



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
ARAGÓN

Requerimientos de alumbrado vial con
tecnología LED

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO ELÉCTRICO-ELÉCTRONICO

P R E S E N T A

GONZÁLEZ CERVANTES JESUS

DIRECTOR DE TESIS

ING. ABEL VERDE CRUZ





Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Índice.....	I
Objetivo.....	II
Introducción.....	III
OBJETIVO:.....	4
INTRODUCCIÓN.....	5
CAPITULO 1 DEFINICIONES Y CONCEPTOS DE ILUMINACIÓN.....	7
1.1 Medidas y unidades.....	8
1.1.1 Flujo luminoso.....	8
1.1.2 Eficacia luminosa.....	8
1.1.3 Cantidad de luz.....	8
1.1.4 Intensidad luminosa.....	9
1.1.5 Iluminancia.....	9
1.1.6 Exposición luminosa.....	9
1.1.7 Luminancia.....	10
1.2 Luz y fuentes de luz.....	10
1.3 Luz: Propiedades y características.....	12
1.3.1 Cantidad de luz.....	12
1.3.2 Luz difusa y dirigida.....	15
1.3.3 Deslumbramiento.....	17
1.4 Color de luz y reproducción cromática.....	20
1.5 Principios de la conducción de luz.....	24
1.5.1 Reflexión.....	24
1.5.2 Transmisión.....	24
1.5.3 Absorción.....	24
1.5.4 Refracción.....	25
1.5.5 Interferencia.....	25
CAPÍTULO 2 CONCEPTOS DE ALUMBRADO VIAL.....	26
2.1 Objetivo del alumbrado vial.....	27
2.2 Factores para el diseño de iluminación.....	28
2.2.1 Campo visual del conductor.....	29

2.2.2	Visibilidad	29
2.2.3	Deslumbramiento y contaminación visual	31
2.2.4	Contaminación visual	33
2.2.5	Elección correcta de las lámparas	37
2.3	Contaminación lumínica.....	40
2.3.1	Definición	40
2.3.2	Causas.....	40
2.3.3	Efectos	41
2.3.4	Soluciones	41
2.4	Iluminación de carreteras	43
2.5	Pavimentos.....	50
2.6	Nivel de luminancia	52
2.7	Confort visual	54
2.8	Nivel de iluminación.....	55
2.9	Clasificación de carreteras según la CIE	58
2.9.1	Selección de clases de alumbrado.....	58
2.9.2	Clases de recubrimientos mojados	60
2.9.3	Tramos singulares	61
2.10	Tipos de carreteras.....	64
2.10.1	El tipo A1	64
2.10.2	El tipo A2	67
2.11	Método de los 21 puntos	70
CAPÍTULO 3 ILUMINACIÓN VIAL CON TECNOLOGÍA LED		72
3.1	Calidad, seguridad y eficiencia en el alumbrado vial	73
3.1.1	Criterios de calidad.....	73
3.1.2	Criterios de seguridad	81
3.1.3	Criterios de eficiencia.....	83
3.1.4	Vida útil	84
3.1.5	Protección del cielo nocturno	85
3.2	La norma europea EN 13201.....	87
3.2.1	Selección de clases de iluminación	87
3.2.2	Requisitos de rendimiento, métodos de medición y cálculo	88
3.2.3	Indicadores de rendimiento energético.....	90

3.2.4 Ejemplo: carreteras en áreas urbanas.....	93
3.2.5 Ejemplo: carreteras en áreas rurales	96
3.3 Componentes y diseño de la iluminación	98
3.3.1 Componentes del sistema de iluminación	98
3.3.2 Sistemas de soporte	105
3.3.3 Sistemas eléctricos	108
3.3.4 Sistemas de control de iluminación vial.....	109
3.3.4 Estrategias de control de iluminación vial	113
3.4 Criterios de adquisición para alumbrado público LED	117
3.4.1 Elementos generales para las especificaciones técnicas de los sistemas de alumbrado público.....	117
3.4.3 Criterios técnicos.....	118
3.4.4 Problemas contractuales (instalación, puesta en servicio).....	122
CONCLUSIONES	125
ACRÓNIMOS Y ABREVIATURAS	127
REFERENCIAS.....	129
BIBLIOGRAFÍA.....	130

OBJETIVO:

Analizar los requerimientos de alumbrado vial con tecnología led vigente en nuestro país, utilizando los conceptos de iluminación, realizando el análisis de las diferentes tecnologías de iluminación. Se busca hacer un análisis comparativo de la tecnología de iluminación más común en iluminación vial contra la tecnología led

Objetivos particulares:

- Analizar las definiciones y conceptos de iluminación
- Analizar los conceptos de alumbrado vial
- Análisis de iluminación vial con tecnología LED

INTRODUCCIÓN

En la luminotecnia se utilizan una serie de medidas para poder presentar las propiedades de fuentes de luz o su rendimiento luminoso de modo cuantitativo.

