Robertson, 1992).

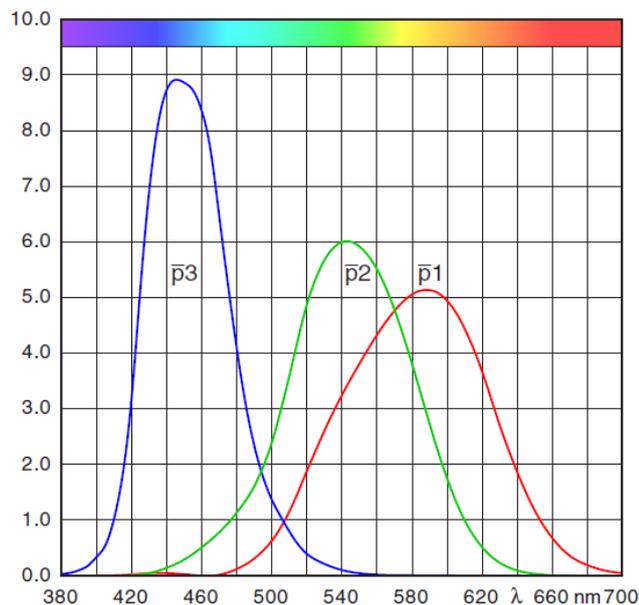


Figura 5. Sensibilidad de los conos dentro del espectro visible

Fuente: Hoffman (2003)

La consecuencia inevitable de un sistema visual con solo tres tipos de fotorreceptores es que varias distribuciones de radiancia espectral pueden ser percibidas como el mismo color por el ojo humano. Por ejemplo, aproximadamente 6 vatios de radiación a 540 nm mezclados con aproximadamente 25 vatios a 650 nm tendrán el mismo efecto sobre los tres tipos de conos que aproximadamente 10 vatios de radiación a 580 nm. Los estímulos con estas características son conocidos como metámeros.

En la figura 6, se muestran las curvas de reflectividad espectral de dos pinturas, que, al ser expuestas a la luz diurna natural, reflejan distribuciones de radiancia espectral diferentes, pero producen exactamente la misma absorción en los tres tipos de conos y, por lo tanto, el mismo color percibido para el observador promedio.

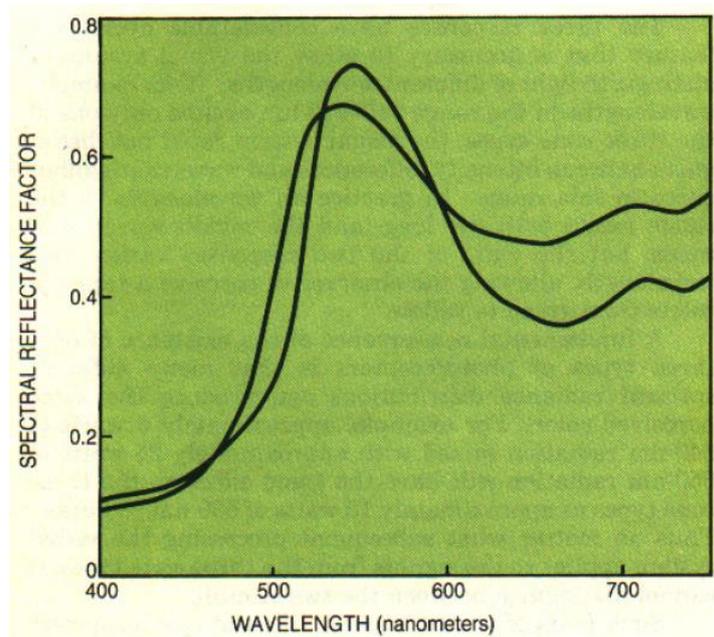


Figura 6. Factores de reflectancia espectral de un par de pinturas metaméricas.
Fuente: A. Robertson (1992)

1.3.1 Espacio de color CIE 1931

La definición completa de un estímulo de color es multidimensional, debido a que existe una radiancia para cada longitud de onda en el espectro visible, pero ya que el color percibido por la visión humana es solamente tridimensional, es necesario establecer un nexo cuantitativo entre las distribuciones de longitudes de onda en el espectro electromagnético y el color fisiológicamente percibido por la visión humana, tal que todos los estímulos metaméricos tengan la misma especificación tridimensional. Consecuentemente, las especificaciones del color están basadas en el sistema conocido como espacio de color CIE de 1931. Este consiste en tres funciones ponderativas $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$ conocidas como funciones de coincidencia de color y son utilizadas para calcular tres “valores triestímulo” – X, Y y Z– según las siguientes ecuaciones:

$$X = \kappa \int L(\lambda) \bar{x}(\lambda) d\lambda$$

$$Y = \kappa \int L(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda$$

$$Z = \kappa \int L(\lambda) \bar{z}(\lambda) d\lambda$$

Donde λ es la longitud de onda, $L(\lambda)$ es la función del estímulo de color (radiancia en función de la longitud de onda) y κ es una constante normalizadora. Los límites de integración coinciden con los límites del espectro visible (entre 380 y 780 nm). El sistema se basa en los resultados de una serie de experimentos empíricos sobre las características promedio de coincidencia de color de varios observadores y en suposiciones de linealidad y aditividad.

Una característica muy útil de este sistema es que $\bar{y}(\lambda)$ fue escogida de manera que el valor triestímulo Y es proporcional a la luminancia y por lo tanto el plano XZ contiene todas las cromaticidades posibles a una luminancia determinada (A Robertson, 2013).

A menudo es conveniente también calcular los valores x e y , llamados coordenadas de cromaticidad:

$$x = X/(X + Y + Z)$$

$$y = Y/(X + Y + Z)$$

Finalmente, el color psicofísico (la radiación visible interpretada por la visión humana) puede ser especificado como (Y, x, y) , donde Y representa la cantidad de luz y el par (x, y) la calidad cromática del estímulo. El diagrama resultante de graficar (x, y) en coordenadas rectangulares se conoce como diagrama de cromaticidad CIE 1931 y se ilustra en la figura 7.

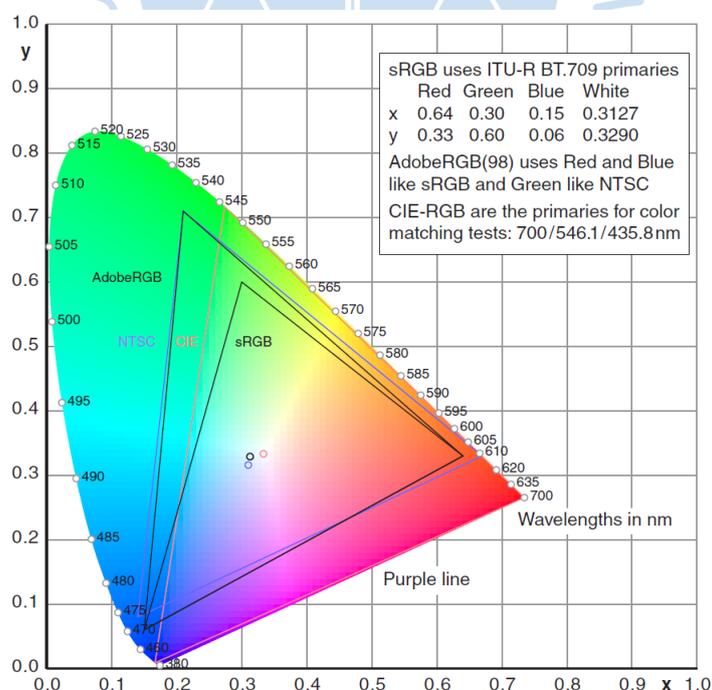


Figura 7. Diagrama de cromaticidad xyY
Fuente: Hoffman (2003)

1.3.2 Temperatura de color

La temperatura de color es una medida descriptiva del color de la luz emitida por una fuente. Esta se obtiene al compararla con el color de la radiación que emitiría un cuerpo negro calentado a una temperatura determinada medida en Kelvin. Los colores correspondientes a temperaturas mayores a 5000 K son llamados “colores fríos” (azules y blancos), mientras que los colores con temperaturas menores a 2700 K son llamados “colores tibios” (naranjas y amarillos) (Sørensen, 2013).

Según las pautas proporcionadas por la guía de iluminación Premium Light Pro (2017), el color de la luz utilizada para alumbrado público, normalmente varía entre amarillenta, neutral y blanco- azulada, correspondiendo a una temperatura de color de entre 2500 a 5000 kelvin. Para determinar la temperatura de color a elegir para una determinada aplicación, debe considerarse que esta tiene influencia sobre la eficiencia energética del sistema y puede causar efectos fisiológicos sobre los humanos y animales.

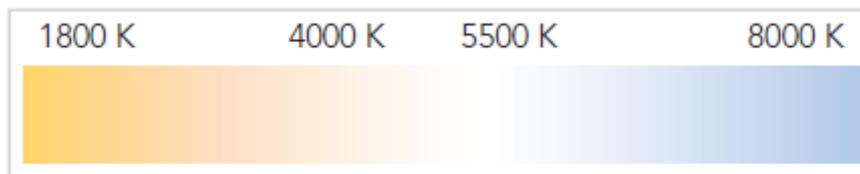


Figura 8. Rangos de temperatura de color
Fuente: Premium Light Pro Guidelines (2017)

Por ejemplo, las luces frías y blancas (alta temperatura de color) proporcionan la máxima eficiencia energética en un sistema de iluminación, aunque, por otro lado, si la iluminación es excesiva o la estrategia de instalación no es adecuada, puede afectar el ciclo de sueño humano y desorientar o ahuyentar a los animales de sus hábitats. Además, en esta guía también se menciona que numerosos estudios han demostrado que el ojo humano tiene mayor sensibilidad a la luz blanca que a la luz amarilla (Premium Light Pro Guidelines, 2017, p. 9), y, por lo tanto, esta es percibida con mayor intensidad. Consecuentemente, la luz blanca puede ser preferida para escenarios viales complejos, donde existan múltiples usuarios (autos, ciclistas y peatones), mientras que la luz amarilla puede ser más adecuada para áreas domésticas.

1.3.3 Reproducción cromática

El color de una superficie solo puede ser descrito en función de la luz que incide sobre ella (Sørensen, 2013). Por ejemplo, en la figura 9, se ha graficado la reflectividad espectral de una superficie roja, la cual posee ese color porque solamente refleja la radiación

electromagnética cuya longitud de onda pertenece a la banda denominada como roja. Sin embargo, el color aparente o percibido depende de la fuente luminosa. Es decir, si la superficie fuera iluminada por una lámpara de sodio de baja presión con una línea espectral a 589 nm, la superficie será percibida como negra ya que la reflectividad de la superficie es virtualmente 0 a esa longitud de onda. Por otro lado, si fuera iluminada con luz natural, entonces se apreciaría claramente de un color rojo brillante, debido al amplio espectro que posee la luz solar (Ver figura 10).

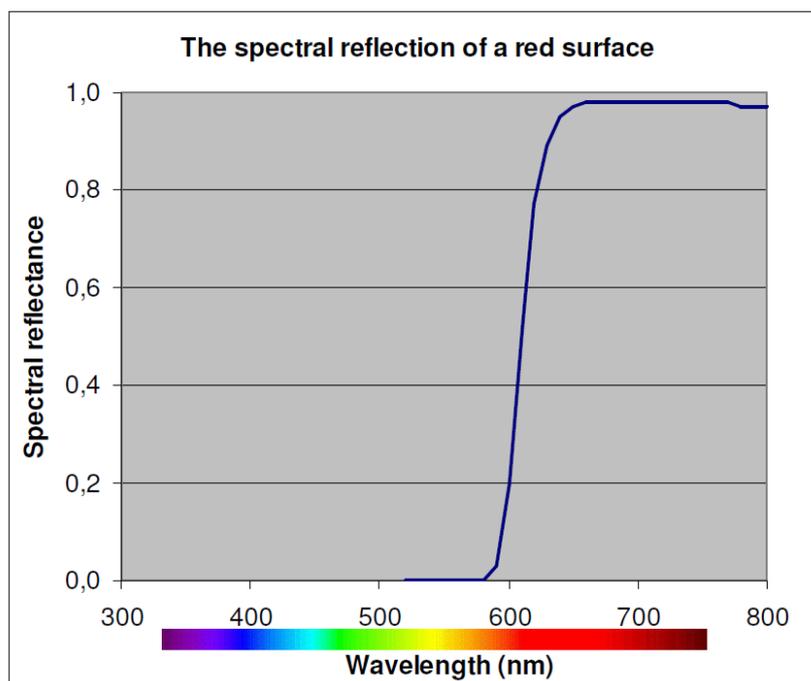


Figura 9. Reflectividad espectral de una superficie roja
Fuente: Sørensen (2013)

Para determinar la reproducción cromática de cualquier fuente luminosa, se desarrolló un procedimiento estandarizado que sigue las siguientes pautas:

- Se utilizan 8 superficies de prueba de diferentes colores.
- Los colores de las superficies de prueba se determinan utilizando la fuente luminosa en cuestión.
- Los colores de las superficies de prueba se determinan utilizando radiación de cuerpo negro con una temperatura de color igual a la de la fuente luminosa en cuestión.
- Se comparan ambos grupos de colores y se determina una calificación final.

Al final de este procedimiento se obtiene el índice de reproducción cromática (R_a) en una escala del 0 al 100%. Donde obviamente el máximo puntaje lo tendría la radiación de cuerpo negro.

1.4 Unidades fotométricas

Las características y unidades utilizadas en fotometría, son en realidad versiones modificadas de las usadas en el análisis radiométrico de la luz, considerando la sensibilidad y percepción de la visión humana. En la tabla 1 se presenta una comparación de estas características, símbolos y unidades, mientras que en la figura 10, se muestra una función de luminosidad $V(\lambda)$ junto con el espectro de luz solar y la curva producto de ambas.

Tabla 1. Comparación de características, símbolos y unidades usadas en radiometría y fotometría.

Concepto	Radiometría			Fotometría		
	Característica	Símbolo	Unidad	Característica	Símbolo	Unidad
Emisión total	Potencia irradiada	P	W	Flujo Luminoso	ϕ	lm
Intensidad en una dirección	Intensidad radiante	I	W.sr ⁻¹	Intensidad Luminosa	I	cd
Intensidad sobre una superficie	Irradiancia	E	W.m ⁻²	Iluminancia	E	lx
Intensidad en una dirección desde una superficie	Radiancia	L	W.sr ⁻¹ .m ⁻²	Luminancia	L	cd.m ⁻²

Fuente: Elaboración propia

El área bajo la curva producto corresponde a una irradiancia de 195 W.m² y representa la percepción humana del espectro solar al utilizar la curva $V(\lambda)$ como factor de ponderación. Este valor puede convertirse a magnitudes fotométricas multiplicándolo por el factor estándar de 683 lm.W⁻¹. El resultado es un valor de iluminancia 133000 lm.m⁻² o de 133000 lx. De esta manera es como se puede obtener valores fotométricos a partir de un enfoque radiométrico. Los vatios (W) son reemplazados por los lúmenes (lm) y en algunas ocasiones, unidades derivadas son relevadas por unidades nuevas, como en la sustitución de lm.m⁻² por lux (lx).

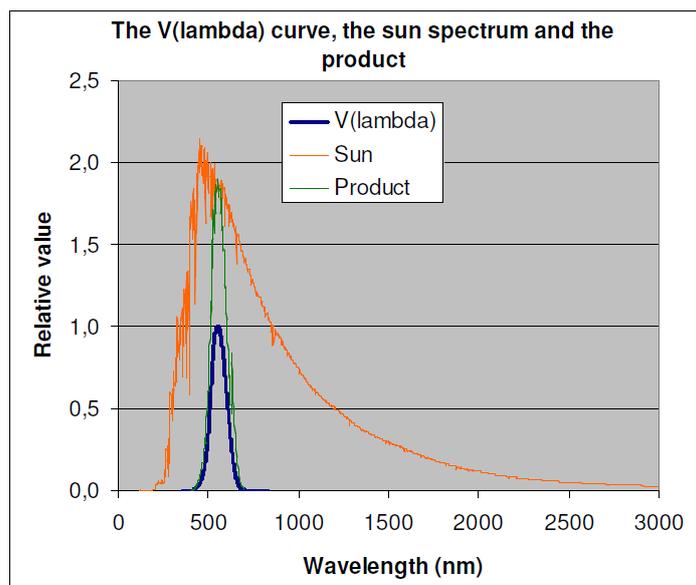


Figura 10. Curva $V(\lambda)$, espectro de luz solar y la curva producto de ambas.
Fuente: Sørensen (2013)

1.4.1 Flujo Luminoso

El flujo luminoso producido por una fuente es la energía radiante percibida por el ojo humano como luz visible, de acuerdo con la función de luminosidad relevante, en un segundo. Se representa con la letra griega phi (Φ) y se mide en lúmenes. Según el Sistema Internacional de Unidades, un lumen es el flujo luminoso emitido por una fuente de radiación monocromática de $540 \cdot 10^{12}$ Hz y un flujo radiante de $1/683$ W.

El desempeño luminoso de una fuente de luz permite relacionar el flujo emitido por esta fuente con la potencia eléctrica consumida para conseguirlo. Se representa con la letra griega épsilon ε y se mide en lm/W.

$$\varepsilon = \frac{\Phi}{P} \quad (\text{lm/W})$$

Si una lámpara fuera capaz de transformar toda la energía eléctrica que consume en radiación monocromática con una longitud de onda de 555 nm, está lámpara alcanzaría el máximo desempeño teórico posible, cuyo valor sería 683 lm/W.

1.4.2 Intensidad luminosa

Para definir la intensidad luminosa adecuadamente, primero es necesario explicar el concepto de *estereorradián*. De la misma manera en la que un ángulo plano medido en

radianes define una superficie, un ángulo sólido determina un volumen, cuya unidad de medida son los estereorradianes. Un estereorradián se define como el ángulo sólido correspondiente a un casquete esférico cuya superficie equivale al cuadrado del radio de la esfera.

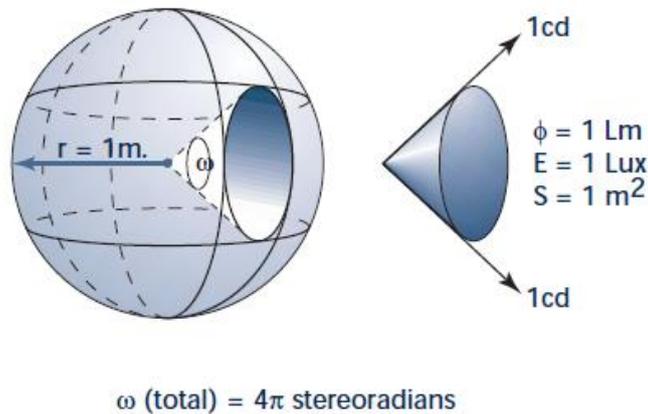


Figura 11. Ángulo sólido
Fuente: INDALUX (2002)

La intensidad luminosa (I) de una fuente de luz en una dirección específica es igual a la relación entre el flujo luminoso y un ángulo sólido cuyos ejes coinciden con la dirección considerada. La intensidad luminosa se mide en candelas (cd), la cual es una unidad fundamental del Sistema Internacional. La definición actual de candela es la siguiente: “Una fuente de luz monocromática emitiendo un flujo radiante de $1/683$ W a 555 nm hacia un ángulo sólido de 1 estereorradián, tiene una intensidad luminosa de 1 candela” (Schubert, 2018)

1.4.3 Iluminancia

La iluminancia es la relación entre el flujo luminoso emitido por una fuente y el área (S) sobre la cual incide. Se representa con la letra E y se mide en lux (lx). De acuerdo al Sistema Internacional, un lux se define como la iluminancia de una cierta superficie sobre la cual incide un flujo luminoso de 1 lumen, distribuido sobre un metro cuadrado de dicha área.

$$E = \frac{\phi}{S} \quad (lx = \frac{lm}{m^2})$$

La iluminancia se mide utilizando un dispositivo llamado luxómetro, el cual consiste en una celda fotoeléctrica que genera una corriente eléctrica proporcional a la luz que incide sobre su superficie. Esta señal es posteriormente interpretada y presentada en una pantalla, directamente en luxes.



Figura 12. Luxómetro
Fuente: INDALUX (2002)

El uso de la iluminancia como parámetro de diseño en sistemas de alumbrado público, se remonta a los primeros intentos de estandarizar esta práctica. En 1927, la Norma Británica 307 determinó ocho categorías de iluminación, definidas a partir de la altura mínima de instalación de la luminaria y la proporción máxima de la distancia entre luminarias y su altura (S. Fotios & R Gibbons, 2018). En esta normativa se asignaron también valores mínimos de iluminancia para cada clase. Sin embargo, esto solo se hizo con el propósito de calificar el tamaño de la instalación y carecía de respaldo teórico alguno.

Esta falta de rigor científico en el diseño de sistemas de iluminación era posible debido a la limitada variedad de lámparas disponibles durante la época. Por ejemplo, podemos observar en la tabla 2 que inclusive en la Norma Británica de 1974, la distancia de instalación entre luminarias debía determinarse de acuerdo con el ancho de la vía a iluminar.