Lo fundamental para una iluminación es en primer lugar la cantidad de luz que en una determinada situación puede estar disponible para una determinada tarea visual. Se necesita luz para la percepción visual es un hecho que se sobreentiende. Hasta hace casi cien años el hombre dependía de las cantidades de luz que le proporcionaban la siempre cambiante luz diurna o las atenuadas fuentes de luz artificial como candelas o lámparas de aceite. Sólo con el desarrollo de la luz incandescente de gas y la iluminación eléctrica fue posible la producción artificial de las suficientes cantidades de luz y de este modo obtener la posibilidad de orientar activamente las condiciones de iluminación.

A través de esta posibilidad surgía entonces la cuestión de la luz adecuada, de los límites superiores e inferiores de la iluminancia y luminancia para determinadas situaciones. Con especial insistencia se estudiaban las condiciones de luz en el puesto de trabajo, para averiguar las iluminancias, mediante las cuales se obtenía una óptima actuación visual. Se entiende como actuación visual la capacidad de percibir e identificar objetos y detalles pequeños o tareas visuales con un escaso contraste hacia el entorno.

El fundamento del alumbrado público es permitir a los usuarios de vialidades, tanto a peatones como a conductores, desplazarse con la mayor seguridad y confort posibles durante la noche.

Un alumbrado satisfactorio debe ser continuo y uniforme para que el conductor tenga la facilidad de distinguir con certeza y con todo detalle, el camino que tiene frente a él y sus alrededores aún sin el uso de los faros del automóvil, teniendo el tiempo necesario para efectuar las maniobras necesarias para la prevención de cualquier situación que le ponga en peligro a sí mismo o a otros conductores, y también para la apreciación de todas y cada una de las señales de tránsito, además de dotarle de confort visual mientras conduce.

Los peatones podrán distinguir también las marcas para el cruce de calles, vehículos y obstáculos.

Para llevar a cabo este tipo de alumbrado, deben ser tomados en cuenta diversos factores, además de considerar los aspectos económico y estético de la vía iluminada, estudiando los costos de instalación y mantenimiento.

En esta tesis se agruparon los conceptos luminotécnicos, que hacen posible el análisis de la iluminación como la conocemos hoy en día. Se estudiaron los conceptos desde un análisis cuantitativo; el cual se realiza desde un método matemático específico, este busca hacer cuantificables los fenómenos lumínicos. Y el análisis cualitativo; donde existen fenómenos que no logran ser cuantificables, sin embargo, en este tipo de análisis se les proporciona una escala estandarizada que busca unificar la percepción de la calidad de luz.

Se abordan los conceptos de iluminación vial que hacen posible el análisis de la misma, un análisis integral de la vialidad desde los niveles de iluminación hasta los tipos de vialidades, recubrimientos, clima y de más, se abordan los requerimientos en alumbrado vial vigentes en México por la secretaria competente en vialidades.

Se analiza la iluminación con tecnología led de vialidades. La calidad seguridad y eficiencia en el alumbrado vial; La tecnología LED puede ser una buena alternativa a los sistemas actuales de iluminación vial, si cumplen con los criterios sobre calidad, eficiencia y seguridad. Proporcionan una visión general de los criterios esenciales y explican aspectos específicos de la tecnología LED. Componentes y diseño de iluminación LED de vialidades; Los componentes del sistema de alumbrado vial se pueden dividir en tres amplias categorías: Sistemas ópticos que incluyen luminarias (incluidos reflectores, refractores y lentes), lámparas o fuentes de luz y el equipo de control, Sistemas de soporte compuestos por postes y sus cimientos, Sistemas eléctricos que incluyen instalaciones de suministro, control y medición de energía. Adquisición de sistemas de iluminación led para vialidades; criterios de compra de iluminación vial de alta calidad con eficiencia energética.

CAPITULO 1 DEFINICIONES Y CONCEPTOS DE ILUMINACIÓN

1.1 Medidas y unidades

En la luminotecnia se utilizan una serie de medidas para poder presentar las propiedades de fuentes de luz o su rendimiento luminoso de modo cuantitativo.

1.1.1 Flujo luminoso

$$[\phi] = \text{Lumen} (lm)$$

El flujo luminoso describe toda la potencia de luz dada de una fuente luminosa. Fundamentalmente, se podría registrar esta potencia de radiación como energía dada en la unidad watt (W). No obstante, el efecto óptico de una fuente luminosa no se describe acertadamente de este modo, ya que la radiación se registra sin distinción por todo el margen de frecuencias y por ello no se tiene en cuenta la diferente sensibilidad espectral del ojo. Mediante la inclusión de la sensibilidad espectral ocular resulta la medida lumen (lm). Un flujo radiante dado dentro del valor máximo de la sensibilidad espectral ocular (fotópica, 555 nm) de 1 W produce un flujo luminoso de 683 lm. Por el contrario, el mismo flujo radiante en márgenes de frecuencia de menor sensibilidad, produce, unos flujos luminosos correspondientemente más pequeños.

1.1.2 Eficacia luminosa

$$\eta = \frac{\phi}{p}$$

$$[\eta] = \frac{lm}{W}$$

donde: ϕ = Flujo luminoso (lm)

p = potencia eléctrica (W)

η = eficiencia luminosa (lm/W)

La eficacia luminosa describe el grado de acción de un iluminante. Se expresa mediante la relación del flujo luminoso dado en lumen y la potencia empleada en watts. El máximo valor teóricamente alcanzable con total conversión de la energía en luz visible sería 683 lm/W. Las eficacias luminosas reales varían según el medio de luz, pero siempre quedan muy por debajo de este valor ideal.

1.1.3 Cantidad de luz

$$Q = \phi \cdot t$$

$$[Q] = lm \cdot h$$

donde: ϕ = Flujo luminoso(lm)

t = tiempo(h)

Se denomina cantidad de luz el producto de tiempo por flujo luminoso dado; la cantidad de luz registra, por tanto, la energía lumínica dada en un espacio de tiempo. Por regla general, esta cantidad de luz se indica en $klm \cdot h$.

1.1.4 Intensidad luminosa

$$I = \frac{\phi}{\Omega}$$

$$[I] = \frac{lm}{sr}$$

$$\frac{lm}{sr} = \text{Candela (cd)}$$

donde: ϕ = Flujo luminoso(lm)

Ω = Angulo solido(sr)

I = Intensidad luminosa(cd)

Una fuente luminosa puntual e ideal radia su flujo luminoso de manera uniforme en todas las direcciones del espacio, su intensidad luminosa es en todas direcciones la misma. En la práctica, no obstante, siempre se da una distribución espacial irregular del flujo luminoso, que en parte es condicionada por la disposición de los medios de luz y en parte originada por la conducción consciente de la luz. Por lo tanto, es conveniente indicar una medida para la distribución espacial del flujo luminoso, es decir, la intensidad luminosa de la luz.

La candela como unidad de la intensidad luminosa es la única unidad base de la luminotecnica, de la cual se derivan todas las demás medidas luminotécnicas. La candela se definía originalmente por la intensidad luminosa de una vela normalizada, más tarde sirvió como norma el polvo de torio, que con la temperatura solidificaba el platino; desde 1979 se define la candela por una fuente radiante, que radia con una frecuencia de $540 \cdot 10^{12}$ Hz $1/683$ W por estereorradián.

1.1.5 Iluminancia

$$E = \frac{\phi}{s}$$

donde: ϕ = Flujo luminoso que llega a la superficie (lm)

S = superficie o area a iluminar (m^2)

E = Iluminacion en la superficie, lumenes/ m^2 (lux)

La iluminancia es una medida para la densidad del flujo luminoso.

Se ha definido como la relación del flujo luminoso que cae sobre una superficie y el área de la misma. La iluminancia no está sujeta a una superficie real, se puede determinar en cualquier lugar del espacio, y puede derivar de la intensidad luminosa. La iluminancia, además, disminuye con el cuadrado de la distancia desde la fuente de luz (ley fotométrica de distancia)

1.1.6 Exposición luminosa

$$Ep = \frac{I}{s}$$

$$[Ep] = lux$$

donde: I = Intensidad luminosa (cd)

s = area a iluminar (m^2)

Como exposición luminosa se entiende el producto de la iluminancia y la duración de la exposición luminosa con la que se ilumina una superficie. La exposición luminosa juega sobre todo un papel en el cálculo de la carga luminosa sobre objetos expuestos, por ejemplo en museos.

1.1.7 Luminancia

$$L = \frac{I}{s}$$

$$[L] = \frac{cd}{m^2}$$

donde: I = Intensidad luminosa reflejada (cd)

s = superficie o area que refleja (m²)

L = Luminancia o brillo (cd/m²)

Mientras la iluminancia registra la potencia de luz que cae sobre una superficie, la luminancia describe la luz que procede de esta superficie. Esta luz, sin embargo, puede partir por sí misma de esta extensión (por ejemplo, con una luminancia de lámparas y luminarias). Aquí la luminancia se define como la relación de la intensidad luminosa y la superficie proyectada verticalmente a la dirección de irradiación. No obstante, la luz también puede ser reflejada o transmitida por la superficie. Para materiales de reflexión difusa (mates) y para los de transmisión difusa (opaca), se puede calcular la luminancia desde la iluminancia y la reflectancia o transmitancia, respectivamente. Con ello, la luminancia constituye la base de la claridad percibida; la sensación real de claridad, no obstante, aún queda bajo la influencia del estado de adaptación del ojo, de las proporciones de contraste del entorno y del contenido de información de la superficie vista.

1.2 Luz y fuentes de luz

La luz, base de todo lo visible, es para el hombre una aparición natural. Claridad, oscuridad y el espectro de colores visibles nos resultan tan familiares que otra percepción en una zona de frecuencia distinta y con sensaciones cromáticas diferentes nos resulta casi inconcebible. Pero en realidad la luz visible sólo es una pequeña parte del espectro bastante más ancho de las ondas electromagnéticas, que alcanzan desde los rayos cósmicos hasta las ondas radioeléctricas. Que sea precisamente el área desde 380 hasta 780 nm, la «luz visible», la que conforme la base de la visión humana, desde luego no es casualidad. Justo esta área se encuentra relativamente regular como radiación solar a disposición en la Tierra y de este modo puede servir como base fiable de la percepción. Es decir, el ojo humano aprovecha una de las partes disponibles del espectro de las ondas electromagnéticas para informarse sobre su entorno. Percibe la cantidad y la distribución de la luz, que es irradiada o reflejada por cuerpos, para informarse sobre su existencia o su cualidad, y el color de la luz irradiada para obtener una información adicional sobre estos cuerpos.