Tabla 2. Método prescriptivo para determinar la iluminación necesaria para una carretera, basado en la Norma Británica de 1974

Categoría de distribución luminosa	Altura (m)	Flujo mínimo en el hemisferio inferior (lm)	Espacio de diseño (m)										
			Anchura efectiva de la vía (m)										
			11	12	13	14	15	16	17	18	20	22	24
Cut off	10	12000	33	33	33	31	29	27	26	24	22		
	12	20000			40	40	40	40	37	35	32	29	26
Semi cut off	10	12000					44	44	42	40	36		
	12	20000							53	53	52	47	43

Fuente: S. Fotios et al, 2018

Posteriormente, en 1972, se crearon las recomendaciones de la Sociedad de Ingeniería de Iluminación de Norteamérica (IESNA, por sus siglas en inglés), derivadas del trabajo de Paul C. Box, quién examinó la relación entre la iluminancia y los accidentes de tránsito en un tramo de 203 millas de carretera. En primera instancia, Box evaluó la presencia versus la ausencia de iluminación vial. Según sus estudios, la ratio de accidentes noche/día para un escenario iluminado y no iluminado fue de 1.43 y 2.37 respectivamente. Usando estos resultados, concluyó que la iluminación vial redujo la frecuencia de accidentes en un 40% aproximadamente. Posteriormente, se enfocó en determinar el nivel óptimo de iluminación necesaria. En la figura 13 podemos observar los resultados de sus experimentos.

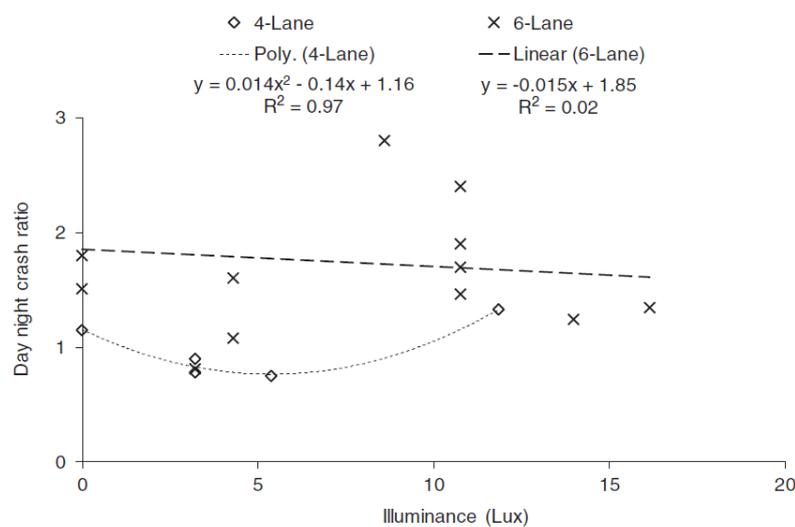


Figura 13. Tasa de accidentes noche/día versus iluminancia.
Fuente: S. Fotios & et al, 2018

Box concluyó que las vías con los menores valores de iluminancia (entre 3.2 y 6.4 lux) presentaban una tasa de accidentes noche/día menor que las vías con mayor iluminancia. Este resultado, aunque a primera vista podría parecer contradictorio, refleja el efecto de un nivel de iluminancia demasiado alto, el cual puede ocasionar deslumbramiento, afectando el tiempo de adaptación del conductor y aumentando la probabilidad de un accidente. A pesar de estos resultados tan interesantes, estudios posteriores concluyeron que el análisis estadístico de Box no era representativo. En primer lugar, porque si bien los resultados para una vía de 4 carriles se ajustan bastante bien a una curva de regresión polinomial, esto no sucede con la data obtenida de las vías de 6 carriles. Esto lleva a suponer que la iluminancia no es el único factor influyente en la frecuencia de accidentes de tránsito nocturnos. Además, este estudio se aplicó solamente en autopistas. Por lo tanto, los niveles de iluminancia establecidos para otras categorías viales carecen de respaldo empírico. A pesar de estas limitaciones, el valor

de 5 lux sugerido por Box, ha sido considerado en normativas posteriores y convertido a valores de luminancia (S. Fotios & R. Gibbons, 2017). Actualmente, la iluminancia se utiliza cuando el diseño por luminancia no es viable, por ejemplo, en intersecciones o en vías de bajo tránsito.

1.4.3.1 Cálculo

De acuerdo al Reglamento Técnico de Iluminación y Alumbrado Público de Colombia - RETILAP (Ministerio de Minas y Energía de Colombia, 2010), para calcular la iluminancia necesaria en un sistema de alumbrado público, es necesario considerar el propósito, características y detalles del espacio a iluminar. El nivel de iluminancia requerida está directamente relacionado con la intensidad del tráfico y la velocidad media de los vehículos que transitan. Existen métodos manuales para calcular la iluminancia en un punto determinado o la iluminancia promedio de un área. Sin embargo, a partir de la introducción de métodos de cálculo computarizados más rápidos y precisos, estos han caído en desuso. No obstante, el método europeo de los 9 puntos es un precedente importante de muchos métodos computarizados de cálculo. Por esta razón, será considerado y explicado en este estudio.

Primero, es necesario inscribir la porción a iluminar en un rectángulo de dimensiones $\frac{S}{2} \times W$ (largo por ancho). A continuación, se biseca el rectángulo longitudinal y transversalmente. De esta manera obtenemos los 9 puntos de intersección considerados en el método (ver figura 14).

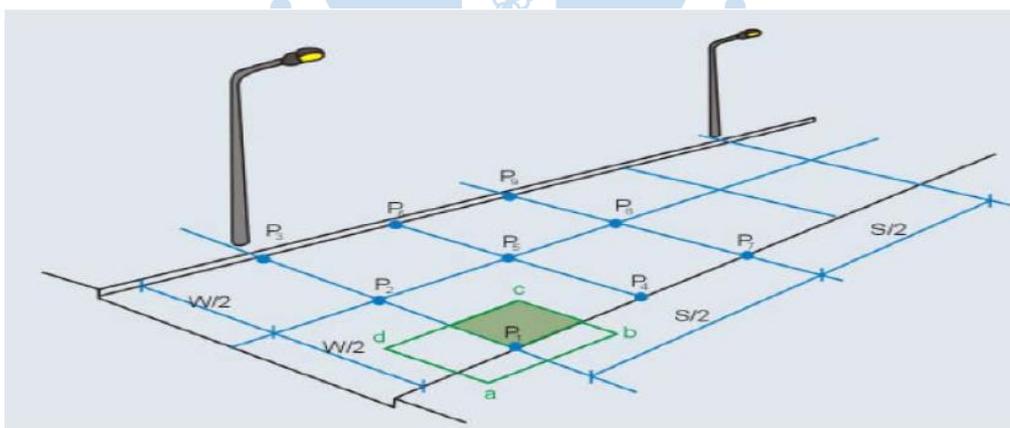


Figura 14. Cálculo de iluminancia promedio. Método europeo de los 9 puntos.
Fuente: Ministerio de Minas y Energía de Colombia (2010)

Se considera la iluminancia en cada uno de los puntos de análisis como la correspondiente a un rectángulo de dimensiones $\frac{S}{2} \times \frac{W}{2}$. Por lo tanto, la iluminancia promedio sobre la vía se calcula

considerando las contribuciones individuales de cada punto sobre el área de análisis. Así, la iluminancia E_1 , calculada en el punto P_1 corresponde al área limitada por el rectángulo a-b-c-d. Sin embargo, solo la cuarta parte de este pertenece al área de análisis (área sombreada en la figura x). Lo mismo sucede en los puntos P_3 , P_7 y P_9 , por lo tanto, la contribución de esos puntos debe ser ponderada al 25%. Siguiendo el mismo razonamiento, los puntos P_2 , P_4 , P_6 , y P_8 solo aportan el 50% de su iluminancia al análisis. El punto P_5 , por el contrario, representa un área completamente inscrita al área de análisis y, por lo tanto, su contribución es total.

A partir de la lectura de iluminancia en cada uno de los 9 puntos, la iluminancia promedio sobre la vía se calcula según:

$$E_{prom} = \frac{1}{16} [(E_1 + E_3 + E_7 + E_9) + 2(E_2 + E_4 + E_6 + E_8) + 4E_5]$$

Siendo $E_1, E_2 \dots E_9$ las iluminancias en los puntos $P_1, P_2 \dots P_9$ respectivamente.

La figura 15 proporciona una guía para ubicar los 9 puntos, Según la forma de la vía y a las diferentes distribuciones posibles de las luminarias.

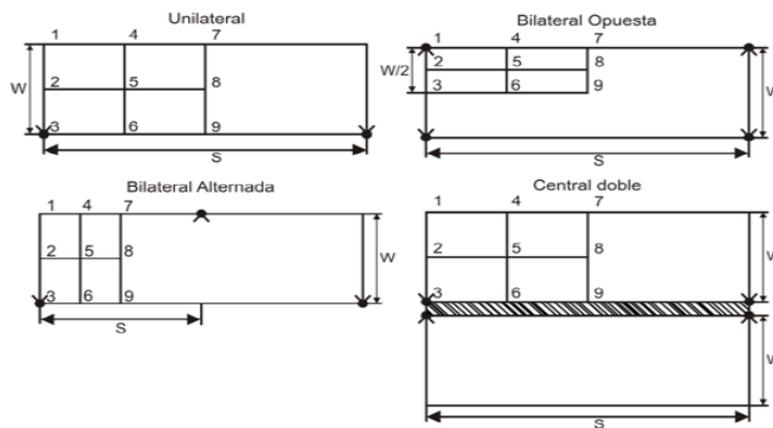


Figura 15. Selección de los 9 puntos según configuración de luminarias.
Fuente: Ministerio de Minas y Energía de Colombia (2010)

Una vez establecidas las posiciones de los puntos, es necesario determinar el campo de cálculo, el cual debe incluir todas las áreas de interés para conductores y peatones: calzadas, aceras y ciclovías. Esta área se limita por los bordes de las calzadas (incluyendo ciclovías y zonas peatonales) y por líneas transversales a través de dos luminarias consecutivas.

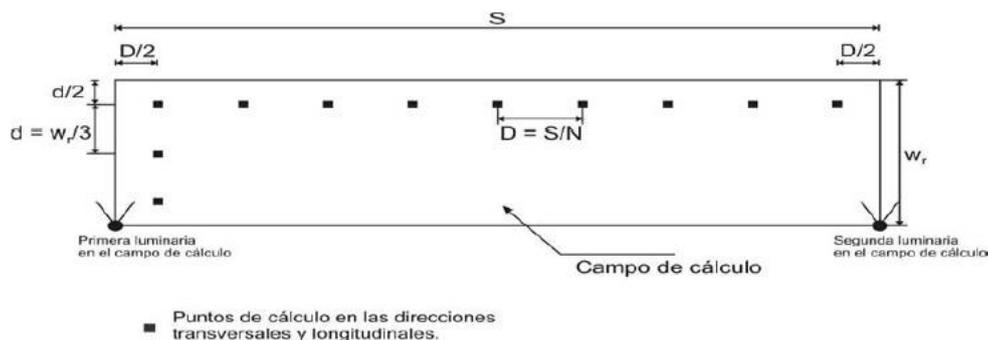


Figura 16. Campo de cálculo de iluminancia.
Fuente: Ministerio de Minas y Energía de Colombia (2010)

Los puntos de cálculo deben ser equidistantes entre sí dentro del campo y su número debe determinarse de la siguiente manera:

En la dirección longitudinal, la distancia se establece según la ecuación

$$D = S/N$$

D = distancia longitudinal entre puntos de cálculo.

S = distancia entre luminarias.

N = Cantidad de puntos de cálculo en la dirección longitudinal. Adopta los siguientes valores:

Para $S \leq 30$, $N=10$.

Para $S > 30$ m, N debe tener un valor entero tal que $D \leq 3$ m.

La primera fila transversal de puntos de cálculo deben estar a una distancia mayor que $d/2$ de la primera luminaria.

En la dirección transversal, la distancia (d) se determina según:

$$d = W_r/3$$

d = distancia transversal entre puntos de cálculo.

W_r = ancho de la calzada o del área aplicable

Para el cálculo, se deben considerar a las luminarias que estén dentro de un valor igual a cinco veces la altura de montaje desde el punto de cálculo.

Cálculo en aceras y ciclovías

Los puntos de cálculo deben ser equidistantes entre sí y el número se determina de la siguiente manera:

En la dirección longitudinal, si las aceras o ciclovías pertenecen a la misma clase de iluminación que la calzada, pueden considerarse dentro del mismo campo de cálculo. Caso contrario, se determina un nuevo campo de cálculo de acuerdo a la figura 16.

En la dirección transversal, se debe aplicar la siguiente fórmula:

$$df = Wf/n$$

df = distancia transversal entre puntos de cálculo.

Wf = ancho de la acera o ciclovía.

n = número de puntos en la dirección transversal con los siguientes valores:

Para $Wf \leq 1m$, $n=1$, para Wf mayor que 1, n debe tener un valor tal que $df \leq 1 m$.

La distancia entre el borde de la calzada y los puntos adyacentes debe ser la mitad de la distancia entre puntos. Para el número de luminarias a considerar en el cálculo, se aplica el mismo criterio de las calzadas.

1.4.3.2 Uniformidad general de iluminancia

Para lograr una iluminación vial adecuada, no solo es necesario que la iluminancia sea suficientemente alta, sino también que esté equitativamente distribuida sobre al área iluminada, es decir, que no existan puntos mucho más iluminados que otros. Para este propósito se definió el coeficiente de uniformidad general de iluminancia, el cual se calcula según los siguientes criterios:

a. Como $U_o = E_{min}/E_{prom}$ tomando como base los n puntos evaluados en el campo típico de la vía. Ya sean los 9 puntos del método europeo o los 20 a más del método computacional, donde:

E_{min} corresponde al punto de menor iluminancia entre todos los puntos calculados.

E_{prom} corresponde al valor promedio de los n puntos considerados en el análisis, según la fórmula:

$$E_{prom} = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} E_i}{n}$$

Dónde:

E_i : Valor de la iluminancia en cada punto

n : Número de puntos o áreas consideradas en el cálculo.

E_{prom} : Iluminancia promedio de la vía o zona considerada

b. Como $U_g = E_{\min}/E_{\max}$, donde:

E_{\min} : punto de menor iluminancia de todos los puntos calculados.

E_{\max} : punto de mayor iluminancia de todos los puntos calculados.

1.4.3.3 Coeficiente de iluminación de alrededores

Uno de los objetivos principales del alumbrado público es iluminar la calzada de manera que los objetos sobre ella puedan ser percibidos con claridad. Sin embargo, cuando los objetos están elevados sobre la vía, sus partes superiores contrastan con los alrededores; lo mismo sucede si los objetos están al borde o en una sección curva de la calzada. Debido a esto, el contraste entre el objeto y el fondo podría no ser suficiente para una pronta percepción por parte del conductor. En consecuencia, controlar la iluminancia de los alrededores permite al conductor reconocer fácilmente el entorno y conducir de manera segura. Esto se consigue al considerar el coeficiente de iluminación de alrededores (SR, *surround ratio*) en el diseño del sistema de alumbrado.

El coeficiente de iluminación de alrededores es igual a la iluminancia horizontal promedio de dos franjas longitudinales adyacentes y externas al borde de la calzada, dividida por la iluminancia horizontal promedio de dos franjas longitudinales adyacentes e internas al borde de la calzada. El ancho de las cuatro franjas debe ser igual a 5 m o la mitad del ancho de la calzada. Para calzadas dobles, ambas calzadas deben analizarse como si fueran una sola, a menos que la distancia entre ellas sea mayor a 10 metros. Para realizar el cálculo de la iluminancia promedio en las franjas longitudinales, debe utilizarse el mismo procedimiento que el utilizado para las vías peatonales.

1.4.4 Luminancia

La luminancia describe la intensidad luminosa por unidad de área en una dirección determinada. Se representa por la letra L y su unidad es la candela/m² o nit. En el ámbito del diseño de un sistema de alumbrado público, se refiere específicamente a la intensidad luminosa reflejada desde la superficie de la vía hacia el campo de visión del conductor. (INDALUX, 2002). El área proyectada es percibida por el observador en la dirección de la intensidad luminosa. Esta área se calcula al multiplicar el área real iluminada por el coseno del ángulo formado entre la dirección normal al plano de incidencia y la dirección de observación, según se aprecia en la figura 17.

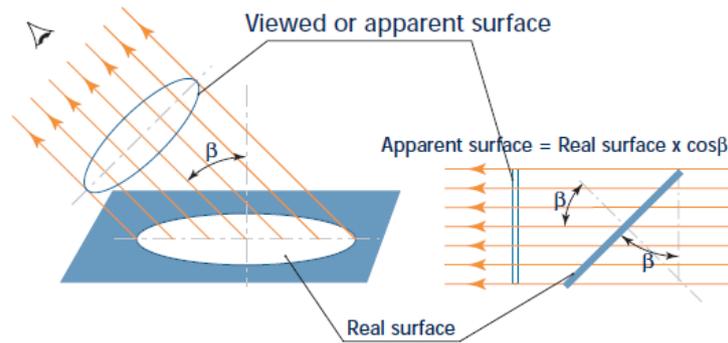


Figura 17. Iluminancia de una superficie
Fuente: INDALUX (2002)

El concepto de luminancia fue desarrollado durante la década de 1970, posteriormente fue documentado por el CIE en 1982 y aceptado por IESNA en 1983. Para incluir a la luminancia como criterio fotométrico, la IESNA convirtió los criterios de iluminancia ya existentes en valores de luminancia utilizando la clasificación de pavimentos. Esto debido a que, la luminancia en cualquier punto de la superficie de una vía, además de ser función de la iluminancia, lo es también del pavimento y de sus propiedades físicas, como textura, color y reflectividad. Por lo tanto, el método de luminancia requiere conocimiento de las propiedades y el estado del material de la calzada y de la geometría entre la fuente de luz y la posición de observación relativa a un punto en la superficie de la vía.

La necesidad de asumir el punto y la dirección de observación para realizar el cálculo de luminancia limita este método a los escenarios donde esto es posible, generalmente en autopistas y carreteras. En intersecciones o áreas de conflicto, donde distintos puntos de observación son igualmente probables, el diseño basado en iluminancia se mantiene. (S Fotios et al, 2018)

1.4.4.1 Coeficiente de luminancia

Es la relación entre la luminancia y la iluminancia en una superficie en condiciones específicas de iluminancia y observación (Sørensen, 2013) se define según:

$$q = \frac{L}{E_h}$$

q = Coeficiente de luminancia en el punto P

L = Luminancia en el punto P

E_h = Iluminancia horizontal en el punto P

El coeficiente de luminancia es función de la dirección de incidencia, de la intensidad luminosa, de la dirección de observación y de los cuatro ángulos (α , β , γ y δ) presentados en la figura 18.

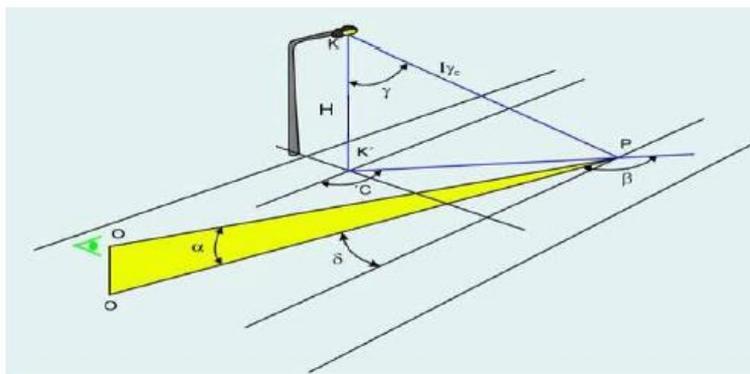


Figura 18. Parámetros para considerar en el cálculo de luminancia
Fuente: Ministerio de Minas y Energía de Colombia (2010)

Según lo indicado por el RETILAP (Ministerio de Minas y Energía de Colombia, 2010), Dentro del área de calzada relevante para un conductor, comprendida entre 60 m y 160 m delante de él, α varía sólo entre 0.5° y 1.5° . Por lo tanto, resulta conveniente para simplificar el cálculo, considerar que α mantiene un valor constante de 1° . Asimismo, el ángulo δ , que varía entre 0° y 20° , tampoco es un factor determinante y por lo tanto se puede prescindir de él. Estas simplificaciones son práctica común y se adhieren al estándar CIE. Finalmente, el coeficiente de luminancia termina dependiendo de las posiciones del observador y de la fuente de luz con respecto al punto considerado.

$$q = f(\beta, \gamma)$$

De esta manera, q puede tabularse en función de las variables β y γ , considerando además el resto de factores que identifican las características reflectivas de la calzada.

En conclusión, la luminancia puede definirse según:

$$L = q \cdot E$$

$$E = \frac{I}{H^2} (q \cdot \cos^3 \gamma)$$

$$L = \frac{I}{H^2} (q \cdot \cos^3 \gamma)$$

El término $(q \cdot \cos^3 \gamma)$ se conoce como **coeficiente reducido de luminancia** (r), por lo tanto:

$$L = \frac{1}{H^2} I \cdot r$$

1.4.4.2 Cálculo

Para calcular la luminancia de una superficie se utilizan las llamadas Tablas R, las cuales caracterizan las propiedades reflectivas del área de análisis según el coeficiente reducido de luminancia.

A través de ellas, el cálculo resulta muy sencillo, ya que solo es necesario determinar los ángulos β y γ para obtener el factor r . La intensidad luminosa y la altura de montaje se determinan a partir de la matriz de intensidades de la luminaria y de la geometría del sistema, respectivamente. Sin embargo, como paso previo, las propiedades de la superficie deben definirse según los siguientes parámetros característicos:

- El factor especular S_1 , que a su vez se define como la relación $r_{(0,2)}/r_{(0,0)}$
- El factor especular S_2 , definido como $Q_o / r_{(0,0)}$
- El coeficiente promedio de luminancia Q_o , conocido también como grado de calidad de la superficie.

$r_{(0,2)}$ es el coeficiente reducido de luminancia evaluado para $\beta = 0^\circ$ y $\tan \gamma = 2$
 $r_{(0,0)}$ es el coeficiente reducido de luminancia evaluado para $\beta = 0^\circ$ y $\tan \gamma = 0$

$$Q_o = \frac{\int_{\omega} q d\omega}{\int_{\omega} d\omega}$$

Donde:

q = Coeficiente de luminancia (depende de los ángulos β y γ)

ω = Ángulo sólido que contiene todas las direcciones de incidencia de luz sobre un punto en la vía consideradas en el cálculo. (β varía entre 0° y 180° y γ varía entre 0° y 90°).

Si el diseñador decide verificar en sitio los cálculos de luminancia, debe hacerlo utilizando los tres parámetros mencionados. En los casos en los que este procedimiento no es aplicable, estos parámetros pueden ser estimados usando los valores normalizados presentados en la tabla 3.

Tabla 3. Clasificación de superficies según el factor S1.

Clase	Variación S1	S1	S2	Q0	Reflexión
R1	$S1 < 0,42$	0,25	1,53	0,1	Casi difusa
R2	$0,42 \leq S1 < 0,85$	0,58	1,8	0,07	Difuso especular
R3	$0,85 \leq S1 < 1,35$	1,11	2,38	0,07	Ligeramente especular
R4	$S1 \geq 1,35$	1,55	3,03	0,08	Especular

Fuente: Ministerio de Minas y Energía de Colombia (2010)

Cada tipo de superficie de calzada de la misma clase se caracterizará a través de una sola tabla R. Las características definidas de las cuatro tablas R, según el patrón establecido por la CIE se presentan en la tabla 4.

Tabla 4. Designación aproximada de superficies en las clases típicas.

Clase	Características Superficie
R1	Superficies de asfalto con un mínimo del 15 % de materiales abrillantadores o materiales artificiales claros o al menos un 30 % de anortositas muy brillantes. Superficies que contienen gravas que cubren más del 80% de la superficie de la calzada, y las gravas constan de gran cantidad de material claro, o de abrilladores o están compuestas al 100% de anortositas muy brillantes. Superficies de calzada de hormigón de concreto.
R2	Superficies con textura rugosa que contienen agregados normales Superficies asfálticas (pavimentos bituminosos que contienen el 10% al 15% de abrilladores artificiales. Hormigón bituminoso grueso y rugoso, rico en gravas (más del 60%) de tamaños mayores a 10 mm Asfalto mástico después de ser tratado. Se conoce también como asfalto mástico en estado nuevo.
R3	Revestimiento en Hormigón bituminoso (asfalto frío, asfalto cemento) con tamaño de grava superior a 10 mm, con textura rugosa Superficies tratadas con textura rugosa pero pulimentada.
R4	Asfalto mástico después de varios meses de uso Superficies con textura bastante suave o pulimentada.

Fuente: Ministerio de Minas y Energía de Colombia (2010).

La luminancia en un punto se determina aplicando la siguiente fórmula:

$$L = \sum I(C, y) r \phi F_m \cdot 10^{-4} / H^2$$

En donde:

- L luminancia mantenida en cd/m^2
- Σ Representa la sumatoria de las contribuciones de todas las luminarias.
- r Es el coeficiente de luminancia reducido, para un rayo de luz que inicia con unas coordenadas angulares (β, γ)
- $I(C, \gamma)$ Es la intensidad luminosa en la dirección (C, γ), cd/klm .
- \emptyset Es el flujo luminoso inicial en klm de las fuentes de cada luminaria.
- F_M Factor de mantenimiento
- H Altura de montaje en m de la luminaria.

Según el Ministerio de Minas y Energía de Colombia (2010), en la dirección longitudinal de una vía recta, el campo de cálculo debe quedar entre dos luminarias de la misma fila. La primera luminaria debe estar situada a 60 m delante del observador. Mientras que, en la dirección transversal, el campo de cálculo debe abarcar el ancho de la calzada en vías sin separador central y el ancho de una sola calzada en vías con separador central.

La tabla R es aplicable para ángulos de visión entre 0.5° y 1.5° , lo que da como resultado una distancia de observación de 57 a 172 m. Sin embargo, por convención, esta distancia se determina entre 60 y 160 m, según se puede observar en la figura 19.

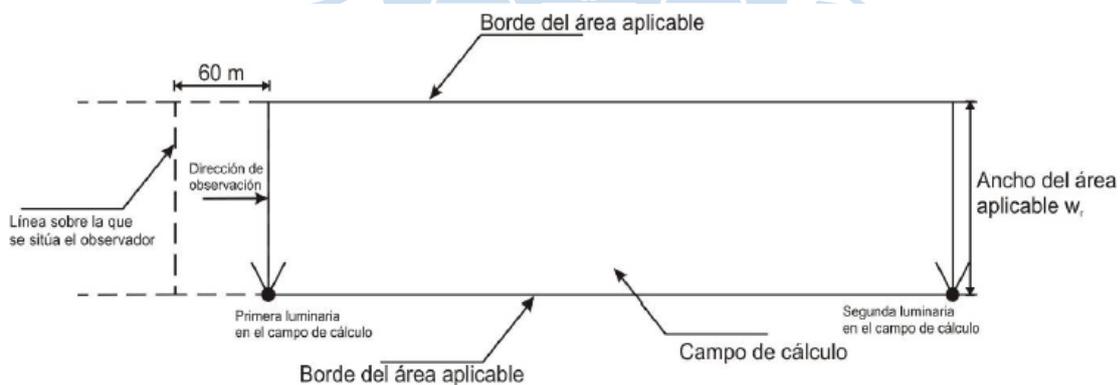


Figura 19. Campo de cálculo de luminancia en una calzada
Fuente: Ministerio de Minas y Energía de Colombia (2010)

Según se observa en la figura 20, en la dirección longitudinal, la distancia (D) se calcula según la ecuación $D = \frac{S}{N}$, en donde:

D = Distancia longitudinal entre dos puntos (m)

S = Distancia entre luminarias en la misma fila (m)

N = Número de puntos de cálculo en la dirección longitudinal, escogidos de manera que:

Para $S \leq 30$ m, $N=10$;

Para $S > 30$ m, $N =$ mínimo valor entero tal que $D \leq 3$ m.

La primera fila transversal de puntos de cálculo debe estar a una distancia $d/2$ de la primera luminaria. En la dirección transversal, la distancia (d) se determina según la ecuación $d = \frac{w_c}{3}$, en donde:

d = Distancia transversal entre dos puntos

w_c = Ancho de cada carril

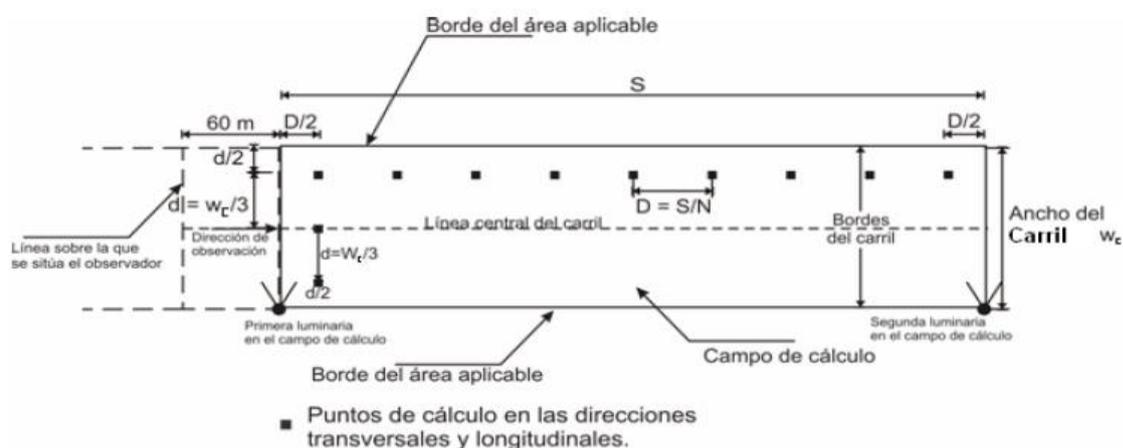


Figura 20. Posición de los puntos de cálculo en un carril
Fuente: Ministerio de Minas y Energía de Colombia (2010)

1.4.4.3 Calidad de luminancia

Uniformidad general de luminancia

Es un parámetro utilizado para asegurar que no existan áreas demasiado iluminadas u oscuras dentro del área de diseño. Se define según:

$$U_0 = L_{min}/L_{prom}$$

Donde:

L_{min} = punto de menor luminancia entre todos los puntos calculados

L_{prom} = Luminancia promedio sobre la calzada.

Uniformidad longitudinal de luminancia

Permite garantizar que no existan tramos iluminados y oscuros intercalados a lo largo de la instalación. Esto podría suceder, si, por ejemplo, se instalan luminarias con excelente control de deslumbramiento demasiado alejadas entre sí. Se calcula según:

$$U_L = L_{min}/L_{max}$$

Donde:

L_{min} = punto de menor luminancia entre todos los puntos calculados.

L_{max} = punto de mayor luminancia entre todos los puntos calculados.

El número de puntos en la dirección longitudinal y el espaciado entre ellos deben ser los mismos que los utilizados para el cálculo de la luminancia promedio.

1.4.4.4 Deslumbramiento

En determinadas circunstancias, el resplandor generado por las luminarias tiene el potencial de inhibir la visión. Este resplandor es normalmente categorizado según el efecto que causa en el individuo, el cual puede ser incapacitante o incómodo. En el diseño de un sistema de alumbrado público, se presta especial interés en el deslumbramiento incapacitante, ya que, si este es adecuadamente controlado, el deslumbramiento incómodo también es neutralizado. El parámetro fotométrico relevante es conocido como Incremento de umbral (TI).

Es necesario mencionar que el control de deslumbramiento y la luminancia sobre la calzada están estrechamente relacionados. El valor de TI resulta del balance entre un adecuado control de deslumbramiento y una distancia de instalación de luminarias económicamente viable. Para conseguir un control de deslumbramiento excelente, es necesario utilizar luminarias con un valor de TI muy bajo ($TI \approx 10\%$). Sin embargo, el haz de luz producido por éstas, se dirige hacia la superficie en un ángulo muy reducido y por lo tanto, sería necesario disminuir simultáneamente la distancia de instalación entre luminarias para no afectar la luminancia general y su uniformidad.

El incremento de umbral se calcula para el estado inicial de la instalación, es decir, considerando una luminaria nueva y el flujo inicial de la lámpara, mediante la siguiente fórmula.

$$TI = \frac{KxE_g}{(L_{prom})^{0.8} x \theta^2} (\%)$$

Según está ecuación, la pérdida de visibilidad debido al deslumbramiento ocasionado por la luminaria, se puede disminuir aumentando la altura de montaje de la luminaria (aumentar el ángulo θ) o aumentando la luminancia promedio (L_{prom}).

E_g = Iluminancia total inicial producida por las luminarias, en su estado nuevo, sobre un plano normal a la línea de visión y a la altura del ojo del observador.

K = Constante dependiente de la edad del observador, se calcula según:

$$K = 641 \left[1 + \left(\frac{A}{66.4} \right)^4 \right]$$

En donde:

A = edad del observador en años.

1.5 Lámparas para alumbrado público

Según Sørensen (2013), la fuente de luz ideal para alumbrado público tiene una alta eficiencia luminosa, larga vida útil, buena calidad de luz (color de la luz y reproducción de color) y es atenuable. En la figura 21, se presenta un resumen de las lámparas utilizadas en aplicaciones de alumbrado público a lo largo de la historia. Mientras que, en la tabla 5 se mencionan sus propiedades. Los valores son señalados en rojo cuando se consideran insatisfactorios y en verde cuando son aceptables o competitivos comparados con los de otras lámparas.

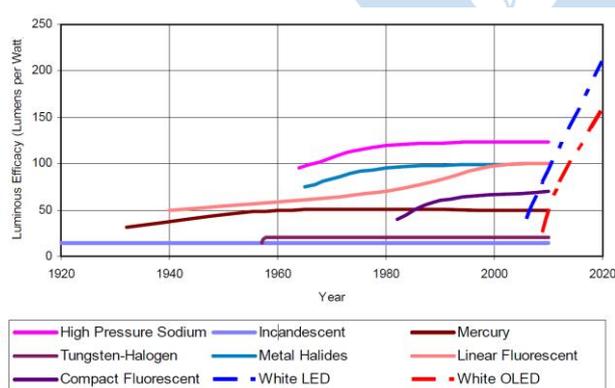


Figura 21. Tipos de lámparas utilizadas en alumbrado público
Fuente: Altoo University (2010)

Tabla 5. Propiedades de lámparas para alumbrado público

Propiedad	Eficiencia luminosa (lm.W ⁻¹)	Vida útil (h)	Flujo luminoso (lm)	Temperatura de color (K)	Reproducción cromática (Índice Ra)	Atenuación (sí/no)
Lámparas incandescentes	14	1000	bajo	2800 K	100	1*
Lámparas de sodio de baja presión	150	20000	OK	color falso	0	1*
Lámparas de Sodio de alta presión	100	20000	OK	2100 (falso)	25	sí
Tubos fluorescentes	70	8000	OK	2900/4100	51/63	1*
Fluorescentes compactos	75	8000	OK 2*	2700/4000	82	1*
Lámparas de mercurio	50	10000	OK	3500	50	sí
Lámpara de Haluro metálico CDM	90	8000	OK 2*	3000	80	sí
Lámpara de Haluro metálico CPO	110	12000	OK	4000	65	sí
Módulos LED	100	30000	OK	OK	75	sí

Fuente: Sørensen (2013)

- 1) La atenuación no es relevante para esta lámpara
 2) La luz producida está en el límite inferior aceptable y es suficiente para iluminar solo vías domésticas.

1.5.1 Lámparas incandescentes

Este tipo de lámparas producen luz a través de radiación térmica, la cual es generada por el movimiento de los electrones en su filamento. Existen tres leyes físicas que describen adecuadamente el fenómeno de radiación térmica:

- La ley de Stefan – Boltzmann: establece que la radiancia de un cuerpo negro es proporcional a la cuarta potencia de su temperatura absoluta.

$$E = \sigma \cdot T_e^4$$

Donde $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \frac{W}{m^2K^4}$ (Constante de Stefan-Boltzmann)

- La ley del desplazamiento de Wien: establece que la longitud de onda a la cual la radiación de un cuerpo negro es máxima, es inversamente proporcional a su temperatura absoluta.

$$\lambda_{max} = \frac{0.0028976 \text{ m} \cdot \text{K}}{T}$$

- La ley de Planck: Establece la radiación electromagnética producida por un cuerpo negro a una temperatura determinada.

$$I(\nu, T) = \frac{2h\nu^3}{c^2} \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1}$$

La figura 22 muestra que la eficiencia luminosa de una lámpara incandescente incrementa fuertemente con la temperatura del filamento. Sin embargo, la temperatura solo puede ser elevada hasta cierto límite antes de comprometer seriamente la vida útil de la lámpara.

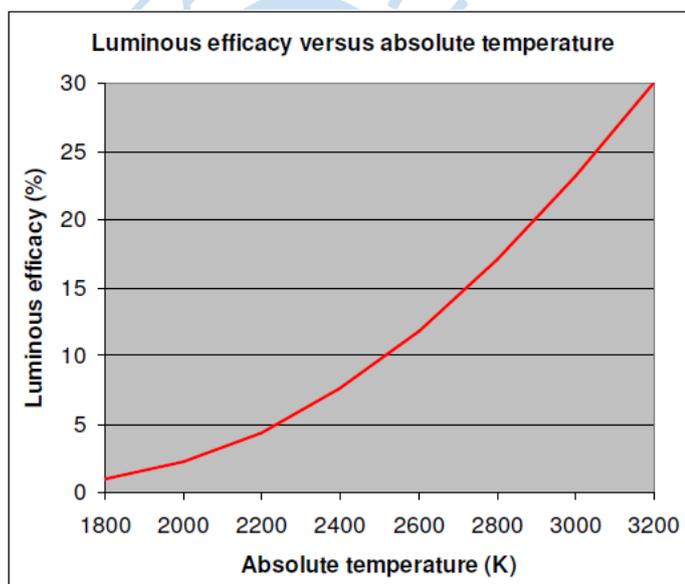


Figura 22. Relación entre la temperatura absoluta del filamento y la eficiencia luminosa de la lámpara
Fuente: Sørensen (2013)

Las lámparas incandescentes son simples, baratas, operan directamente con una fuente de tensión, tienen propiedades excelentes en términos de luz y reproducción de colores, son atenuables y adaptables a su uso con reflectores. Sin embargo, debido a sus obvias desventajas, como su baja eficiencia (alrededor de $14 \text{ lm} \cdot \text{W}^{-1}$) y corta vida útil (alrededor de 1000 h), han sido discontinuadas para su aplicación en alumbrado público a partir de los años 70.



Figura 23. Lámpara incandescente moderna utilizada para iluminación general
Fuente: Sørensen (2013)

1.5.2 Lámparas de descarga

Las lámparas de descarga generan luz al hacer pasar una corriente eléctrica generada por dos electrodos, a través de un gas ionizado (plasma). El principio de funcionamiento se ilustra en la figura 24.

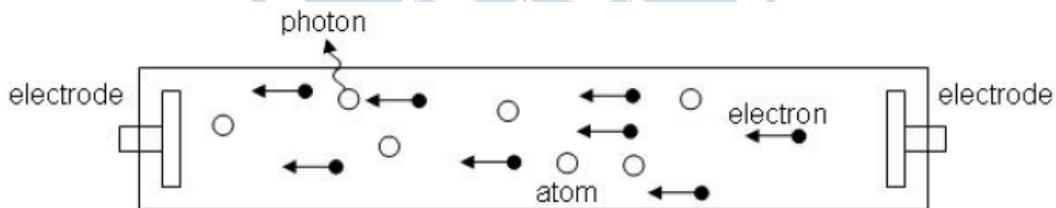


Figura 24. Principio de generación de luz de una lámpara de descarga de gas.
Fuente: Sørensen (2013)

Los electrones libres dentro del gas son acelerados por el campo eléctrico generado entre los electrodos y eventualmente colisionan con los átomos. Algunos de estos electrones ganan la cantidad de energía necesaria para pasar al siguiente orbital energético, cuando el electrón regresa hacia su nivel anterior, emite un fotón de una energía característica. Dentro del contenedor, el gas puede estar sometido a “bajas” o “altas” presiones. Esto quiere decir que el gas puede estar tan enrarecido que los átomos no interactúan entre sí durante la emisión de luz, y, por lo tanto, el espectro de la luz emitida se limita a la línea espectral de ese gas en particular (baja presión); o que la presión es suficiente para permitir la interacción de los átomos, lo que permite amplificar la línea espectral (alta presión). Sin embargo, esta presión es casi siempre menor a la atmosférica, y, por lo tanto, el riesgo de explosión es mínimo.

1.5.2.1 Lámparas de sodio de baja presión

Estas lámparas fueron introducidas comercialmente en 1932, y desde entonces, han sido sujeto de continuas mejoras en cuanto a materiales y tecnología de fabricación. Producen luz a partir de la descarga de sodio a baja presión, este proceso genera luz prácticamente monocromática con una longitud de onda promedio de 589.3 nm.

Las ventajas de este tipo de lámparas incluyen una alta eficiencia luminosa de hasta 200 lm. W⁻¹ y una vida útil de hasta 18000 horas. Sin embargo, producen un color amarillo “falso”, tienen una pésima reproducción cromática y suelen ser relativamente grandes. Se han empleado en alumbrado para autopistas y otras vías de tránsito vehicular en algunos países, mientras que, en otros, no se usan en absoluto. En general, el uso de estas lámparas es bastante limitado actualmente debido a la baja calidad de luz que producen y a la competencia creada por otros tipos de lámparas con mejores características ópticas.