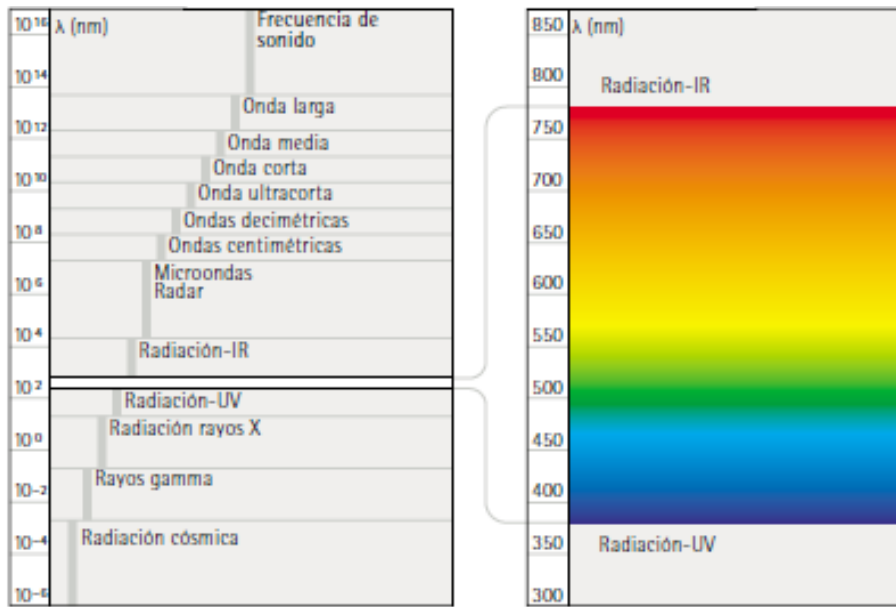


Figura 1. 1 espectro visible (REF1).

El ojo humano se ha adaptado a la única fuente de luz de la que ha dispuesto durante millones de años: el sol. Así, el ojo es lo más sensible en esta área, donde también se encuentra el máximo de la radiación solar, y así también la percepción cromática está sintonizada al espectro continuado de la luz solar. La primera fuente de luz artificial fue la llama luminiscente del fuego, donde partículas incandescentes de carbono producían una luz que, al igual que la solar, dispone de un espectro continuado. Durante mucho tiempo la técnica de la producción de luz se basó en este principio, que, desde luego empezando por la antorcha y las astillas de pino, pasando por la candela y la lámpara de aceite, hasta la luz de gas, tuvo un aprovechamiento cada vez más efectivo. Con la evolución del manguito de incandescencia para el alumbrado de gas en la segunda mitad del siglo XIX se supera el principio de la llama luminiscente; en su lugar se colocaba una materia, mediante cuyo calentamiento se conseguía dar luz. La llama ya sólo servía para producir la temperatura necesaria. Casi simultáneamente surgió una competencia para la iluminación de mechas para gas de alumbrado con el desarrollo de las lámparas eléctricas de arco y de incandescencia, a las cuales se añadirían las de descarga a fines del siglo XIX. En los años treinta del siglo XX ya se había sustituido casi por completo la luz de gas por un surtido de alumbrantes eléctricos, sobre cuyos sistemas de funcionamiento se basan todas las fuentes de luz modernas. Las fuentes de luz eléctricas se pueden subdividir en dos grupos principales que se distinguen por diferentes procedimientos para convertir la energía eléctrica en luz. Un primer grupo lo constituyen los radiadores térmicos, que abarcan lámparas incandescentes y halógenas-incandescentes. El segundo grupo lo constituyen las lámparas de descarga y abarca un amplio espectro de fuentes luminosas, por ejemplo, todas las formas de lámparas fluorescentes, lámparas de descarga de vapor de mercurio o vapor de sodio, así como lámparas de halógenos metálicos