Figura 25. Lámpara de sodio de baja presión en funcionamiento.
Fuente: Sørensen (2013)

1.5.2.2 Lámparas de sodio de alta presión

El primer ejemplar de este tipo de lámparas salió al mercado durante los años 60, pero con una potencia y generación luminosa demasiado alta para la mayoría de las aplicaciones de alumbrado vial. Las lámparas de 150 W y 250 W (potencias adecuadas para iluminación vial) recién aparecieron al final de los años 70, y rápidamente reemplazaron a las lámparas de mercurio de 250 W y 400 W. La posterior fabricación de lámparas de 50 W, 70 W y 100 W, hicieron de las lámparas de sodio de alta presión, las más populares en aplicaciones de alumbrado público alrededor del planeta.

Este tipo de lámparas producen luz al descargar vapor de sodio mezclado con otros elementos, tales como el mercurio. Debido a la actividad química extremadamente alta del arco de sodio de alta presión, este es cerámico, hecho de óxido de aluminio translúcido.

Entre sus ventajas podemos identificar, al igual que las lámparas de sodio de baja presión, una alta eficiencia (100 lm.W⁻¹) y una larga vida útil (alrededor de 20000 horas). Producen un color

tibio con una temperatura aproximada de 2100 K. Su principal desventaja es su baja reproducción cromática, con un índice R_a de 25.



Figura 26. Lámparas de vapor de sodio de alta presión
Fuente: Altoo University, (2010)

1.5.2.3 Tubos fluorescentes

Las primeras versiones de los tubos fluorescentes aparecieron en el mercado al final de los años 30. Desde entonces, algunos de los principales avances en esta tecnología, han sido el uso del fósforo para conseguir la fluorescencia y la reducción del diámetro y el tamaño en general de las lámparas. Estas fuentes luminosas son fabricadas en una amplia variedad de formas y utilizando diferentes compuestos de fosforo como recubrimiento fosforescente, los cuales determinan el color de la luz, la reproducción cromática e influyen en la eficiencia luminosa. En general, las lámparas fluorescentes tienen una eficiencia luminosa de aproximadamente $70 \text{ lm} \cdot \text{W}^{-1}$, una vida útil de 8000 horas, una temperatura de color de 2900 K o 4100 K, llamadas respectivamente “doradas” y “blancas” y un índice R_a por encima de 80.

Durante un periodo de los años 50 y 60, en Dinamarca y otros países de Europa, existieron numerosas aplicaciones de un tipo especial de estas lámparas (arranque rápido) en sistemas de alumbrado vial. Sin embargo, actualmente, debido a su tamaño (120 cm para una lámpara de 40 W), resulta complicado controlar eficazmente la luz en la dirección transversal a la vía y, por lo tanto, las luminarias deben ser inclinadas hacia el área a iluminar, o colocadas directamente sobre ella, utilizando brazos más largos o suspendiéndolas con cables. Además, una lámpara de 40 W ofrece aproximadamente 3000 lm, lo cual resulta insuficiente para propósitos de iluminación vial y hace necesaria la instalación de dos o tres lámparas por luminaria, incrementando el costo. Estas limitaciones han relegado a las lámparas fluorescentes a instalaciones de alumbrado vial de pequeña escala y de vías domésticas.

1.5.2.4 Lámparas de vapor de mercurio

Nombradas coloquialmente lámparas de mercurio, cuentan con una larga historia de desarrollo, la cual tiene su mayor hito en la introducción de la lámpara moderna en 1936. Su funcionamiento se basa en la descarga de gas mercurio a alta presión en un pequeño tubo de descarga de cuarzo fundido. La eficiencia luminosa de estas lámparas se encuentra entre 40 a 60 $\text{lm}\cdot\text{W}^{-1}$. La temperatura de color es de alrededor de 3500 K. La reproducción cromática es pobre, con un índice Ra de 50 aproximadamente. La vida útil es donde más destaca, a menudo se indica hasta 20 000 horas, sin embargo, la calidad luminosa disminuye notablemente durante este periodo, debido a la degradación del recubrimiento fluorescente de la lámpara.

La principal ventaja de las lámparas de mercurio comparadas con los tubos fluorescentes es su menor tamaño. Estas normalmente constan de un bulbo exterior de forma elipsoidal. El tamaño del elipsoide depende de la potencia de la lámpara. En ese sentido, por ejemplo, una lámpara de 125 W tiene una longitud de 12 cm y un ancho de 7.6 cm. Estas dimensiones le permiten a la lámpara de mercurio dirigir la luz adecuadamente en la dirección longitudinal y transversal de la vía. Prescindiendo de esta manera de la necesidad de inclinarla o de utilizar brazos más largos para conseguir una buena iluminación. Estas características hicieron muy popular a la lámpara de mercurio en aplicaciones de alumbrado vial, hasta la aparición de las mucho más eficientes lámparas de sodio de alta presión.

Actualmente, debido a las características venenosas y contaminantes del gas mercurio (liberado si el bulbo se rompe), el uso de estas lámparas está en proceso de ser eliminado a nivel internacional, con base en la directiva de Ecodesign 2005/32/EC, propuesta por la comisión de la Unión Europea.

1.5.2.5 Lámparas de haluro metálico

Estas lámparas son relativamente nuevas si son comparadas con otras lámparas de descarga. Producen luz a partir de un arco eléctrico que pasa a través de una mezcla gaseosa de vapor de mercurio y haluros metálicos (compuestos metálicos con bromo o yodo). Además, el bulbo exterior tiene un recubrimiento diseñado para filtrar la luz ultravioleta producida. La eficiencia luminosa de estas lámparas es de aproximadamente 90 $\text{lm}\cdot\text{W}^{-1}$ y la luz emitida tiene una temperatura de color de 3000 K. La reproducción cromática es bastante buena, con un índice Ra de aproximadamente 80. La vida útil se acerca normalmente a las 8000 horas.

1.5.3 Lámparas LED

Un diodo led es un semiconductor con una unión p-n que emite luz de manera espontánea cuando es expuesto a un campo eléctrico. La luz es producida a través del llamado efecto electroluminiscente, donde se libera un fotón cuando los electrones se recombinan con los huecos en la región de la unión p-n del diodo (Aalto University, 2010): La historia comercial de los ledes empezó a inicios de los años 60 con el primer led rojo, con emisión pico a 650 nm. El material semiconductor utilizado fue el GaAsP (Fosforo de arseniuro de galio). La potencia de este primer led era de aproximadamente 0.1 W, emitiendo 0.01 lm, produciendo entonces una eficiencia luminosa de 0.1 lm/W. Desde entonces, la tecnología led ha progresado rápidamente. Actualmente, los ledes modernos cubren prácticamente todo el espectro visible.

La longitud de onda de la luz emitida (y, por lo tanto, su color), depende de los materiales usados. Generalmente, para aplicaciones de alumbrado público, se utilizan ledes azules, los cuales proveen luz blanca cuando son encapsulados en un recubrimiento de fósforo. Actualmente, los ledes azules poseen la más alta eficiencia dentro de su clase, llegando a transformar en luz casi el 55% de la energía eléctrica que reciben. El 45% restante se convierte en calor, el cual debe ser disipado adecuadamente a través de un buen diseño térmico, ya que una elevada temperatura de funcionamiento puede comprometer la eficacia y la vida útil de la lámpara.

Normalmente, el chip led y la copa reflectora son montadas sobre un sumidero de calor, el cual a su vez transfiere el calor hacia la luminaria, disipando el calor externamente.

Dado que el flujo luminoso producido por un solo led no es suficiente para los requerimientos de una instalación de alumbrado vial, varios chips led pueden ser ensamblados en una misma placa base. Por lo tanto, es necesario mencionar los varios niveles de integración posibles, los cuales fueron definidos en la Regulación de Comisión N° 874/2012 de la Unión Europea:

- Led unitario: fuente de luz que consiste en un dispositivo de estado sólido que involucra una unión p-n. Esta unión emite radiación óptica cuando es excitada por una corriente eléctrica.
- Paquete led: Involucra la unión de varios ledes. Esta unión puede incluir elementos ópticos y térmicos, así como interfaces eléctricas y mecánicas.
- Módulo led: Incorpora un o más paquetes led en una placa base impresa. La unión puede incluir componentes ópticos, térmicos, mecánicos y eléctricos.

- Lámpara led: Involucra uno o más módulos led, la lámpara puede incluir un casquillo.

La vida útil de las lámparas LED modernas puede exceder las 100000 h, pero como ya se mencionó anteriormente, depende de la temperatura de operación y de la efectividad en la disipación de calor. Generalmente, estas lámparas tienen una eficiencia luminosa que rodea los $100 \text{ lm}\cdot\text{W}^{-1}$, una vida útil de 30000 horas, un color de luz razonablemente bueno y un índice R_a de 75.

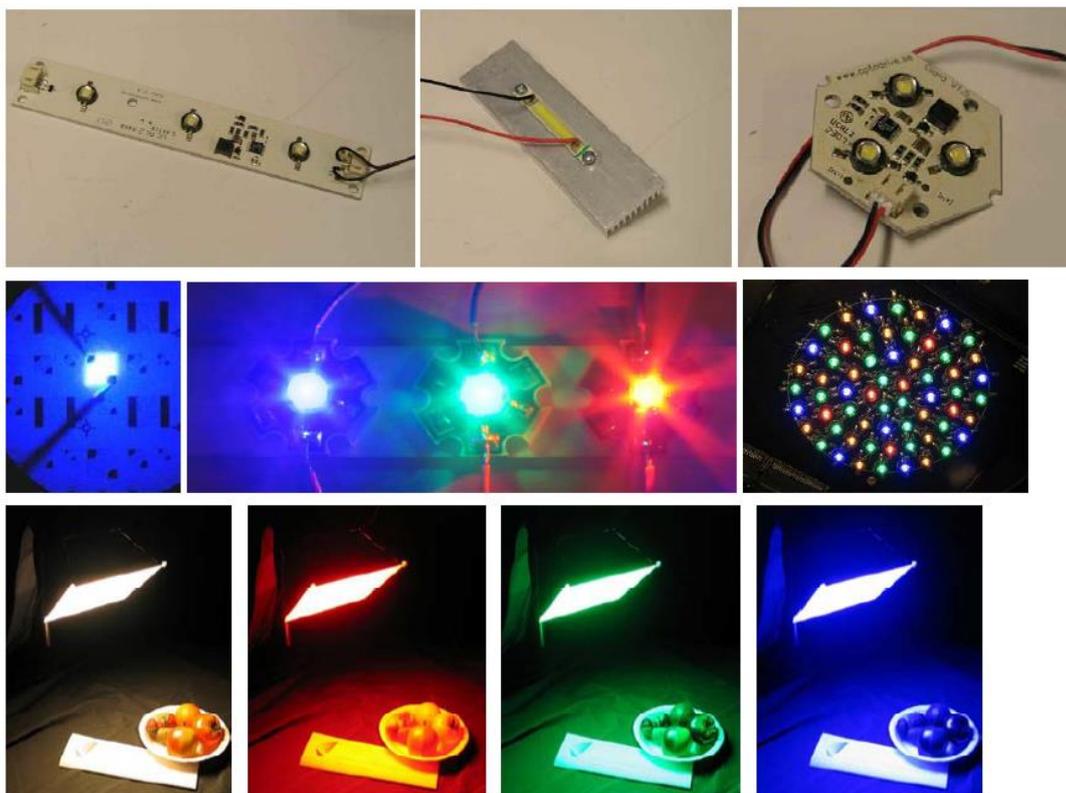


Figura 27. Ejemplos de leds y módulos led
Fuente: Altoo University (2010)

1.5.4 Factor de Mantenimiento

Según Sørensen (2013), todos los tipos de fuentes luminosas experimentan depreciación, definida como la disminución gradual de la cantidad de luz que pueden entregar, debido al uso y a la acumulación de polvo y suciedad en las partes ópticas de la luminaria. Normalmente se asume que el flujo luminoso entregado puede ser restaurado a su nivel inicial luego de una sesión de mantenimiento. Donde se realiza una limpieza o se reemplazan las fuentes luminosas deterioradas. La figura 28 ilustra los numerosos factores que influyen en la

depreciación luminosa de una fuente en función del tiempo. En esta gráfica se asume que las lámparas y las luminarias son reemplazadas completamente cada 24 meses.

Para propósitos de iluminación, este efecto se describe utilizando el llamado Factor de Mantenimiento, con un valor menor a uno. Este valor es aplicado como un factor reductor para el nivel de iluminación en instalaciones de alumbrado vial y se selecciona en función de las fuentes luminosas, las luminarias, los alrededores y el plan de mantenimiento establecido.

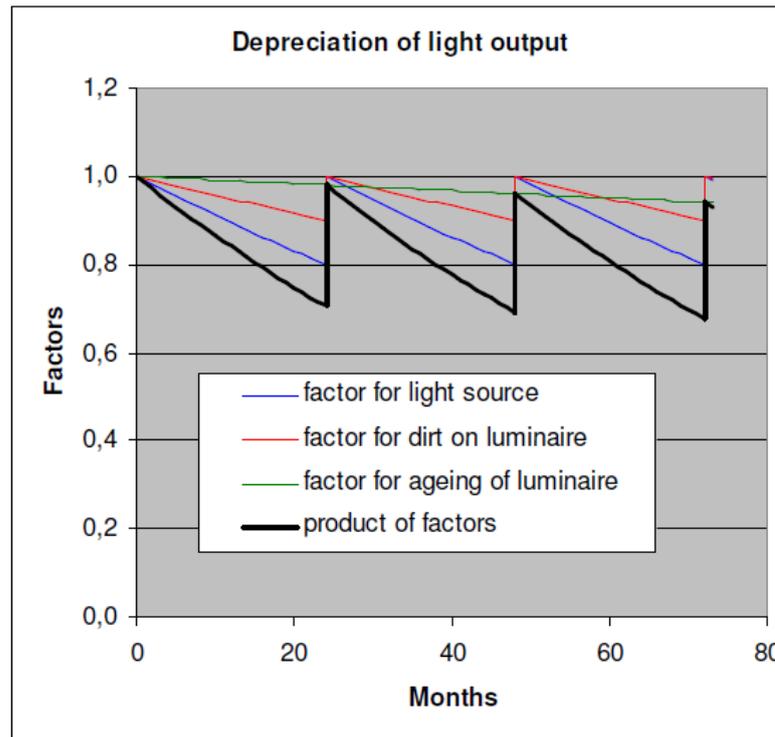


Figura 28. Factores que influyen en la depreciación luminosa de una fuente
Fuente: Sørensen (2013)

1.5.5 Información fotométrica

La información referente a las características fotométricas y al desempeño de una lámpara es proporcionada a través de distintas curvas. Generalmente, cada una de estas curvas es creada suponiendo la utilización de una lámpara de 1000 lúmenes. Por lo tanto, para trabajar con una lámpara específica de flujo conocido, los valores de intensidad y flujo deben extrapolarse. En la figura 29 se presenta el sistema de coordenadas utilizado para construir las gráficas. (Trashorras, 2001)

a) Curvas isolux

Proporcionan la distribución de iluminancia sobre la superficie próxima a la luminaria. Están calculadas para una altura de montaje de 1 m y para circunstancias normales de ensayo y operación. Los ángulos se muestran según el sistema C- γ , de manera que la luz en la región angular lateral 0°-90-180 corresponde al lado de la calzada.

Las líneas del diagrama unen todos los puntos con el mismo valor de iluminancia. Con el propósito de universalizar la información, las abscisas y ordenadas se dan en términos del cociente entre distancia y altura de montaje. Para conocer los valores a otras alturas distintas a 1 metro, basta multiplicar los valores determinados en el diagrama por el siguiente factor:

$$\text{Factor} = \frac{1}{h^2}, \quad h = \text{altura de montaje}$$

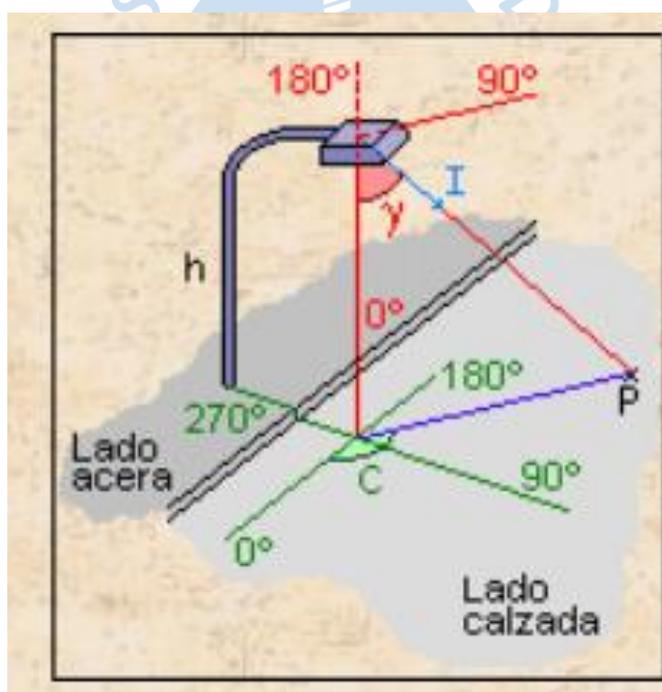


Figura 29. Sistema de coordenadas utilizado para proporcionar la información fotométrica de una lámpara

Fuente: Universidad del Bío Bío (2007)

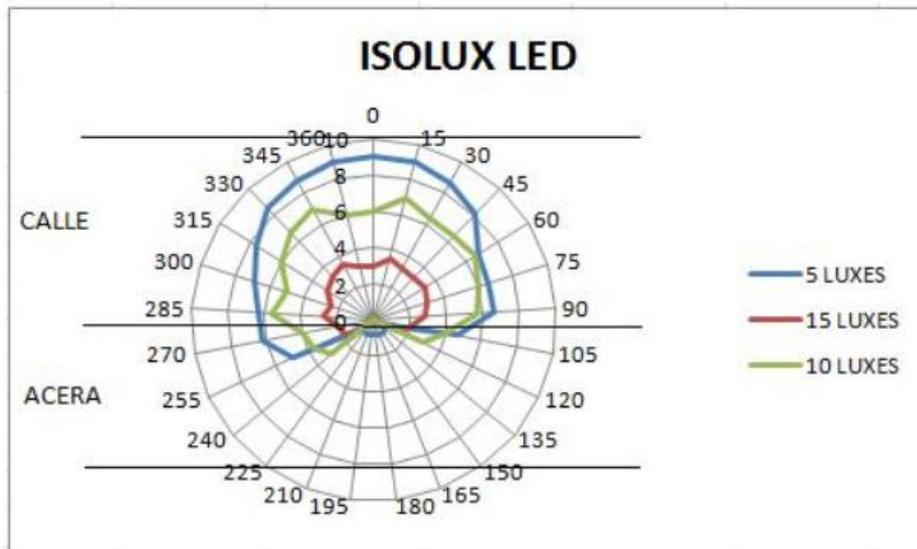


Figura 30. Curva isolux de una lámpara led.
Fuente: Rivera (2011)

b) Curvas Polares o de distribución luminosa

Estas curvas proporcionan las intensidades emitidas para los ángulos γ comprendidos entre 0° y 180° en un mismo plano vertical (ángulo C constante). Generalmente se presentan tres curvas distintas, las cuales corresponden a:

- Longitudinal $C = 0^\circ$
- Transversal $C = 90^\circ$
- Principal $C = \text{ángulo de intensidad máxima}$

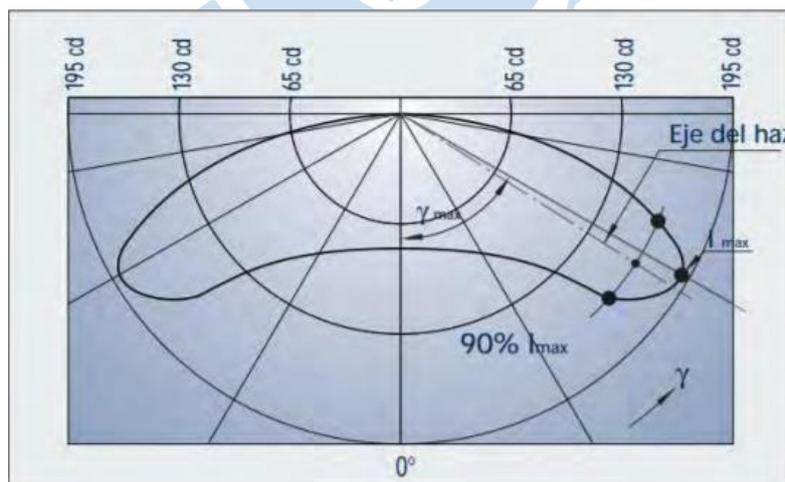


Figura 31. Curva polar de una lámpara de alumbrado vial.
Fuente: Ramos (2016)

Capítulo 2

Análisis y comparación de la norma peruana de iluminación con normativas extranjeras

El objetivo de esta tesis es elaborar un procedimiento estándar para determinar los parámetros fotométricos adecuados en un sistema de alumbrado público. Para lograrlo, es necesario adherirse a las pautas y criterios establecidos por las normas vigentes. Vale mencionar que, el diseño integral de un sistema de iluminación implica procedimientos previos y posteriores a la determinación de estos parámetros. Sin embargo, estos procedimientos no están dentro del alcance de esta tesis y, por lo tanto, en el siguiente análisis, solo se considerará y comparará la información referente a la determinación de los parámetros antes mencionados.

2.1 Norma Peruana de Iluminación

En el Perú, existe una normativa que establece los estándares de calidad y las exigencias lumínicas mínimas que deben cumplir todas las instalaciones de alumbrado público desde su etapa de diseño. También establece las obligaciones de los concesionarios con respecto a la operación, mantenimiento y reparación de cualquier sistema de alumbrado público dentro de la zona de concesión. Esta norma se denomina: Norma técnica DGE “Alumbrado de vías públicas en zonas de concesión de distribución.” Fue publicada y aprobada en el año 2002 a través de la Resolución Ministerial N° 405-96 por el Ministerio de Energía y Minas.

La norma contempla cinco tipos de alumbrado, aplicables según el tipo de vía a iluminar (expresa, arterial, colectora, local comercial, peatonal, etc), según se observa en la tabla 6.

De acuerdo con el tipo de alumbrado, además, la norma establece los niveles de luminancia, iluminancia e índice de control de deslumbramiento adecuados. También presenta valores de uniformidad de luminancia e iluminancia.

Tabla 6. Tipos de alumbrado según la clasificación vial

Tipo de vía	Tipo de alumbrado	Función	Características del tránsito y la vía
Expresa	I	-Une zonas de alta generación de tránsito con alta fluidez -Accesibilidad a las áreas urbanas adyacentes mediante infraestructura especial (rampas)	-Flujo vehicular ininterrumpido. - Cruces a desnivel. -No se permite estacionamiento. -Alta velocidad de circulación, mayor a 60 km/h. -No se permite paraderos urbanos sobre la calzada principal. -No se permite vehículos de transporte urbano, salvo los casos que tengan vía especial.
Arterial	II	-Une zonas de alta generación de tránsito con media o alta fluidez - Acceso a las zonas adyacentes mediante vías auxiliares.	-No se permite estacionamiento. -Alta y media velocidad de circulación, entre 60 y 30 km/h. -No se permiten paraderos urbanos sobre la calzada principal. -Volumen importante de vehículos de transporte público.
Colectora 1	II	Permite acceso a vías locales	-Vías que están ubicadas y/o atraviesan varios distritos. Se considera en esta categoría las vías principales de un distrito o zona céntrica. -Generalmente tienen calzadas principales y auxiliares. -Circulan vehículos de transporte público.
Colectora 2	III	Permite acceso a vías locales	-Vías que están ubicadas entre 1 o 2 distritos. -Tienen 1 o 2 calzadas principales pero no tienen calzadas auxiliares. -Circulan vehículos de transporte público.
Local Comercial	III	Permite el acceso al comercio local	-Los vehículos circulan a una velocidad máxima de 30 km/h. -Se permite estacionamiento. -No se permite vehículos de transporte público. - Flujo peatonal importante.
Local Residencial 1	IV	Permite acceso a las viviendas	-Vías con calzadas asfaltadas, veredas continuas y con flujo motorizado reducido. -Vías con calzadas asfaltadas pero sin veredas continuas y con flujo motorizado muy reducido o nulo.
Local Residencial 2	V	Permite acceso a las viviendas	-Vías con calzadas sin asfaltar. -Vías con calzadas asfaltadas, veredas continuas y con flujo motorizado muy reducido o nulo.
Vías peatonales	V	Permite el acceso a las viviendas y propiedades mediante el tráfico peatonal	- Tráfico exclusivamente peatonal.

Fuente: Ministerio de Energía y Minas (2002)

Tabla 7. Niveles de luminancia, iluminancia e índice de control de deslumbramiento.

Tipo de alumbrado	Luminancia media (cd/m ²)	Iluminancia media (lux)		Índice de control de deslumbramiento
		calzada clara	calzada oscura	
				G
I	1,5-2,0	15-20	30-40	≥ 6
II	1.0-2,0	10- 20	20-40	5-6
III	0,5-1,0	5-10	10-20	5-6
IV		2-5	5-10	4-5
V		1-3	2-6	4-5

Fuente: Ministerio de Energía y Minas (2002)

Tabla 7. Uniformidad de luminancia.

Tipo de alumbrado	Uniformidad Longitudinal	Uniformidad media
I	$\geq 0,7$	$\geq 0,4$
II	$\geq 0,65$	$\geq 0,4$

Fuente: Ministerio de Energía y Minas (2002)

Tabla 8. Uniformidad media de iluminancia

Tipo de Alumbrado	Uniformidad media
III	0,25 -0,35
IV, V	$\geq 0,15$

Fuente: Ministerio de Energía y Minas (2002)

Asimismo, considera la influencia de las características físicas de la calzada en el cálculo de luminancia, asignando las categorías “clara” y “oscura”.

Tabla 9. Tipos de calzada

Tipo de superficie	Tipo de calzada
Revestimiento de concreto	Clara
Revestimiento de asfalto	Oscura
Superficies de tierra	Clara

(Ministerio de Energía y Minas, 2002)

Además de la información ya presentada, la norma indica varias pautas para la iluminación de zonas consideradas “especiales”, como pasos peatonales, rampas, gibas, curvas, intersecciones, puentes y túneles. Sin embargo, esta información resulta difícil de analizar debido al uso frecuente de métricas cualitativas en lugar de cuantitativas. Por ejemplo, en la cita: “Las gibas deben estar provistas de una instalación de alumbrado que proporcione una distribución uniforme y un apropiado control del deslumbramiento.” (Ministerio de Energía y Minas, 2002, p. 09). Los adjetivos “uniforme” y “apropiado” dejan este criterio abierto a la interpretación del diseñador y condicionan la correcta implementación del mismo a la experiencia que el diseñador podría o no tener. Lo mismo sucede en la siguiente cita: “En los

tramos de vía superior e inferior de una intersección a desnivel, la disposición de las luminarias proveerá una guía visual inequívoca.” (Ministerio de Energía y Minas, 2002, p 09) El adjetivo “inequívoca”, nuevamente se presta para muchas interpretaciones, lo cual no sucedería, si en su lugar, por ejemplo, se sugiriera un valor de iluminancia específico para el área de intersección.

También es necesario mencionar que la norma no incluye definiciones ni métodos de cálculo para los parámetros fotométricos que presenta. Debido a las deficiencias observadas en la norma nacional, y considerando además que fue actualizada por última vez hace casi 18 años, el autor considera necesario consultar normativas extranjeras con el propósito de obtener un procedimiento lo más confiable y actualizado posible.

2.2 Norma Colombiana de Iluminación

El Ministerio de Minas y Energía de Colombia, expidió el Reglamento Técnico de Iluminación y Alumbrado Público (RETILAP), mediante la resolución 183331 el 6 de agosto de 2009. Con el objetivo de establecer los requisitos y medidas que deben cumplir los sistemas de iluminación y alumbrado público, para garantizar el nivel y la calidad de energía lumínica requerida en la actividad visual, la seguridad en el abastecimiento energético, la protección al consumidor y la preservación del medio ambiente. Este reglamento es aplicable a todas las instalaciones de iluminación en Colombia, tanto en interiores como en exteriores.

De la misma manera que la norma peruana, el RETILAP clasifica la iluminación según el tipo de vía. Sin embargo, además de hacer una descripción general de cada clase (al igual que la norma peruana), como se observa en la tabla 10, también emplea un enfoque mucho más conciso y cuantitativo, añadiendo la velocidad de circulación y el volumen de tráfico como criterios de clasificación para vías de tráfico motorizado en la tabla 11.

Además, presenta una clasificación similar para las vías peatonales y ciclovías. La iluminación en este tipo de vías tiene el objetivo de permitir a los usuarios distinguir la textura y diseño del pavimento, la configuración de bordillos, escalones, marcas y señales.

Una vez hecha la clasificación de vías, se establecen los requisitos fotométricos para cada categoría. En la tabla 13 se presentan los parámetros para el diseño por luminancia en calzada seca. Mientras que en la tabla 14 se ilustran los criterios a considerar utilizando el diseño por iluminancia.

Tabla 10. Clasificación de vías para tráfico motorizado por complejidad de circulación y control del tráfico.

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 ⁽¹⁾ :	
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 ⁽²⁾ y separación ⁽³⁾ 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

Fuente: Ministerio de Minas y Energía de Colombia (2010)

Tabla 11. Clases de iluminación para vías vehiculares

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				

Fuente: Ministerio de Minas y Energía de Colombia (2010)

En la tabla 15, se asocian a las clases de iluminación en vías peatonales los valores de iluminancia requeridos para cada una.

Después de establecer las categorías de iluminación para tráfico peatonal (P) y motorizado (M), el RETILAP introduce una categoría adicional para áreas consideradas críticas o de conflicto (C). Se considera área crítica a cualquier intersección de tráfico vehicular o cuando este está presente en áreas frecuentadas por peatones. Las categorías C0 a C5 están definidas por los parámetros fotométricos presentados en la tabla 16.

Tabla 12. Clases de iluminación para diferentes tipos de vías en áreas peatonales y de ciclistas

Clase de iluminación	Descripción de la calzada
P1	Vías de muy elevado prestigio* urbano
P2	Utilización nocturna intensa por peatones y ciclistas
P3	Utilización nocturna moderada por peatones y ciclistas
P4	Utilización nocturna baja por peatones y ciclistas, únicamente asociada a las propiedades adyacentes
P5	Utilización nocturna baja por peatones y ciclistas, únicamente asociada a las propiedades adyacentes. Importante preservar el carácter arquitectónico del ambiente.
P6	Utilización nocturna muy baja por peatones y ciclistas, únicamente asociada a las propiedades adyacentes. Importante preservar el carácter arquitectónico del ambiente
P7	Vías en donde únicamente se requiere una guía visual suministrada por la luz directa de las luminarias

Fuente: Ministerio de Minas y Energía de Colombia (2010)

Nota* El prestigio se relaciona con la necesidad de producir un ambiente atractivo.

Tabla 13. Requisitos fotométricos mantenidos por clase de iluminación para tráfico motorizado con base en la luminancia de la calzada.

Clasificación	Todas las vías			Vías sin o con pocas intersecciones	Vías con calzadas peatonales no iluminadas
	Luminancia promedio mínimo mantenida	Factor de uniformidad Uo Mínimo	Incremento de umbral TI% máximo inicial	Factor de uniformidad longitudinal de luminancia Ul mínimo	Relacion de alrededores SR mínima
	cd/m2	≥	≤ %		
M1 (I)	2	0,4	10	0,7	0,5
M2 (I)	1,5	0,4	10	0,7	0,5
M3 (II)	1	0,4	15	0,65	0,5
M4 (III)	0,75	0,4	15	NR	NR
M5 (IV y V)	0,5	0,35	15	NR	NR

Fuente: Ministerio de Minas y Energía de Colombia (2010)

Tabla 14. Valores mínimos mantenidos de iluminancias promedio (lx) en vías motorizadas

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	$E_{\min} / E_{\text{prom}}$ (%)
M3	12	17	15	34%
M4	8	12	10	25%
M5	6	9	8	18%

Fuente: Ministerio de Minas y Energía de Colombia (2010)

Tabla 15. Requisitos mínimos de iluminación para tráfico peatonal.

Vías peatonales/ciclovías		
Clasificación	Requerimiento adicional si es necesaria la identificación facial	
	Iluminancia vertical mínima (lx)	Iluminancia semicilíndrica mínima (lx)
P1	5	3
P2	3	2
P3	2,5	1,5
P4	1,5	1
P5	1	0,6
P6	0,6	0,4
P7	No aplica	No aplica

Fuente: Ministerio de Minas y Energía de Colombia (2010)

Tabla 16. Requisitos fotométricos para áreas críticas.

Áreas críticas o de conflicto	Iluminancia mínima (lx)	Uniformidad general $U_0 \geq$ (%)
C0	50	40
C1	30	40
C2	20	40
C3	15	40
C4	10	40
C5	7,5	40

Fuente: Ministerio de Minas y Energía de Colombia (2010)

Además, en la tabla 17, se establece un método para determinar la categoría C a partir de la clasificación M. La letra entre paréntesis es el número de clase, así, $C(N) = M(N-1)$ significa que la clase de iluminación del área crítica es C2 si la vía más importante que llega al área crítica es M3.

Tabla 17. Método de cálculo para la categoría C a partir de la clasificación M

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.ej. Aeropuertos, terminales de transporte, entre otros)	C1
	C3
	C5
TÚNELES	seguir recomendaciones de la norma CIE 88

Fuente: Ministerio de Minas y Energía de Colombia (2010)

Como conclusión, el RETILAP presenta una tabla resumen con los niveles exigidos de luminancia e iluminancia en alumbrado público para tráfico motorizado.

Tabla 18. Requisitos mínimos para vías con ciclorrutas y andenes adyacentes.

Tipo de vía	Calzadas vehiculares				Ciclo-rutas adyacentes		Relación de alrededores		
	L_{prom}	U_o	U_i	TI	E_{prom}	U_o	En andenes adyacentes	U_o	Alrededor sin andenes
CLASE DE ILUMINACIÓN	cd/m^2	$\geq \%$	$\geq \%$	$\leq \%$	luxes	$\geq \%$	luxes	$\geq \%$	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.

Fuente: Ministerio de Minas y Energía de Colombia (2010)

Disposición de Luminarias

Adicionalmente, el RETILAP brinda configuraciones recomendadas para la instalación de luminarias de acuerdo a la clase de iluminación determinada, esta información se presenta en la tabla 19.

Tabla 19. Recomendación para disposición de luminarias

Clase de Iluminación	Altura (m)	Relación S/H	Disposición de las luminarias	
			Criterio	Disposición
M1	12 - 14	3,5 - 4	Dos carriles de circulación	Unilateral
M2	10 - 12	3,5 - 4	Dos carriles de circulación	Unilateral
M3	8,5 - 10	3,5 - 4	Ancho de la calzada menor	Unilateral
M4	7 - 9	3,5 - 4	Unilateral	
M5	6	3,5 - 4	A criterio del diseñador	

Fuente: Ministerio de Minas y Energía de Colombia (2010)

La disposición unilateral supone una instalación de todas las luminarias en el mismo lado de la vía. El diseñador debe utilizar la luminaria que cumpla con los requisitos fotométricos según la altura de montaje, interdistancia y menor potencia eléctrica requerida.

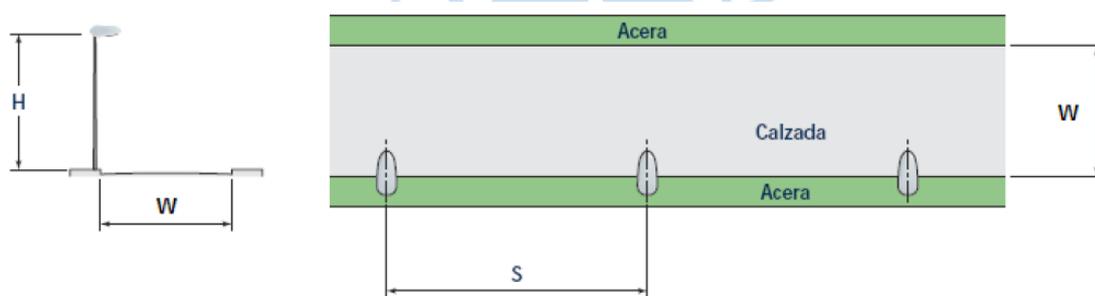


Figura 32. Disposición Unilateral de Luminarias

Fuente: Ministerio de Minas y Energía de Colombia (2010)

2.3 Reporte técnico CIE 115: 2010, Iluminación vial para tráfico motorizado y peatonal.

Este reporte creado por la Comisión Internacional de Iluminación, (CIE por sus siglas en francés) es una revisión y actualización de la versión del año 1995. Está organizado con la intención de ser un marco de referencia fácilmente adaptable a las necesidades de cualquier país individual que desee desarrollar sus propias normativas. Al igual que la norma colombiana, (de hecho, el RETILAP utiliza este reporte como referencia bibliográfica) presenta un modelo estructurado para clasificar las categorías de iluminación (M, P o C), basado en los conceptos de luminancia e iluminancia. Además, considera el aumento de la importancia de la eficiencia energética y del impacto ambiental, brindando información acerca la introducción de sistemas de iluminación adaptativos para tráfico motorizado, áreas de conflicto y áreas peatonales, en función de variables dependientes del tiempo, como volumen de tráfico y condiciones climatológicas. Como primer paso, establece dos “tipos” de iluminación:

- Iluminación normal

Recomendada cuando se requiere el mismo nivel de iluminación durante todo el tiempo de servicio del sistema. En este caso, al determinar la clase de iluminación, debe elegirse el mayor valor que cada parámetro podría tomar durante el periodo de operación. Por ejemplo, para volumen de tráfico, debe considerarse el valor de hora punta.

- Iluminación adaptativa.

Como se indicó anteriormente, cuando se trata de iluminación normal, la clase se determina utilizando los posibles valores máximos de cada parámetro. Sin embargo, el uso de la clase seleccionada podría no ser justificable durante todo el periodo de operación, si los valores de los parámetros que la definieron en un principio, varían considerablemente. En este caso, podría permitirse o requerirse una adaptación (generalmente una reducción) del nivel promedio de luminancia o iluminancia. Los factores más importantes a considerar para tomar esta decisión, son probablemente, el volumen de tráfico y las condiciones climatológicas. Es importante que los cambios en los niveles de luminosidad promedio, no afecten a otros criterios de calidad determinados en la categoría seleccionada. Por ejemplo, disminuir equitativamente la intensidad luminosa de todas las lámparas utilizando un *dimmer*, no afectará la uniformidad de luminancia o iluminancia. Pero hacerlo, apagando algunas lámparas, no es recomendable porque compromete directamente a la uniformidad luminosa. Cuando es posible determinar el patrón de variación de los valores de los parámetros, por ejemplo, a través de reportes estadísticos de tráfico, bastaría con instalar un sistema de control temporizado.

En otras situaciones, un sistema de control retroalimentado con información en tiempo real podría preferirse. Este enfoque permitiría activar un tipo de iluminación *normal* en caso de obras en la vía, accidentes, mal clima o baja visibilidad.

Las siguientes tablas cuantifican los detalles de las diferentes categorías de iluminación según se trate de *iluminación normal* o de *iluminación adaptativa*.

Categoría M

Para determinar la clase de la categoría M, utilizando la tabla 20, deben seleccionarse los valores ponderativos apropiados para los diferentes parámetros y realizar la suma correspondiente (V_p). El número de clase M se calcula entonces según: Número de clase $M = 6 - V_p$. Si el resultado no es un número entero, debe redondearse al valor inmediato inferior.

Una vez determinada la clase adecuada, en la tabla 21, se presentan los valores sugeridos para los siguientes parámetros fotométricos: luminancia promedio (L_{av}), uniformidad general (U_o) y longitudinal (U_l) de luminancia, relación de alrededores (R_s) y el incremento de umbral (f_{TI}).

Tabla 20. Parámetros de selección para la categoría M

Parámetro	Opciones	Valor ponderativo V_p	V_p seleccionado
Velocidad	Muy alta	1	
	Alta	0,5	
	Moderada	0	
Volumen de tráfico	Muy alto	1	
	Alto	0,5	
	Moderado	0	
	Bajo	-0,5	
	Muy bajo	-1	
Composición del tráfico	Mixto, con un alto porcentaje no motorizado	2	
	Mixto	1	
	Sólo motorizado	0	
Separación de carriles	No	1	
	Sí	0	
Densidad de intersecciones	Alta	1	
	Moderada	0	
Vehículos aparcados	Presentes	0,5	
	Ausentes	0	
Luminancia de ambiente	Alta	1	
	Moderada	0	
	Baja	-1	
Guía visual /control de tráfico	Pobre	0,5	
	Moderada o buena	0	
		Suma de V_p	

Fuente: CIE (2010)

Tabla 21. Clases de iluminación para tráfico motorizado

Clase de Iluminación	Superficie de la vía				Incremento de umbral	Relación de alrededores
	Seca			Húmeda		
	L_{prom} (cd/m ²)	U_o	U_l	U_o	f_{TI} (%)	R_s
M1	2	0,4	0,7	0,15	10	0,5
M2	1,5	0,4	0,7	0,15	10	0,5
M3	1	0,4	0,6	0,15	15	0,5
M4	0,75	0,4	0,6	0,15	15	0,5
M5	0,5	0,35	0,4	0,15	15	0,5
M6	0,3	0,35	0,4	0,15	20	0,5

Fuente: CIE, (2010)

Categoría C

Para determinar la categoría C, se sigue un procedimiento similar al utilizado con la categoría M, usando la tabla mostrada en la tabla 18. El número de clase C se calcula según:

$$\text{Número de clase C} = 6 - V_p$$

Para zonas de conflicto, el reporte sugiere el diseño por luminancia, sin embargo, cuando por alguna razón esto no es factible, se puede recurrir a la iluminancia como criterio de diseño. La correspondencia entre luminancia e iluminancia horizontal promedio depende de la luminosidad de la superficie de la vía, representado por el coeficiente de luminosidad (q_0). La figura 56 presenta la relación entre las categorías M y C para tres valores diferentes de q_0 . El cálculo real de luminancia promedio (L) se puede realizar a partir de la iluminancia promedio de la zona de conflicto. Si las propiedades reflectivas están determinadas en función de tablas r y del coeficiente de reflectividad promedio q_0 , la luminancia promedio se calcula según: $L = q_0 \cdot E$. Si solo se conoce la reflectancia difusa (ρ), entonces el cálculo puede realizarse con la siguiente fórmula: $L = \frac{\rho}{\pi} E$. Si toda esta información previa es desconocida, se sugiere asumir un valor de $0.07 \text{ cd} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{Lx}^{-1}$ para q_0 o de 0.2 para ρ .