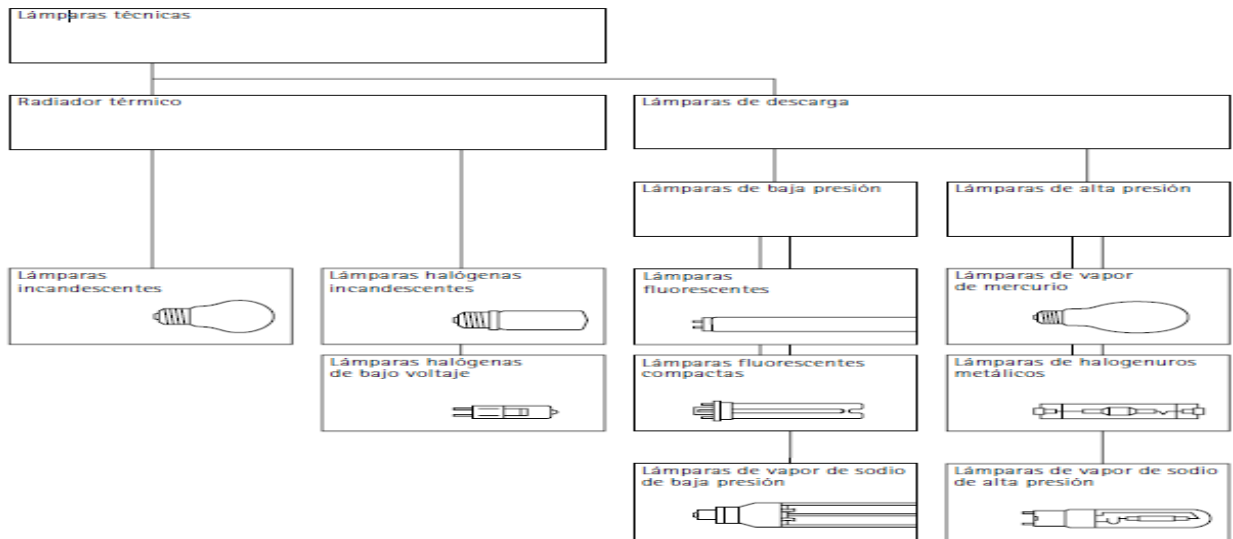


Figura 1. 2 tipos de lámparas (Fuente Manual - Cómo planificar con luz).

1.3 Luz: Propiedades y características

Si hasta el momento se trataban por separado los temas de percepción visual y producción de luz, ahora se describirá el área en que la luz y la percepción se encuentran: el campo de las propiedades y características de la luz. Se demostrará de qué modo determinadas calidades de luz pueden crear según los casos condiciones de percepción diferentes y de esta manera guiar e influir en la percepción visual del hombre. Por ello, la iluminancia juega un papel tan importante como la distribución y la orientación de la luz, la limitación de efectos deslumbrantes o la calidad de color de una iluminación. Para el área de los puestos de trabajo existe una normativa muy amplia, que define las condiciones de iluminación mediante las cuales se pueden percibir determinadas tareas visuales óptimamente y que además evitan la fatiga. No obstante, estas normas se refieren tan sólo a la optimización de las condiciones laborales, de modo que se deben seguir desarrollando conceptos más amplios para las consideraciones de exigencias arquitectónicas y psicológicas de un entorno visual.

1.3.1 Cantidad de luz

Lo fundamental para una iluminación es en primer lugar la cantidad de luz que en una determinada situación puede estar disponible para una determinada tarea visual. Que se necesita luz para la percepción visual es un hecho que se sobreentiende. Hasta hace casi cien años el hombre dependía de las cantidades de luz que le proporcionaban la siempre cambiante luz diurna o las atenuadas fuentes de luz artificial como velas o lámparas de aceite. Sólo con el desarrollo de la luz incandescente de gas y la iluminación eléctrica fue posible la

producción artificial de las suficientes cantidades de luz y de este modo obtener la posibilidad de orientar activamente las condiciones de iluminación.

A través de esta posibilidad surgía entonces la cuestión de la luz adecuada, de los límites superiores e inferiores de la iluminancia y luminancia para determinadas situaciones. Con especial insistencia se estudiaban las condiciones de luz en el puesto de trabajo, para averiguar las iluminancias, mediante las cuales se obtenía una óptima actuación visual. Se entiende como actuación visual la capacidad de percibir e identificar objetos y detalles pequeños o tareas visuales con un escaso contraste hacia el entorno.

Evidentemente, la actuación visual aumenta considerablemente con el aumento de la iluminancia. No obstante, por encima de los 1000 lux ya sólo aumenta muy despacio, para finalmente con iluminancias muy altas volver a bajar debido a la aparición de deslumbramientos. En tareas visuales fáciles se consigue una suficiente actuación visual con iluminancias bajas, mientras que la más complicadas requieren iluminancias altas. Así, 20 lux representan un límite inferior, en el que, por ejemplo, aún es posible distinguir la fisonomía de personas. Para trabajos sencillos se necesitan por lo menos 200 lux, mientras que las tareas visuales complicadas requieren hasta 2000 lux y casos especiales como la iluminación para cirugía incluso 10000 lux. La iluminancia subjetiva más usual en los puestos de trabajo se encuentra entre 1000 y 2000 lux.

Los valores de orientación para iluminancias, como sobre todo se encuentran en la norma DIN 5035, 2a parte, se mueven en los valores de 20 a 2000 lux dentro del marco antes representado. Las iluminancias recomendadas en cada caso resultan sobre todo de lo importante que es la tarea visual y su contraste hacia el entorno más inmediato, por lo que las tareas visuales poco importantes y con poco contraste exigen la máxima iluminancia.

La información de iluminancias globales, como marca toda la práctica de la planificación de iluminación a través de la normativa de la iluminación de los puestos de trabajo, dice, en cambio, poco sobre la percepción real. En el ojo no se retrata el flujo luminoso que cae sobre una superficie la iluminancia, sino la luz emitida, transmitida o reflejada de las superficies. La imagen sobre la retina, por tanto, se basa en el modelo de luminancia de los objetos percibidos, en la acción combinada de luz y objeto.