Tabla 22. Parámetros de selección para la categoría C

Parámetro	Opciones	Valor ponderativo V_p	V_p seleccionado
Velocidad	Muy alta	3	
	Alta	2	
	Moderada	1	
	Baja	0	
Volumen de tráfico	Muy alto	1	
	alto	0,5	
	Moderado	0	
	Bajo	-0,5	
	Muy bajo	-1	
Composición del tráfico	Mixto, con un alto porcentaje no motorizado	2	
	Mixto	1	
	Sólo motorizado	0	
Separación de carriles	No	1	
	Sí	0	
Luminancia de ambiente	Alta	1	
	Moderada	0	
	Baja	-1	
Guía visual /control de tráfico	Pobre	0,5	
	Moderada o buena	0	
		Suma de V_p	

Fuente: CIE, (2010)

Tabla 23. Comparación de las categorías M y C para distintos valores de q_0

Clase de iluminación M			M1	M2	M3	M4	M5	M6
Luminancia promedio L en cd.m^2			2	1,5	1	0,75	0,5	0,3
Clase de iluminación C si $q_0=0.05 \text{ cd.m}^{-2}\text{lx}^{-1}$			C0	C1	C2	C3	C4	C5
Iluminancia promedio E en lx			50	30	20	15	10	7,5
Clase de iluminación C si $q_0=0.07 \text{ cd.m}^{-2}\text{lx}^{-1}$		C0	C1	C2	C3	C4	C5	
Iluminancia promedio E en lx		50	30	20	15	10	7.5	
Clase de iluminación C si $q_0=0.09 \text{ cd.m}^{-2}\text{lx}^{-1}$	C0	C1	C2	C3	C4	C5		
Iluminancia promedio E en lx	50	30	20	15	10	7.5		

Fuente: CIE, (2010)

Tabla 24. Clases de iluminación para zonas de conflicto

Clase de Iluminación	Iluminancia promedio sobre toda la superficie utilizada E (lx)	Uniformidad de Iluminancia U_0 €	Incremento de umbral f_i (%)	
			Velocidad alta y moderada	Velocidad baja y muy baja
C0	50	0,4	10	15
C1	30	0,4	10	15
C2	20	0,4	10	15
C3	15	0,4	15	20
C4	10	0,4	15	20
C5	7,5	0,4	15	25

Fuente: CIE, (2010)

Categoría P

Los parámetros relevantes para seleccionar apropiadamente la clase P para un área peatonal determinada, están especificados en la tabla presentada en la tabla 21. Las clases P1 a P6 están definidas por los criterios fotométricos especificados para cada una en la tabla 22.

Tabla 25. Parámetros de selección para la clase P

Parámetro	Opciones	Valor ponderativo V_p	V_p seleccionado
Velocidad	Baja	1	
	Muy baja (velocidad al caminar)	0	
Volumen de tráfico	Muy alto	1	
	Alto	0,5	
	Moderado	0	
	Bajo	-0,5	
	Muy bajo	-1	
Composición del tráfico	Peatones, ciclistas y tráfico motorizado	2	
	Peatones y tráfico motorizado	1	
	Sólo peatones y ciclistas	1	
	Sólo peatones y ciclistas	0	
	Sólo ciclistas	0	
Vehículos aparcados	Presentes	0,5	
	Ausentes	0	
Luminancia de ambiente	Alta	1	
	Moderada	0	
	Baja	-1	
		Suma de V_p	

(CIE, 2010)

Para determinar la categoría P, utilizando la tabla de la tabla 22, deben seleccionarse los valores ponderativos apropiados para los diferentes parámetros y realizar la suma correspondiente (V_p).

El número de la clase P se calcula entonces según:

$$\text{Número de clase } P = 6 - V_{ws}$$

Si el resultado no es un número entero, debe redondearse al valor inmediato inferior.

Tabla 26. Clases de iluminación para vías peatonales.

Clase de Iluminación	Iluminancia horizontal promedio $E_{h,av}$ (lx)	Iluminancia horizontal mínima $E_{h,av}$ (lx)
	P1	15
P2	10	2
P3	7,5	1,5
P4	5	1
P5	3	0,6
P6	2	0,4

Fuente: CIE, (2010)

2.4 EN 13201-2:2013: Requisitos de desempeño

Este documento fue preparado por el Comité técnico CEN/TC 169 “Luz e iluminación”, cuya secretaría es administrada por el *Deutsches Institut für Normung* (DIN)

En total, está dividido en 4 partes: Requisitos de desempeño, cálculos de desempeño, métodos para medir el desempeño luminoso e indicadores de eficiencia energética. Para el propósito de esta tesis, solo se evaluará la parte referida a los requisitos de desempeño. De la misma manera que en las normativas previas, este estándar presenta 3 tipos de clases principales: las clases M, diseñadas para ser aplicadas en rutas de tráfico motorizado media y alta velocidad, las clases P, preparadas para vías peatonales y ciclovías y las clases C, diseñadas para las llamadas “zonas críticas o de conflicto”, tales como intersecciones, rotondas o áreas específicas donde el diseño por luminancia no es aplicable o es impráctico. Es necesario mencionar que la información proporcionada por esta norma con respecto a las categorías viales es prácticamente la misma que la extraída del Reporte Técnico CIE. Sin embargo, es necesario incluirla en este estudio porque es el estándar frente al cual se comparan los resultados obtenidos por el software Dialux. La información relevante se presenta a continuación:

Categoría M

Tabla 27. Clases de iluminación para tráfico motorizado

Clase de Iluminación	Superficie de la vía				Incremento de umbral	Relación de alrededores
	Seca		Húmeda			
	L_{prom} (cd/m ²)	U_0	U_1	U_0	f_{TI} (%)	R_s
M1	2	0,4	0,7	0,15	10	0,35
M2	1,5	0,4	0,7	0,15	10	0,35
M3	1	0,4	0,6	0,15	15	0,3
M4	0,75	0,4	0,6	0,15	15	0,3
M5	0,5	0,35	0,4	0,15	15	0,3
M6	0,3	0,35	0,35	0,15	20	0,3

Fuente: EN (2013)

Categoría C

Tabla 28. Clases de iluminación áreas críticas

Clase de Iluminación	Iluminancia de promedio sobre toda la superficie utilizada E (lx)	Uniformidad de Iluminancia $U_0 \leq$
C0	50	0,4
C1	30	0,4
C2	20	0,4
C3	15	0,4
C4	10	0,4
C5	7,5	0,4

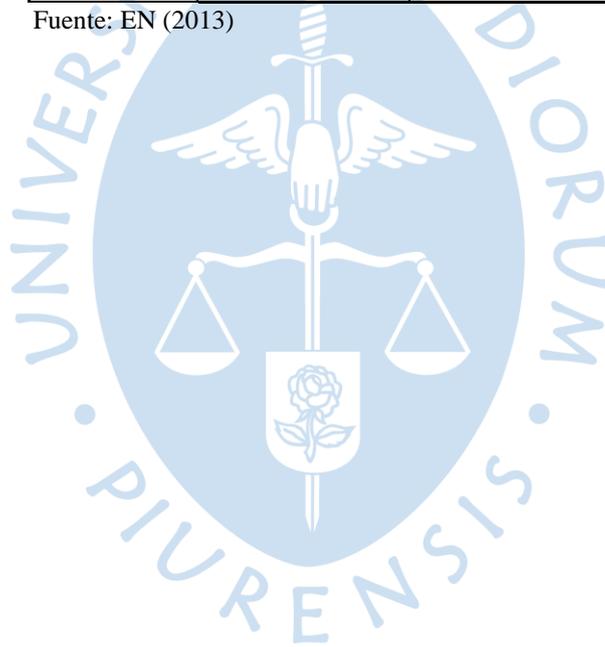
Fuente: EN (2013)

Categoría P

Tabla 29. Clases de iluminación para vías peatonales

Clase de Iluminación	Iluminancia horizontal promedio $E_{h,av}$ (lx)	Iluminancia horizontal mínima $E_{h,av}$ (lx)
P1	15	3
P2	10	2
P3	7,5	1,5
P4	5	1
P5	3	0,6
P6	2	0,4

Fuente: EN (2013)



Capítulo 3

Procedimiento para determinar los parámetros fotométricos en un sistema de alumbrado público

3.1 Desarrollo

Parte del procedimiento consiste en utilizar las tablas presentadas en el Apéndice B para comparar los resultados obtenidos de la simulación. Los valores paramétricos establecidos para las vías peatonales (P) y de conflicto (C), presentados en estas tablas, han sido extraídos del reporte técnico CIE 115 (2010) y de la norma EN 13201(2013). Estos valores son idénticos a los presentados por el Ministerio de Minas y Energía de Colombia. Cabe suponer que el gobierno colombiano consideró adecuadas las sugerencias proporcionadas por estos organismos europeos y simplemente las adoptó. Además, tomando en cuenta que la Norma Técnica Peruana no brinda información concisa respecto a estas categorías viales tan importantes, el autor considera necesario incluirlas en el procedimiento, cuyo objetivo final es seleccionar una lámpara que cumpla con todos los requisitos fotométricos especificados según la categoría correspondiente a la vía de estudio.

Con respecto a la tabla para la categoría motorizada (M), era necesario procurar que los valores elegidos para cada parámetro se mantengan dentro de lo establecido por la norma nacional, la cual, a pesar de sus evidentes falencias, todavía es la guía oficial a seguir para el diseño de sistemas de alumbrado público en el Perú. Con este propósito en mente, se realizó una comparación entre la normativa peruana y las extranjeras. En este caso, el dato vinculante elegido fue la velocidad de circulación establecida para cada clase. Por ejemplo, según el CIE, la clase M1 es aplicable para vías con una velocidad de tránsito mayor a 80 km/h mientras que la Norma Técnica Peruana, establece el tipo de alumbrado I, para vías con una velocidad de tránsito de 60 km/h a más. Por lo tanto, para el propósito de este procedimiento, el autor se

permite considerar estas dos clases como equivalentes. Aplicando este mismo criterio para el resto de clases, se obtuvieron las siguientes equivalencias:

M1 = Tipo de alumbrado 1

M2 = Tipo de alumbrado 1

M3 = Tipo de alumbrado 2

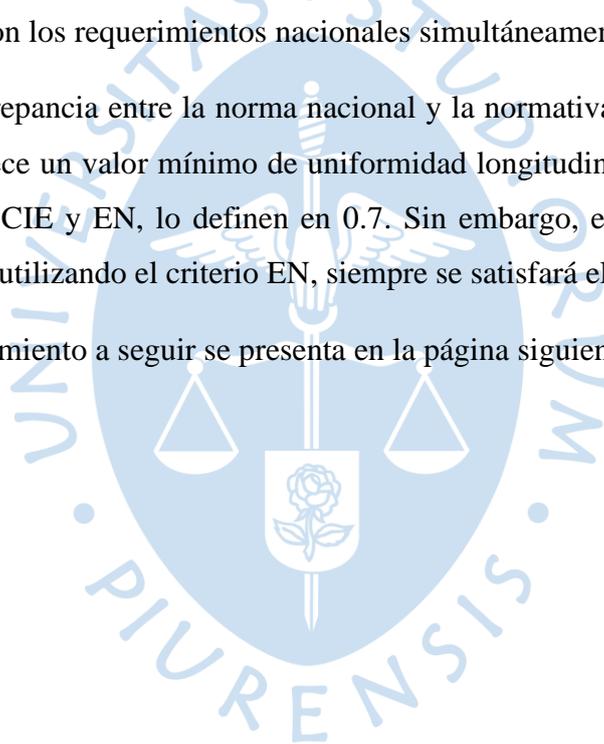
M4 = Tipo de alumbrado 3

M5 = Tipo de alumbrado 4 y 5

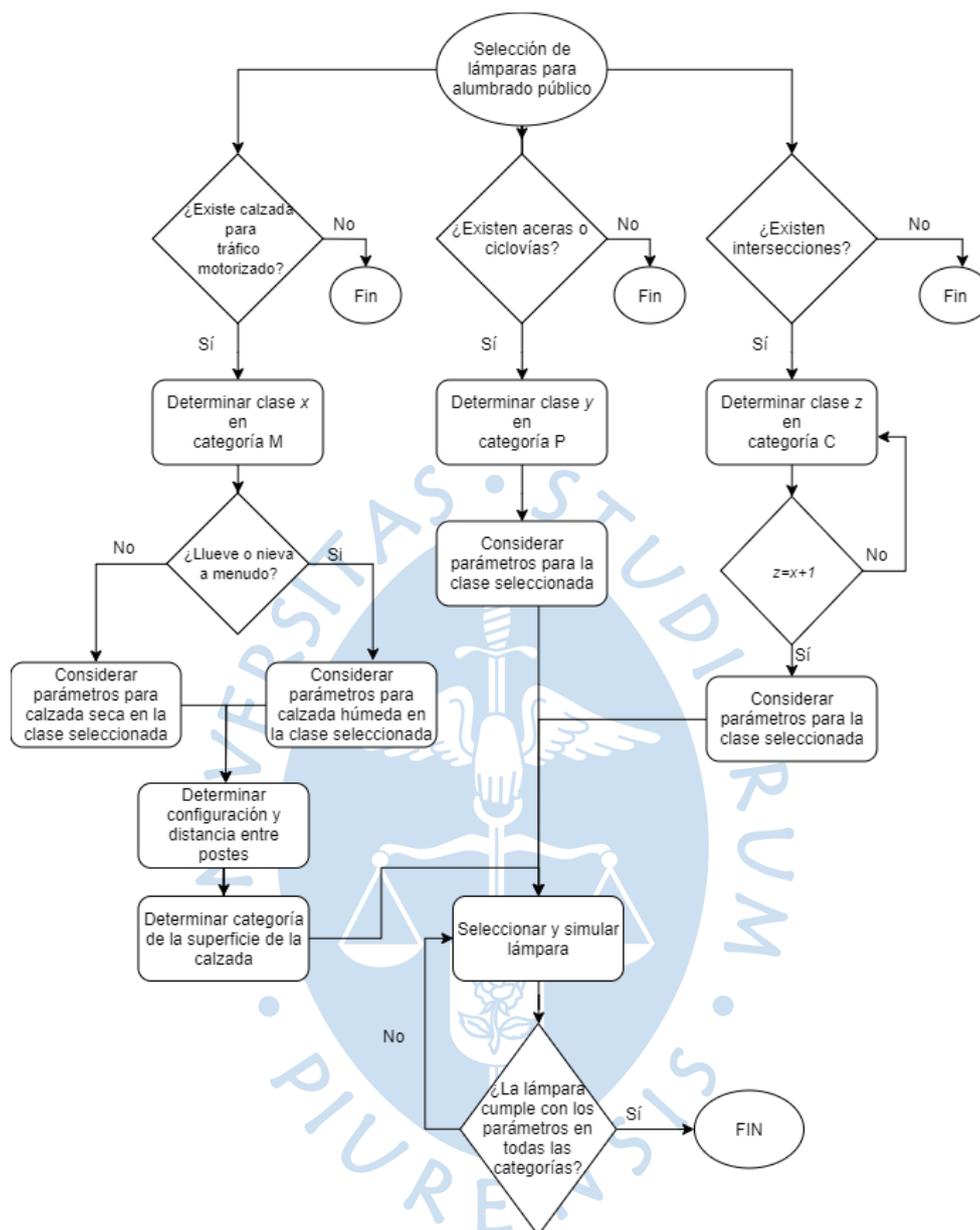
Con respecto a los valores de luminancia media establecidos para cada una de estas clases, la normativa peruana los determina dentro de un rango en lugar de utilizar valores puntuales. Lo cual resulta conveniente, ya que permite adoptar para el procedimiento los valores sugeridos por el EN y cumplir con los requerimientos nacionales simultáneamente.

Existe una ligera discrepancia entre la norma nacional y la normativa EN: En la clase M3, la norma peruana establece un valor mínimo de uniformidad longitudinal de luminancia (U_1) de 0.65, mientras que el CIE y EN, lo definen en 0.7. Sin embargo, esto no representa mayor inconveniente, ya que utilizando el criterio EN, siempre se satisfará el requerimiento nacional.

Finalmente, el procedimiento a seguir se presenta en la página siguiente.



3.2 Presentación del procedimiento



3.3 Software a utilizar para la simulación

Para evaluar el procedimiento y diferentes posibles configuraciones, se utilizará el software de simulación Dialux EVO en su versión 5.8.2.

Dialux es un software de libre distribución, disponible en <https://www.dial.de/en/dialux/>, el cual permite diseñar, calcular y visualizar sistemas de iluminación con un enfoque profesional. Puede utilizarse para aplicaciones en interiores o exteriores indistintamente. De esta manera se puede evaluar distintas opciones y optimizar el diseño rápidamente.



Capítulo 4

Aplicación del procedimiento y simulación

4.1 Documentación y situación actual de la vía a simular

Para poner a prueba el procedimiento, se realizará una simulación de alumbrado vial sobre un tramo de calzada en la avenida Vice, localizada en la ciudad de Piura. Este tramo de aproximadamente 560 metros fue remodelado completamente hace poco más de cuatro años y conecta dos de las principales avenidas de la ciudad: La avenida Andrés Avelino Cáceres (ex Panamericana) y la avenida Sánchez Cerro. Además, es una de las vías de entrada al centro comercial más grande de la ciudad. Sin embargo, pese a su importancia, el autor considera que la iluminación de la vía es bastante deficiente, a pesar de estar indirecta y parcialmente iluminada por las luces del centro comercial aledaño. Utilizando un luxómetro se verificó que, en diferentes puntos a lo largo de la calzada, la iluminancia era igual a 1-2 luxes, mientras que, en las aceras, donde había luminarias instaladas, alcanzaba un valor aceptable de hasta 20 luxes. En la figura 35, se presenta una fotografía de la avenida Vice durante el año 2014, antes del proceso de remodelación. En esta, se aprecia que varios postes del lado izquierdo ya habrían estado instalados antes que el proyecto empezara. Además, se observa la completa ausencia de postes al lado derecho de la vía, situación que se mantiene hasta el día de hoy, como se puede observar en la figura 36. Esta situación lleva a suponer que no se habría considerado en absoluto la instalación de alumbrado público para el proyecto de remodelación de la vía.

Según la información obtenida de la empresa de distribución eléctrica y posteriormente verificada in situ, la distancia promedio actual entre cada poste del lado izquierdo es de 28 m. Además, se utilizan lámparas de vapor de sodio de alta presión, con una potencia de 70 W. La falta de iluminación adecuada, sumada al alto tráfico peatonal y vehicular en la zona debido a su importancia comercial, puede contribuir no solamente a aumentar la frecuencia de accidentes

de tránsito sino también a promover la delincuencia al paso y la sensación de inseguridad en los usuarios de la vía.

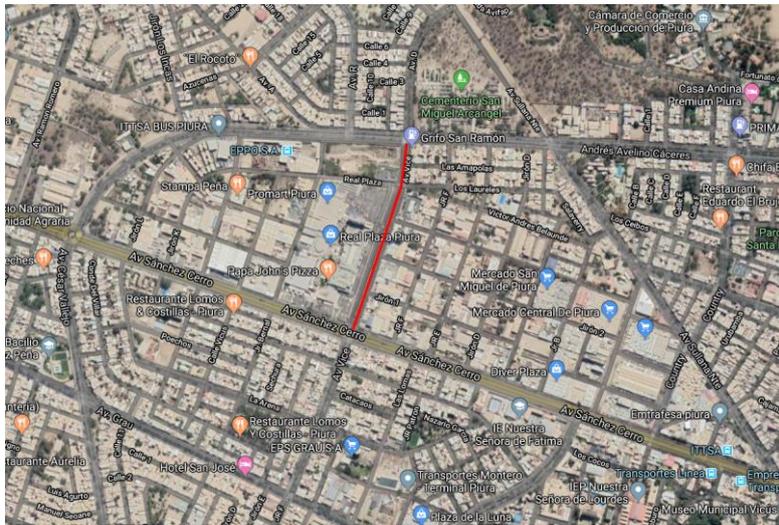


Figura 33. Ubicación del tramo a simular en el mapa de Piura
Fuente: Google Maps (2020)



Figura 34. Sección transversal del tramo a simular
Fuente: Municipalidad de Piura (2014)



Figura 35. Vista longitudinal del tramo de estudio durante el año 2014. En rojo se observan las luminarias ya instaladas en el lado izquierdo de la vía
Fuente: Google Maps, (2020)



Figura 36. Vista longitudinal del tramo del tramo de estudio. Nótese la diferencia de iluminación entre ambos lados de la vía. Los dos postes (luz blanca) que se aprecian al fondo en el lado derecho, pertenecen al centro comercial.
Fuente: Elaboración propia



Figura 37. Vista longitudinal de los primeros metros de la vía. A la izquierda, se observan dos de las tres únicas luminarias instaladas en ese lado a lo largo de todo el tramo.
Fuente: Elaboración propia



Figura 38. Lado derecho de la vía, donde se aprecia la ausencia de postes y la iluminación del centro comercial. Fuente: Elaboración propia



Figura 39. Lado izquierdo de la vía, notoriamente más iluminado que el derecho. Sin embargo, se verificó que la iluminancia sobre la vía es insuficiente según la norma peruana. Fuente: Elaboración propia.

4.2 Clasificación de la vía

En el tramo de estudio se observa abundante tráfico peatonal y vehicular. Por lo tanto, la clasificación de la vía se realizará dentro de las categorías M (vehículos motorizados) y P (peatones y ciclistas). Para este proceso, se utilizarán las tablas proporcionadas por el Reporte Técnico CIE y los criterios de clasificación de las normas peruanas y colombianas.

Categoría M

La velocidad de circulación en zonas urbanas, según el Reglamento Nacional de Tránsito nunca debe exceder los 40 km/h. Esta restricción aplica para la vía de estudio. Además, esta velocidad es considerada dentro de la clasificación M3 (velocidad media), según el RETILAP del Ministerio de Minas y Energía colombiano, y como tipo II, según la Norma Técnica DGE de OSINERG. El resto de parámetros han sido determinados a través de simple observación en la zona de estudio.

Aplicando la fórmula para determinar el número de clase:

$$M = 6 - V_p$$

$$M = 6 - 2.5 = 3.5$$

Utilizando el valor inmediato inferior determinamos la categoría **M3**.

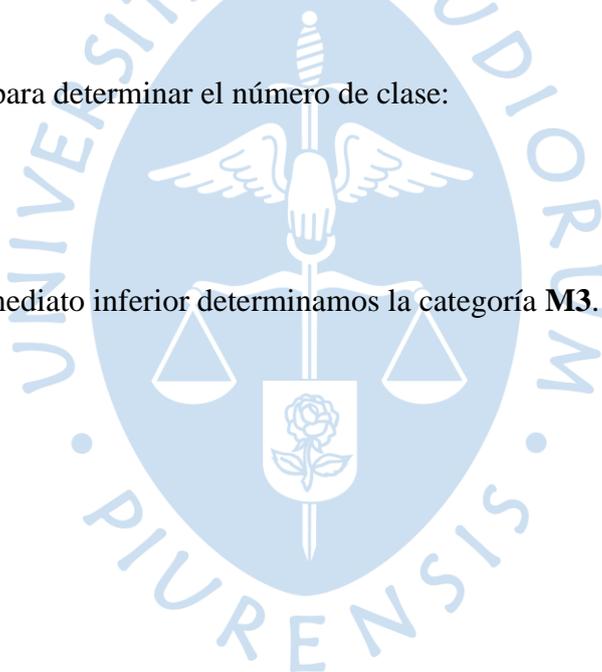


Tabla 30. Cálculo de la clase vehicular de la vía de estudio.

Parámetro	Opciones	Valor ponderativo V_p	V_p seleccionado
Velocidad	Muy alta	1	0
	Alta	0,5	
	Moderada	0	
Volumen de tráfico	Muy alto	1	0.5
	alto	0,5	
	Moderado	0	
	Bajo	-0,5	
	Muy bajo	-1	
Composición del tráfico	Mixto, con un alto porcentaje no motorizado	2	1
	Mixto	1	
	Sólo motorizado	0	
Separación de carriles	No	1	0
	Sí	0	
Densidad de intersecciones	Alta	1	0
	Moderada	0	
Vehículos aparcados	Presentes	0,5	0.5
	Ausentes	0	
Luminancia de ambiente	Alta	1	0
	Moderada	0	
	Baja	-1	
Guía visual /control de tráfico	Pobre	0,5	0.5
	Moderada o buena	0	
		Suma de V_p	2.5

Fuente: Elaboración propia

Categoría P

El valor de los parámetros ha sido estimado en función de las observaciones realizadas in situ.

bla 31. Cálculo de la clase vehicular de la vía de estudio.

Parámetro	Opciones	Valor ponderativo V_p	V_p seleccionado
Velocidad	Baja	1	1
	Muy baja (velocidad al caminar)	0	
Volumen de tráfico	Muy alto	1	0.5
	alto	0,5	
	Moderado	0	
	Bajo	-0,5	
	Muy bajo	-1	
Composición del tráfico	Peatones, ciclistas y tráfico motorizado	2	2
	Peatones y tráfico motorizado	1	
	Sólo peatones y ciclistas	1	
	Sólo peatones y ciclistas	0	
	Sólo ciclistas	0	
Vehículos aparcados	Presentes	0,5	0.5
	Ausentes	0	
Luminancia de ambiente	Alta	1	0
	Moderada	0	
	Baja	-1	
		Suma de V_p	4

Fuente: Elaboración propia

Aplicando la fórmula para determinar el número de clase:

$$P = 6 - V_p$$

$$M = 6 - 4 = 2$$

Utilizando el valor inmediato inferior, se determina la categoría **P2**.

4.3 Selección de lámparas y resultados

Habiendo clasificado el tramo de estudio como una vía M3 y P2, es posible empezar a seleccionar las lámparas adecuadas para cumplir los requerimientos de ambas categorías. Sin embargo, el autor considera relevante realizar en primer lugar, una simulación de la situación actual de la vía, tomando en cuenta la información obtenida previamente:

- Distancia entre postes: 28 m
- Tipo de lámpara: Sodio de alta presión
- Potencia: 70 W
- Disposición Unilateral
- Altura del poste: 9 m

Los resultados se presentan en las figuras 40 y 41.

Resultados para campos de evaluación
Factor de degradación: 0.80

Camino peatonal 1 (P2)

Em [lx] ≥ 10.00 ≤ 15.00	Emin [lx] ≥ 2.00
✗ 0.21	✗ 0.19

Calzada 2 (M3)

Lm [cd/m ²] ≥ 1.00	Uo ≥ 0.40	UI ≥ 0.60	Tl [%] ≤ 15	EIR ≥ 0.30
✗ 0.05	✓ 0.57	✓ 0.84	✓ 5	✓ 0.60

Calzada 1 (M3)

Lm [cd/m ²] ≥ 1.00	Uo ≥ 0.40	UI ≥ 0.60	Tl [%] ≤ 15	EIR ≥ 0.30
✗ 0.34	✓ 0.65	✓ 0.85	✓ 6	✓ 0.60

Camino peatonal 2 (P2)

Em [lx] ≥ 10.00 ≤ 15.00	Emin [lx] ≥ 2.00
✗ 2.17	✗ 1.35

Figura 40. Resultados de la simulación de la configuración actual.
Fuente: Elaboración propia.

Resulta evidente que la configuración actual no satisface los requerimientos de iluminación para esta vía. En las aceras, el valor de iluminancia media está muy por debajo del recomendado (inclusive en la acera más cercana a los postes). Asimismo, en ambas calzadas, la luminancia media tampoco alcanza el valor sugerido para la categoría M3.

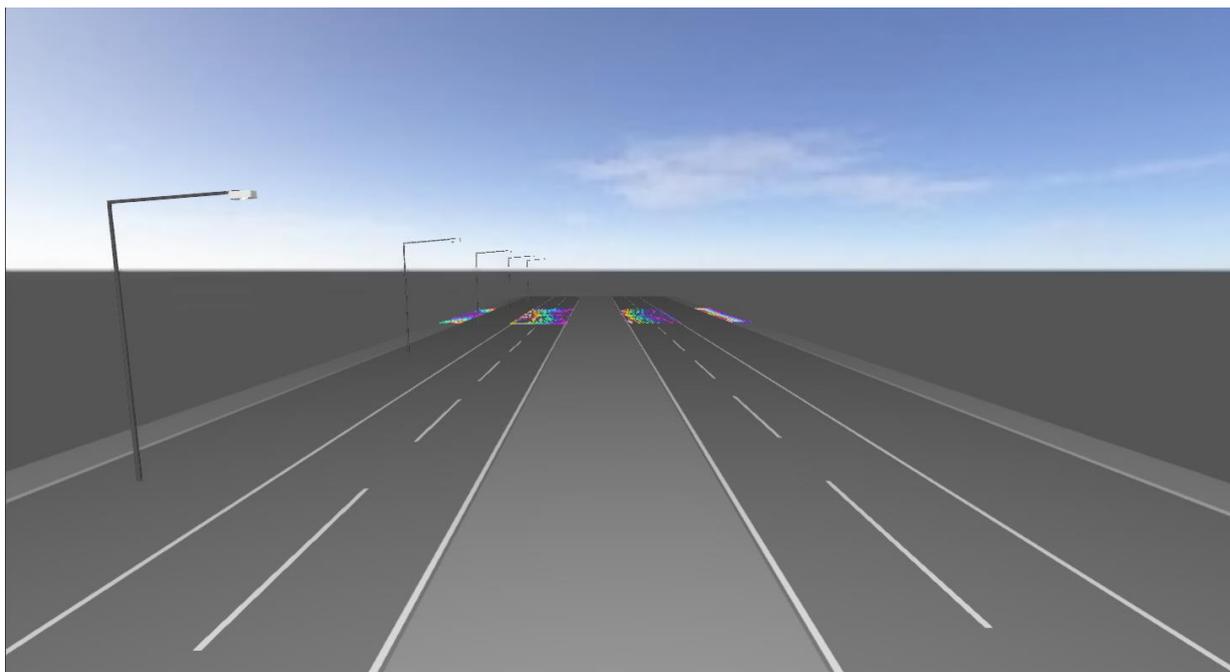


Figura 41. Simulación de la configuración actual.

Fuente: Elaboración propia

Para seleccionar la lámpara ideal, la marca Phillips pone un amplísimo catálogo de lámparas a disposición del diseñador. Sin embargo, recientemente, el Ministerio de Energía y Minas ha publicado una serie de directivas a seguir en cuanto a proyectos de alumbrado vial. Estas directivas sugieren específicamente, la utilización de lámparas led de 50-55 W o de 90-100 W para la iluminación de vías tipo II. Además, incluyen varias pautas relacionadas a las características de la instalación y a las propiedades fotométricas de la lámpara a instalar. La información más relevante se presenta en la tabla 32.

Tomando en cuenta estas recomendaciones, se selecciona la siguiente lámpara dentro del catálogo Phillips:



Figura 42. Lámpara de la colección ClearWay gen 2.

Fuente: Catálogo Phillips (2019)

Lámpara	BGP307 T25 1 xLED84- 4S/740 DM1
Tipo	LED
Temperatura de color	4000 K
IRC	70
Eficiencia Luminosa	165lm/W
Potencia	50 W
Flujo Luminoso	8232 lm

Esta lámpara pertenece a la colección ClearWay gen 2, la cual, de acuerdo al fabricante, ha sido diseñada con el objetivo de reducir al máximo el costo total de propiedad, combinando iluminación de alta calidad con un significativo ahorro energético y de mantenimiento.

Una vez seleccionada la lámpara a utilizar, el diseñador debe definir la configuración adecuada de los distintos parámetros relacionados a la instalación de la misma.

Esta configuración permite cumplir con todos los parámetros fotométricos requeridos por la normativa peruana para una vía de tipo II (o M3 de acuerdo al CIE), según se observa en la figura 43. Sin embargo, la iluminancia promedio en las aceras queda muy por debajo del límite aceptable para la categoría P2. Esto puede deberse a la distancia significativa existente entre el mástil y la acera (5.4 m), y a que las luminarias están orientadas en la dirección opuesta a esta. Por lo tanto, esta configuración no es satisfactoria. El reporte completo de esta simulación está disponible en el apéndice A.

Tabla 32. Recomendaciones para la instalación de un sistema de alumbrado vial

Recomendaciones del Ministerio de energía y Minas			
Luminaria		Lámpara	
Configuración	Unilateral al lado izquierdo del flujo vehicular	Tipo	LED
Vano promedio	30m	IRC	≥ 70
Altura de montaje	9m	Temperatura de color	4000+/- 275 K
Factor de mantenimiento	0,8	Eficiencia Luminosa	≥ 110 lm/W
Retranqueo	1m	Potencia	50-55 W
Ángulo de inclinación del Pastoral	5°	Vida útil	≥ 100000 h

Fuente: Ministerio de Energía y Minas (2019)

Tabla 33. Configuración 1 de luminaria seleccionada

Vano promedio	24 m
Altura de montaje	9 m
Ángulo de inclinación del Pastoral	5°
Retranqueo	1 m
Luminarias por mástil	1
Disposición	bilateral

Fuente: Elaboración propia

Camino peatonal 1 (P2)

Em [lx] ≥ 10.00 ≤ 15.00	Emin [lx] ≥ 2.00
✗ 3.53	✓ 2.23

Calzada 2 (M3)

Lm [cd/m ²] ≥ 1.00	Uo ≥ 0.40	UI ≥ 0.60	TI [%] ≤ 15	EIR ≥ 0.30
✓ 1.03	✓ 0.75	✓ 0.93	✓ 8	✓ 0.72

Calzada 1 (M3)

Lm [cd/m ²] ≥ 1.00	Uo ≥ 0.40	UI ≥ 0.60	TI [%] ≤ 15	EIR ≥ 0.30
✓ 1.03	✓ 0.75	✓ 0.93	✓ 8	✓ 0.72

Camino peatonal 2 (P2)

Em [lx] ≥ 10.00 ≤ 15.00	Emin [lx] ≥ 2.00
✗ 3.53	✓ 2.23

Figura 43. Resultados de la simulación de la configuración 1.
Fuente: Elaboración propia

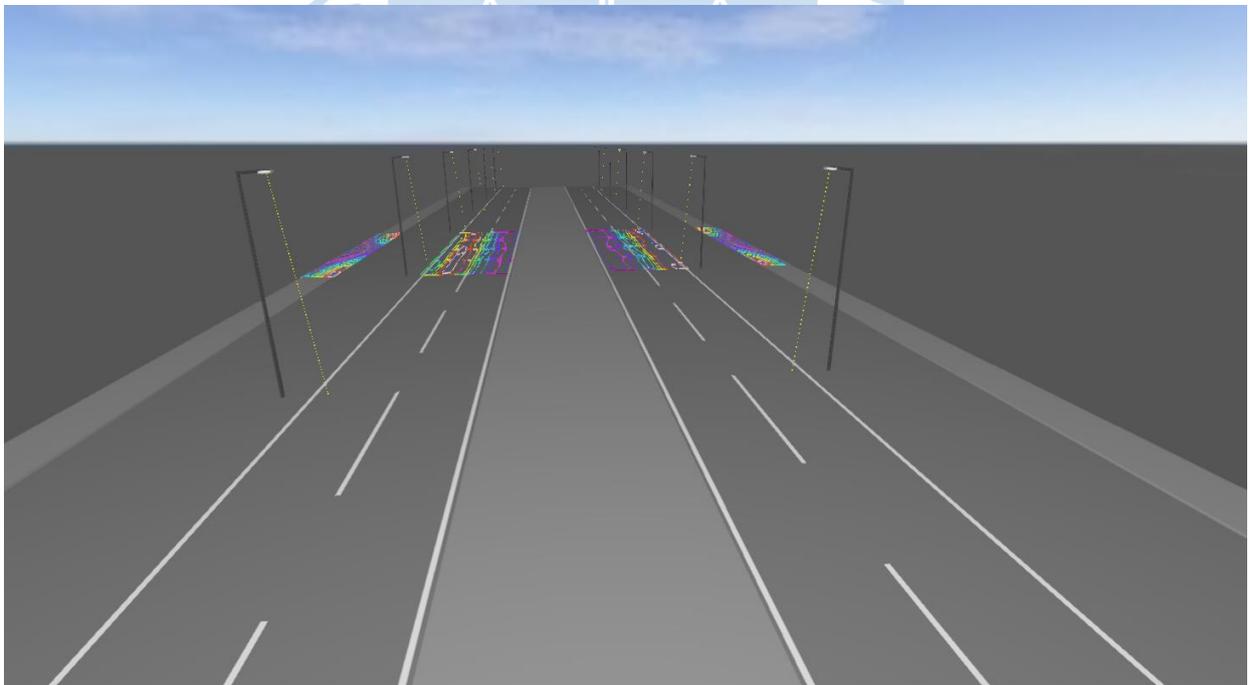


Figura 44. Simulación de la configuración 1. Nótese la evidente distancia entre el mástil y la acera.
Fuente: Elaboración propia

Tabla 34. Configuración 2 de luminaria seleccionada

Vano promedio	32 m
Altura de montaje	9 m
Ángulo de inclinación del Pastoral	5°
Retranqueo	1 m
Luminarias por mástil	2
Disposición	bilateral

Fuente: Elaboración propia

En esta nueva configuración se ha instalado dos luminarias por mástil, lo que permite resolver el problema de la iluminancia promedio en las aceras y de paso, aumentar el vano promedio hasta 32 m, reduciendo así la cantidad de postes a instalar. El informe completo de esta simulación está disponible en el apéndice A.

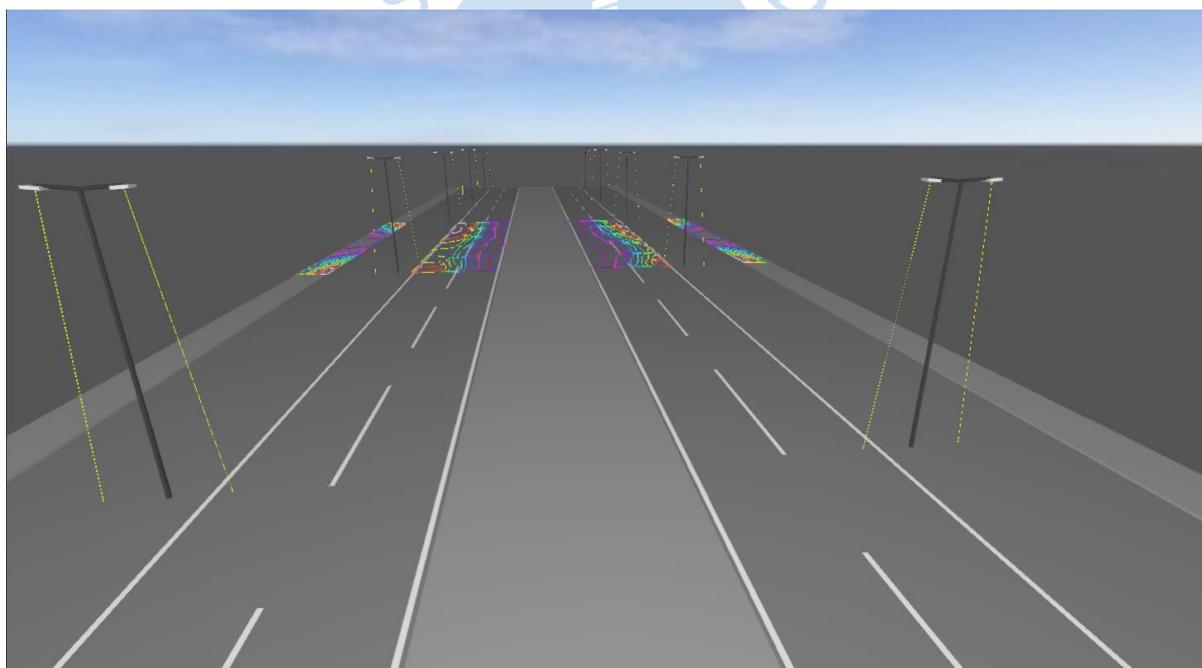


Figura 45. Simulación de la configuración 2

Fuente: Elaboración propia

Resultados para campos de evaluación
Factor de degradación: 0.80

Camino peatonal 1 (P2)

Em [lx] ≥ 10.00 ≤ 15.00	Emin [lx] ≥ 2.00
✓ 12.55	✓ 8.61

Calzada 2 (M3)

Lm [cd/m²] ≥ 1.00	Uo ≥ 0.40	UI ≥ 0.60	TI [%] ≤ 15	EIR ≥ 0.30
✓ 1.01	✓ 0.65	✓ 0.79	✓ 8	✓ 1.03

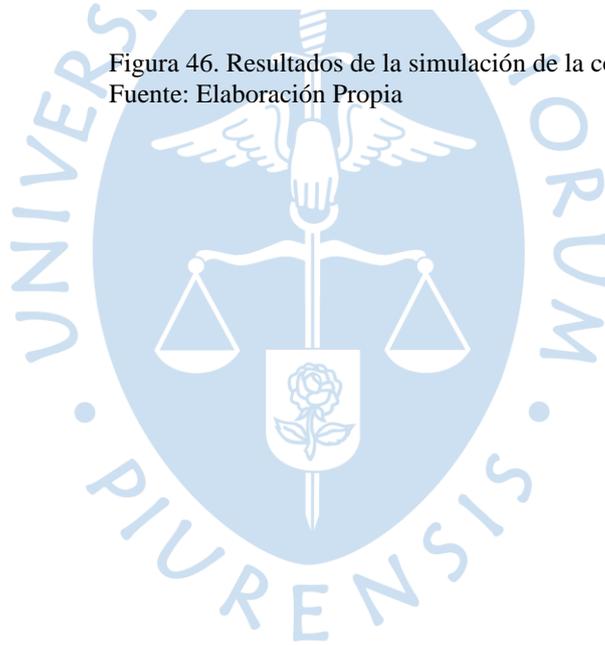
Calzada 1 (M3)

Lm [cd/m²] ≥ 1.00	Uo ≥ 0.40	UI ≥ 0.60	TI [%] ≤ 15	EIR ≥ 0.30
✓ 1.01	✓ 0.65	✓ 0.79	✓ 8	✓ 1.03

Camino peatonal 2 (P2)

Em [lx] ≥ 10.00 ≤ 15.00	Emin [lx] ≥ 2.00
✓ 12.55	✓ 8.61

Figura 46. Resultados de la simulación de la configuración 2
Fuente: Elaboración Propia



Conclusiones

- A través de este procedimiento, resulta sencillo clasificar la vía a simular. Mientras que los resultados obtenidos pueden ser rápidamente comparados con las tablas presentadas en el apéndice B, las cuales incluyen los parámetros sugeridos por los organismos internacionales de iluminación y la normativa peruana, garantizando de esta manera, un diseño seguro, eficiente y acorde a los requerimientos nacionales. Además, estas tablas incluyen varios parámetros obviados por el programa Dialux, los cuales pueden ser considerados por el diseñador según las circunstancias particulares de la vía a iluminar.
- A partir del análisis y posterior comparación con las normativas extranjeras, se evidenció que la norma técnica de iluminación peruana tiene varias deficiencias que necesitan ser corregidas y/o actualizadas. Por ejemplo, el cálculo de los parámetros fotométricos iniciales, para una determinada situación (alumbrado de una vía peatonal o ciclovía), no deberían confiarse a la experiencia o criterio del diseñador. El autor considera que una norma técnica debe ser lo más directa posible y nunca abierta a interpretaciones, ya que esto podría comprometer la efectividad del diseño de iluminación y, por ende, la seguridad de los usuarios finales.
- Luego de analizar y simular el diseño lumínico actual del tramo de estudio en la avenida Vice, es difícil no preguntarse: ¿Como es posible que una avenida importante, recientemente reparada y ampliada, esté iluminada en un sentido (aunque pobremente) y completamente a oscuras en el otro? ¿Qué ha tenido que suceder durante la etapa de evaluación del proyecto, para que este sea aprobado por la autoridad competente a pesar de no cumplir con los requisitos mínimos exigidos por la norma de iluminación? Si bien es cierto que se trata de un tramo relativamente corto, localizado en una zona urbana y que además no se interseca con calles ni avenidas importantes, nada de esto justifica ⁻¹ estado actual en el que se encuentra.