También en el campo de la luminancia existen recomendaciones, como para los contrastes máximos de luminancias entre tarea visual y el entorno o para luminancias absolutas, que por ejemplo no deben ser sobrepasadas por techos luminosos o luminarias para los puestos de trabajo situados ante una pantalla de ordenador. El objetivo, no obstante, es la optimización de la actuación visual en el puesto de trabajo. Pero por encima de este valor tipo existen también recomendaciones generales para la distribución de la luminancia en todo el espacio. Además, se supone que un espacio que difiere de esta normativa con bajos contrastes de luminancias tiene un efecto monótono y poco interesante; en cambio, con altos contrastes de luminancias el efecto es inquieto y desconcertante.

No obstante, desde hace algún tiempo se han desarrollado, a base de la distribución de luminancias, unos principios más sistemáticos para una extensa planificación de iluminación. Sobre todo en el concepto de Waldram designed appearance o la «percepción estable» de Bartenbach se encuentran ensayos para controlar el efecto visual de un entorno completo (mood, milieu) mediante la distribución consecuyente de luminancias. Cada intento de proyectar instalaciones de iluminación a base de informaciones cuantitativas plantea problemas fundamentales, tanto para la información global de iluminancias o canales de luminancias, como para la información de gamas de luminancias diferenciadas. La percepción visual es un proceso en el que el hombre se informa a través del medio luz sobre los objetos de su entorno, por tanto es influenciado fundamentalmente por los tres factores: luz, objeto y sujeto percibido. Al elaborar un proyecto que se limita a la información de las iluminancias se contempla exclusivamente el aspecto de la luz. La iluminancia, por tanto, es una base insuficiente para el pronóstico de efectos visuales, sobre todo, como ya se ha descrito, no es posible percibirla directamente.

Al proyectar distribuciones de luminancias se tiene en cuenta, además de la luz, la interacción de ésta con los objetos. La luminancia forma la base de la luminosidad realmente percibida, de modo que el proceso de percepción por lo menos es tenido en cuenta hasta la reproducción sobre la retina. Sin embargo, incluso la luminancia y su distribución no representan la base suficiente para la planificación de impresiones visuales: aquí el perjudicado es el hombre perceptor. La gama de luminancias proyectada sobre la retina no es el producto final, sino sólo la base de un complejo proceso de elaboración, a cuyo final se encuentra la imagen percibida o realmente vista. Aquí juegan un papel las leyes de configuración, fenómenos de constancia, actitudes expectativas y el contenido informativo de lo percibido.

El objetivo de la percepción no es el registro de fenómenos luminosos, sino la información sobre el entorno. No son interesantes las luminancias que irradian una colección de objetos, sino mucho más la información sobre la condición de estos objetos y la situación de iluminación bajo la cual se percibe esta condición. Así se explica que la imagen realmente percibida, vista, no es idéntica con la gama de luminancias sobre la retina, aunque se basa en esta gama de luminancias. Un cuerpo blanco tiene diferentes luminancias en función de las diferentes situaciones de iluminación. No obstante, este cuerpo siempre se percibirá uniformemente blanco, porque la situación de iluminación es tomada en cuenta y averiguada en la transformación de la imagen. Asimismo, la formación de sombras sobre un cuerpo del espacio —su gama de luminancias— no se interpreta como la iluminación irregular de una superficie, sino como característica de una forma del espacio. En ambos casos, por tanto, se desarrollan de la gama de luminancias percibida al mismo tiempo la calidad del objeto y el tipo de la iluminación. Con estos ejemplos fáciles se muestra ya el valor aritmético de la transformación psicológica para la imagen percibida en último lugar.

Si la planificación de iluminación se esfuerza conscientemente por conseguir determinados efectos visuales, debe incluir en ella todos los factores que intervienen en el proceso de percepción. La planificación de iluminación, por tanto, no se limita a la observación de iluminancias o luminancias, de luz y objetos, incluso si esto por ejemplo guarda relación con la creación de óptimas condiciones de percepción en el puesto de trabajo. Ésta debe como

configuración del entorno del ser humano y junto a las propiedades de la luz aplicada, también tener en cuenta el juego cambiante de la perceptividad psicológica entre fuente de luz, objeto y sujeto perceptivo en cada situación.

1.3.2 Luz difusa y dirigida

Si abandonamos el área de la cantidad y nos dirigimos hacia las cualidades de la luz, la diferenciación entre la luz difusa y dirigida resulta ser uno de los aspectos más importantes. Ya por la experiencia cotidiana estamos familiarizados con las correspondientes situaciones de iluminación: la luz dirigida del sol con un cielo despejado (cambio dramático de luz y sombras) y la luz difusa con un cielo cubierto (iluminación uniforme, casi sin sombras).

La luz difusa emana de grandes superficies luminosas. Éstas pueden ser amplias fuentes de luz como el firmamento con luz diurna o techos luminosos en el área de la luz artificial. No obstante, la luz difusa también se refleja, y esto es más frecuente en espacios interiores, en techos y paredes iluminados. De este modo se crea una iluminación uniforme y suave, que da luminosidad y claridad a todo el espacio, pero prácticamente no origina sombras o reflejos. La luz dirigida emana de fuentes de luz puntuales: el sol en el caso de la luz diurna, lámparas de construcción compacta en el área de la luz artificial. La propiedad más importante de la luz dirigida es la creación de sombras sobre cuerpos y superficies estructuradas, así como de reflejos sobre objetos brillantes. Estos efectos aparecen con una baja parte de luz difusa en toda la iluminación con especial claridad. En el área de la luz diurna se encuentra la parte de luz dirigida y difusa en un cielo despejado mediante la proporción de luz solar y celeste (5:1 hasta 10:1) prácticamente fijada.

En cambio, en el interior se puede elegir libremente la relación de luz dirigida y difusa. Si techo y paredes reciben poca luz o luz incidente la parte de luz difusa es absorbida considerablemente por bajas reflectancias del entorno. Sombras y reflejos se pueden destacar hasta obtener efectos teatrales. Esto se aprovecha de modo dirigido en presentaciones de objetos, pero en la iluminación arquitectónica sólo desempeña un papel si se pretende resaltar un efecto dramático del espacio. La luz dirigida no sólo proporciona sombras y reflejos, sino que ofrece nuevas posibilidades a la planificación de iluminación mediante la elección de ángulo y dirección de irradiación. Mientras que la luz de fuentes de luz difusas o de radiación libre partiendo desde el lugar de la fuente de luz siempre tiene influencia sobre todo el espacio, en el caso de la luz enfocada se separa el efecto luminoso del lugar de la luminaria.

Éste es uno de los mayores avances en luminotecnia. Si en la era de las candelas y lámparas de petróleo la luz estaba ligada al inmediato entorno de la luminaria, ahora existe la posibilidad de aplicar una luz efectiva lejos de la fuente de luz, de producir desde casi cualquier lugar efectos luminosos de iluminancias definidas en áreas definidas con exactitud. Así, se puede iluminar un espacio diferenciadamente y de manera consciente, la iluminancia local correspondiente se puede adaptar al significado y contenido informativo del área iluminada.

1.3.2.1 Modelación

Una propiedad tanto natural como fundamental de nuestro entorno es su tridimensionalidad. Informarnos sobre este aspecto por tanto debe ser un objetivo esencial de la percepción visual.

La tridimensionalidad abarca diferentes áreas individuales, desde la extensión del espacio a nuestro alrededor, por la situación y orientación de los objetos en el espacio, hasta su forma espacial y estructura de la superficie.

En la percepción de estos aspectos del espacio intervienen numerosos procesos fisiológicos y de percepción psicológica. Para la percepción de formas cúbicas y estructuras de la superficie, en cambio, es de primordial importancia la modelación a través de luz y sombras, una propiedad de la luz dirigida que hasta ahora sólo se ha mencionado, pero que no ha sido analizada en cuanto a su valor aritmético para la percepción. Si, por ejemplo, observamos una esfera con la iluminación totalmente difusa, no se percibe su forma espacial, sólo aparece como una superficie circular. Únicamente cuando la luz dirigida cae sobre la esfera —es decir, sólo cuando se forman sombras— se puede reconocer su volumen. Del mismo modo sucede en la percepción de estructuras de la superficie, que prácticamente no se distinguen con una luz difusa o de incidencia vertical y sólo se perfilan con la luz dirigida en ángulo a través de su efecto de sombras.

Es decir, sólo mediante la luz dirigida se posibilita la información sobre la disposición espacial de objetos. Del mismo modo que la ausencia total de luz dirigida imposibilita esta información, también un exceso de modelación puede ocultar informaciones. Esto es precisamente lo que ocurre cuando mediante una luz de orientación extrema partes de los objetos desaparecen en las sombras sobrepuestas.

1.3.2.2 Brillo

Igual que la modelación, el brillo también es un efecto de la luz dirigida, sale de las fuentes de luz compactas, casi puntuales, y destaca con especial claridad con una baja parte de iluminación difusa. La fuente de luz en sí ya se percibe como algo brillante. Un ejemplo es el efecto de las llamas de una vela en un entorno de noche. También tienen un efecto brillante aquellos objetos que reciben una refracción por esta luz, como por ejemplo el cristal/vidrio iluminado, los brillantes tallados o las arañas de luz. No obstante, también se produce brillo por la reflexión de superficies brillantes como porcelana, vidrio, lacados, metales pulidos o materiales húmedos.

Como los efectos de brillo se producen por la reflexión o la refracción, no dependen de la cantidad de luz aplicada, sino de la luminancia de cada fuente de luz en cuestión. Una fuente de luz muy compacta, por ejemplo una lámpara halógena de bajo voltaje, puede por tanto

producir reflejos de mayor brillantez a pesar de una menor carga luminosa, en contra de lo que sucede con una lámpara con más intensidad de luz pero menos compacta.

El brillo puede tener sobre todo un efecto propio con las fuentes de luz, atrayendo la atención sobre sí y proporcionando de este modo una nota viva e interesante a un espacio. Cuando se iluminan objetos el brillo destaca la característica de las superficies, sobre todo debido a que los efectos de brillo se producen en los cantos y arcos de objetos brillantes.

Por hacer resaltar más la forma y la estructura de superficies, el brillo produce una valoración psicológica del objeto iluminado y de su entorno. Esta posibilidad de poder proporcionar a los objetos y espacios un aspecto interesante y valioso determina la aplicación de los efectos de brillo en la práctica de la iluminación.