Referencias bibliográficas

Aalto University. (2010) *Annex 45 Guidebook on Energy Efficient Electric Lighting for Buildings*. Obtenido de:

http://www.lightinglab.fi/IEAAnnex45/guidebook/5_lighting%20technologies.pdf

Austrian Energy Agency (2017, septiembre) *LED Street Lighting: Procurement & Design*.

Recuperado de:

http://www.premiumlightpro.eu/fileadmin/user_upload/Guidelines/Premium_Light_Pro_Outdoor_LED_Guidelines.pdf

Authority of Main Roads Western Australia (2010) *AS-NZS 1158-1-2, Road lighting - Vehicular traffic (Category V) lighting - Guide to design, installation, operation and maintenance*

Box, P. (1981) *Major Road Accident Reduction by Illumination*. Transportation Research Record,1, pp 32-38.

Obtenido de: <http://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/trr/1989/1247/1247-005.pdf>

Commission Internationale de l'Eclairage. (2016) *Technical Note: The Use of Terms and Units in Photometry- Implementation of the CIE System for Mesopic Photometry*. CIE 004:2016.

Recuperado de: http://files.cie.co.at/841_CIE_TN_004-2016.pdf

Commission Internationale de l'Eclairage. (2010) *Technical Report: Lighting of roads for motor and pedestrian traffic*. CIE 115:2010. Recuperado de: https://kupdf.net/download/cie-115-2010-road-lighting_59086c84dc0d603107959e7a_pdf

Crabb, G.I. y Crinson, L. (2012). *The Impact of Street Lighting on Night-Time Road Casualties*. Transport Research Laboratory. Recuperado de: <https://trl.co.uk/sites/default/files/PPR318.pdf>

Fotios, S. y Gibbons, R. (2017, octubre 5) *Road lighting research for drivers and pedestrians: The basis of luminance and illuminance recommendations*. Lighting Research and Technology, 1, pp. 154-186. Recuperado de:

https://www.researchgate.net/publication/322020461_Road_lighting_research_for_drivers_and_pedestrians_The_basis_of_luminance_and_illuminance_recommendations

Hoffmann G. (2003) *CIE color space*. Obtenido de:

<http://docs-hoffmann.de/ciexyz29082000.pdf>

INDALUX (2002) *Lighting Engineering Handbook*. Obtenido de:

<https://issuu.com/lightonline/docs/lighting-handbook-indal-guide>

Lighting Europe (2013, mayo 23) *Guide for the application of the commission regulation (EU) No. 874/2012 with regard to energy labelling of electrical lamps and luminaires*.

Obtenido de : <https://www.eceee.org/static/media/uploads/site-2/ecodesign/products/domestic-lighting/lightingeurope-guide-regulation-874-2012-energy-labelling-version-1-23-may-2013.pdf>

Ministerio de Minas y Energía de Colombia (2010) *Reglamento técnico de iluminación y alumbrado público*. Recuperado de:

https://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/adminverblobawa?tabla=T_NORMA_ARCHIVO&p_NORMFIL_ID=430&f_NORMFIL_FILE=X&inputfileext=NORMFIL_FILENAME

Ministerio de Energía y Minas. (2002). *Norma Técnica DGE "Alumbrado de Vías Públicas en Zonas de Concesión de Distribución"*. Lima.

Ramos, S (2016) *Cálculo luminotécnico del alumbrado público de una calle en una zona urbana*. Recuperado de <http://deeea.urv.cat/public/PROPOSTES/pub/pdf/2394pub.pdf>

Rivera, L. (2011) *Análisis comparativo de parámetros generales entre las lámparas de alumbrado público*. Recuperado de: <https://www.monografias.com/trabajos93/analisis-comparativo-lamparas/analisis-comparativo-lamparas2.shtml>

Robertson, A. (1992, diciembre). *Color Perception*. Physics Today, 1, pp.24-29

Obtenido de: <https://haralick.org/DV/perception.pdf>

Schubert, F. (2006). *Light Emitting Diodes*. Reino Unido: Cambridge University Press, pp 275-278. Obtenido de:

<http://www.ifsc.usp.br/~lavfis2/BancoApostilasImagens/ApConstantePlanck/ApCtePlanck2013/LIGHT-EMITTING%20DIODES.e-0521865387-2e.pdf>

Sørensen, K. (2013, abril 28) *Road Lighting*. Recuperado de <https://nmfv.dk/wp-content/uploads/2012/03/Road-lighting.pdf>

Trashorras, J. (2001) *Diseño de instalaciones eléctricas de alumbrado*. Madrid: Paraninfo.





Apéndices





Apéndice A.

a. Reporte de configuración 1 en Avenida Vice

AvVice

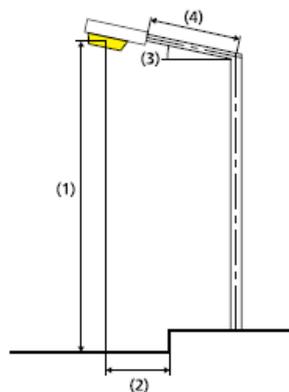
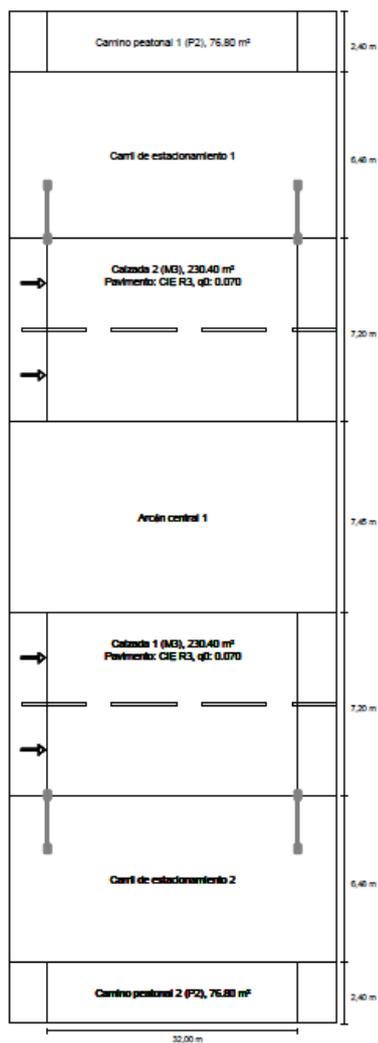
13/01/2020

Avenida Vice: Alternativa 1 / Resultados de planificación

DIALux

Avenida Vice hacia EN 13201:2015

Philips BGP307 T25 1 xLED84-4S/740 DM11



Lámpara:	1xLED84-4S/740
Flujo luminoso (luminaria):	7282.42 lm
Flujo luminoso (lámpara):	8400.00 lm
Horas de trabajo	
4000 h:	100.0 %, 50.0 W
W/km:	6200.0
Organización:	bilateral enfrente
Distancia entre mástiles:	32.000 m
Inclinación del brazo (3):	5.0°
Longitud del brazo (4):	0.998 m
Altura del punto de luz (1):	9.000 m
Saliente del punto de luz (2):	0.000 m

ULR:	0.00
ULOR:	0.00
Valores máximos de la intensidad lumínica	
a 70° y por encima:	630 cd/klm *
a 80° y por encima:	292 cd/klm *
a 90° y por encima:	0.00 cd/klm *
Clase de potencia lumínica:	/

Respectivamente en todas las direcciones que forman los ángulos especificados con las verticales inferiores (con luminarias instaladas aptas para el funcionamiento).

* Los valores de intensidad lumínica en [cd/klm] para el cálculo de la clase de potencia lumínica se refieren al flujo luminoso de luminaria conforme a EN 13201:2015.

La disposición cumple con la clase del índice de deslumbramiento D.1

Resultados para campos de evaluación

Factor de degradación: 0.80

Camino peatonal 1 (P2)

Em [lx] ≥ 10.00 ≤ 15.00	Emin [lx] ≥ 2.00
✗ 3.53	✓ 2.23

Calzada 2 (M3)

Lm [cd/m ²] ≥ 1.00	Uo ≥ 0.40	UI ≥ 0.60	TI [%] ≤ 15	EIR ≥ 0.30
✓ 1.03	✓ 0.75	✓ 0.93	✓ 8	✓ 0.72

Calzada 1 (M3)

Lm [cd/m ²] ≥ 1.00	Uo ≥ 0.40	UI ≥ 0.60	TI [%] ≤ 15	EIR ≥ 0.30
✓ 1.03	✓ 0.75	✓ 0.93	✓ 8	✓ 0.72

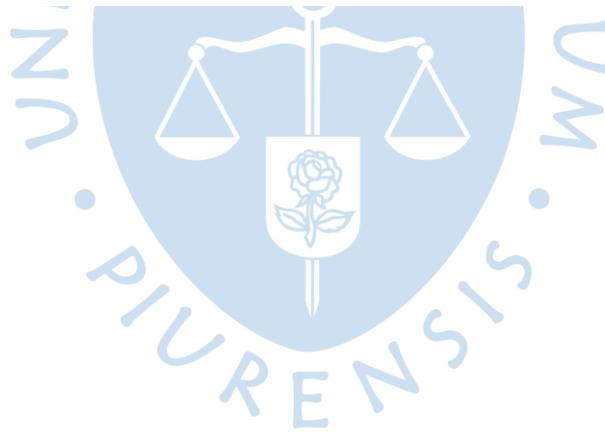
Camino peatonal 2 (P2)

Em [lx] ≥ 10.00 ≤ 15.00	Emin [lx] ≥ 2.00
✗ 3.53	✓ 2.23

Resultados para indicadores de eficiencia energética

Indicador de la densidad de potencia (Dp) 0.018 W/lx²

Densidad de consumo de energía

Organización: BGP307 T25 1 xLED84-4S/740 DM11 (400.0 0.9 kWh/m² año kWh/año)

b. Reporte de configuración 2

AvVice

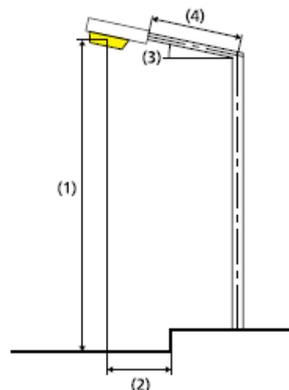
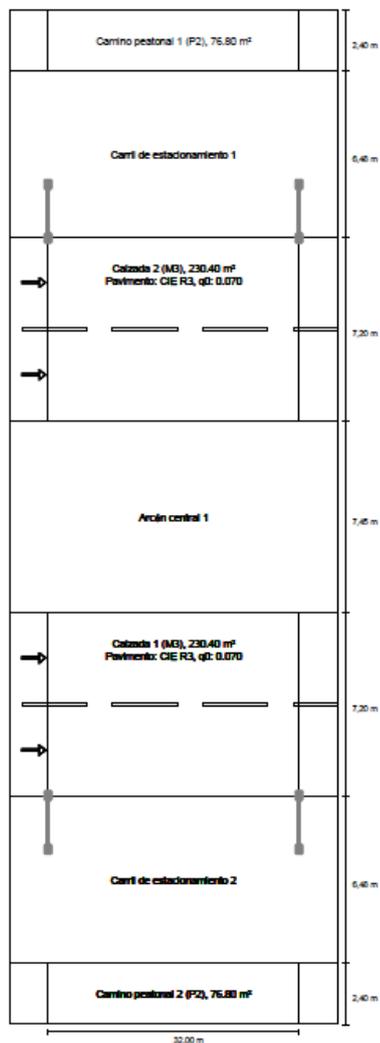
13/01/2020

Avenida Vice: Alternativa 1 / Resultados de planificación

DIALux

Avenida Vice hacia EN 13201:2015

Philips BGP307 T25 1 xLED84-4S/740 DM11



Lámpara:	1xLED84-4S/740
Flujo luminoso (luminaria):	7282.42 lm
Flujo luminoso (lámpara):	8400.00 lm
Horas de trabajo	
4000 h:	100.0 %, 50.0 W
W/km:	6200.0
Organización:	bilateral enfrente
Distancia entre mástiles:	32.000 m
Inclinación del brazo (3):	5.0°
Longitud del brazo (4):	0.998 m
Altura del punto de luz (1):	9.000 m
Saliente del punto de luz (2):	0.000 m

ULR:	0.00
ULOR:	0.00
Valores máximos de la intensidad lumínica	
a 70° y por encima:	630 cd/klm *
a 80° y por encima:	292 cd/klm *
a 90° y por encima:	0.00 cd/klm *
Clase de potencia lumínica:	/

Respectivamente en todas las direcciones que forman los ángulos especificados con las verticales inferiores (con luminarias instaladas aptas para el funcionamiento).

* Los valores de intensidad lumínica en [cd/klm] para el cálculo de la clase de potencia lumínica se refieren al flujo luminoso de luminaria conforme a EN 13201:2015.

La disposición cumple con la clase del índice de deslumbramiento D.1

Resultados para campos de evaluación
Factor de degradación: 0.80

Camino peatonal 1 (P2)

Em [lx] ≥ 10.00 ≤ 15.00	Emin [lx] ≥ 2.00
✓ 12.55	✓ 8.61

Calzada 2 (M3)

Lm [cd/m ²] ≥ 1.00	Uo ≥ 0.40	UI ≥ 0.60	TI [%] ≤ 15	EIR ≥ 0.30
✓ 1.01	✓ 0.65	✓ 0.79	✓ 8	✓ 1.03

Calzada 1 (M3)

Lm [cd/m ²] ≥ 1.00	Uo ≥ 0.40	UI ≥ 0.60	TI [%] ≤ 15	EIR ≥ 0.30
✓ 1.01	✓ 0.65	✓ 0.79	✓ 8	✓ 1.03

Camino peatonal 2 (P2)

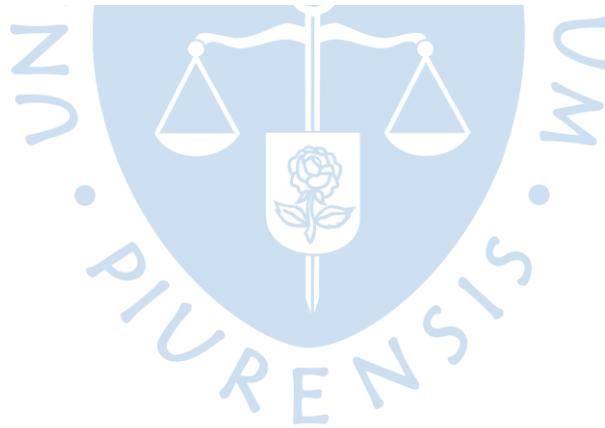
Em [lx] ≥ 10.00 ≤ 15.00	Emin [lx] ≥ 2.00
✓ 12.55	✓ 8.61

Resultados para indicadores de eficiencia energética

Indicador de la densidad de potencia (Dp) 0.022 W/lxm²

Densidad de consumo de energía

Organización: BGP307 T25 1 xLED84-4S/740 DM11 (800.0 1.3 kWh/m² año kWh/año)



Apéndice B. Tablas de clasificación de vías

a. Vías vehiculares

VIAS VEHICULARES																		
Clasificación	Descripción de la vía	Velocidad de circulación (km/h)	Tránsito de Vehículos (Vehículos/hora)	Todas las vías				Vías sin o con pocas intersecciones	Vías con calzadas peatonales no iluminadas	Valor promedio (mínimo mantenido) de iluminancia según tipo de superficie de la vía (lx)				Uniformidad de iluminancia (%)	Instalación de luminarias			
				Luminancia promedio mínimo mantenida	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 mínima	R1	R2 Y R3	R4	E _{min} /E _{prom}		Altura (m)	Relación S/H	Disposición de las luminarias	
					cd/m ²	Seca								Húmeda			≤ %	Criterio
M1 (I)	Autopistas y carreteras	V>80	T>1000	2	0,4	0,15	10	0,7	0,5	NR	NR	NR		12-14	3.5-4	Dos carriles de circulación	Unilateral	
M2 (I)	Vías de acceso controlado y vías rápidas	60<V<80	500<T<1000	1,5	0,4	0,15	10	0,7	0,5	NR	NR	NR		10-12	3.5-4	Dos carriles de circulación	Unilateral	
M3 (II)	Vías principales y ejes viales	30<V<60	250<T<500	1	0,4	0,15	15	0,65	0,5	12	17	15	34	8.5-10	3.5-4	Ancho de la calzada menor	Unilateral	
M4 (III)	Vías primarias y colectoras	V<30	100<T<250	0,75	0,4	0,15	15	NR	NR	8	12	10	25	7-9	3.5-4	Unilateral		
M5 (IV y V)	Vías secundarias	Al paso	T<100	0,5	0,35	0,15	15	NR	NR	6	9	8	18	6	3.5-4	A criterio del diseñador		

b. Vías peatonales / ciclovías

VIAS PEATONALES ICICLOVÍAS					
Clasificación	Descripción	Iluminancia Horizontal		Requerimiento adicional si es necesaria la identificación facial	
		Valor promedio (lx)	Valor mínimo (lx)	Iluminancia vertical mínima (lx)	Iluminancia semicilíndrica mínima (lx)
P1	Vías de muy elevado prestigio urbano	20	7,5	5	3
P2	Utilización nocturna intensa por peatones y ciclistas	10	3	3	2
P3	Utilización nocturna moderada por peatones y ciclistas	7,5	1,5	2,5	1,5
P4	Utilización nocturna baja por peatones y ciclistas, únicamente asociada a las propiedades adyacentes	5	1	1,5	1
P5	Utilización nocturna baja por peatones y ciclistas, únicamente asociada a las propiedades adyacentes. Importante preservar el carácter arquitectónico del ambiente.	3	0,6	1	0,6
P6	Utilización nocturna muy baja por peatones y ciclistas, únicamente asociada a las propiedades adyacentes. Importante preservar el carácter arquitectónico del ambiente	1,5	0,2	0,6	0,4
P7	Vías en donde únicamente se requiere una guía visual suministrada por la luz directa de las luminarias	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica

Z

c. Áreas críticas o de conflicto

ÁREAS CRÍTICAS O DE CONFLICTO		
Clasificación	Iluminancia mínima (lx)	Uniformidad general $U_0 \geq$ (%)
C0	50	40
C1	30	40
C2	20	40
C3	15	40
C4	10	40
C5	7,5	40

T U R E N S I