Si a un entorno se le pretende dar un aspecto especialmente festivo —una sala de fiestas, iglesia o foyer—, esto puede lograrse mediante la aplicación de una fuente de luz brillante, sean las llamas de una vela, sean lámparas halógenas de bajo voltaje o lámparas de descarga de alta presión.

Del mismo modo se puede producir brillo —y con ello un carácter valioso— mediante la aplicación de luz dirigida en la presentación de objetos adecuados. Esto es sobre todo válido para la presentación de materiales brillantes o refractantes, de cristal, cerámico, lacados o metales. El brillo obtiene su efectividad psicológica —el llamar la atención— de su contenido informativo. La información transmitida puede ser la pura existencia de una fuente de luz brillante, pero también se puede tratar de la información sobre el tipo y la calidad de una superficie, la geometría y la simetría de los reflejos. No obstante, surge la cuestión de si la información sobre la cual llaman nuestra atención es realmente de interés en la correspondiente situación. Si éste es el caso se percibe el brillo como algo agradable e interesante, se produce la revalorización antes descrita del objeto o de su entorno. Pero si el brillo no dispone de un valor informativo, puede percibirse como deslumbramiento. Éste es el caso del deslumbramiento por reflexión: no se entienden los reflejos sobre folios transparentes, pantallas o papeles brillantes como información (brillo), sino como deslumbramiento molesto, que oculta la verdadera información debajo de los reflejos.

1.3.3 Deslumbramiento

Un signo esencial para la calidad de una iluminación es la limitación del deslumbramiento que se produce. Se denomina deslumbramiento tanto la disminución objetiva de la actuación visual como la alteración subjetiva de la visión debido a la aparición de altas luminancias o altos contrastes de luminancias en el campo visual.

En una disminución objetiva de la actuación visual se habla de un deslumbramiento fisiológico. Esto significa que en el ojo la luz de una fuente de luz recubre la gama de luminancias de la verdadera tarea visual y empeora así su perceptibilidad. Razón de la superposición de las luminancias de tarea visual y fuente de luz deslumbrante puede ser la

superposición de ambas imágenes sobre la retina; para la disminución de la actuación visual es suficiente la superposición de la luz de dispersión, que se produce por la dispersión de la luz deslumbrante en el ojo. El grado de la dispersión de luz depende sobre todo de la opacidad en el interior del ojo; esta opacidad, que aumenta con la edad, es responsable de la mayor sensibilidad ante deslumbramientos de las personas mayores.

El caso extremo de deslumbramiento fisiológico es el deslumbramiento perturbador. Se produce cuando existen luminancias superiores a 104 cd/m² en el campo visual, como por ejemplo por mirar al sol o directamente a fuentes de luz artificiales. El deslumbramiento perturbador es independiente del contraste de luminancia hacia el entorno, no se puede eliminar mediante el aumento del nivel de luminancia.

El deslumbramiento perturbador, no obstante, raras veces resulta ser un problema en la iluminación arquitectónica. Mucho más frecuente es en este caso el deslumbramiento relativo, en el que la disminución de la actuación visual no se origina por luminancias extremas, sino por contrastes de luminancias demasiado altas en el campo visual. Si a través de la fuente de luz deslumbrante no se produce ninguna disminución objetiva de la actuación visual, sino únicamente una sensación de perturbación subjetiva, entonces podemos hablar de un deslumbramiento psicológico.

Origen del deslumbramiento psicológico es la distracción involuntaria, que emana de altas luminancias en el campo visual. La mirada siempre se dirige de la tarea visual a la fuente de luz deslumbrante, sin que este campo de una elevada luminosidad en cambio pueda ofrecer la información esperada; la fuente de luz deslumbrante produce el ruido óptico —parecido a un ruido molesto—, que atrae la atención sobre sí y perturba la percepción.

Debido a la repetida adaptación a distintos niveles de luminosidad y diferente distancia de tarea visual y fuente de luz deslumbrante, se produce una carga en el ojo que se percibe como desagradable o incluso dolorosa. A pesar de una actuación visual objetivamente uniforme, se produce así en el deslumbramiento psicológico una enorme incomodidad; el rendimiento en el puesto de trabajo se reduce.

A diferencia del deslumbramiento fisiológico, que se puede explicar independientemente de cada situación al traspasar los valores límite dados fisiológicamente para luminancia o contrastes de luminancia, en el deslumbramiento psicológico se trata de un problema del procesamiento informativo que desligado del contexto del contenido informativo del entorno visual y de la necesidad informativa de cada situación no se puede describir. De este modo el deslumbramiento psicológico puede no tener lugar aunque existan considerables contrastes de luminancia, contrastes de los que se esperan y transmiten informaciones interesantes, por ejemplo en caso del brillo sobre arañas de cristal o al echar una mirada por la ventana hacia un panorama interesante. Por otro lado, contrastes de luminancia más bajos ya pueden provocar el deslumbramiento psicológico, si estos contrastes recubren informaciones más importantes y no disponen de informaciones propias; así por ejemplo en reflejos sobre papel cuché brillante, observando el cielo uniformemente cubierto o un techo luminoso.

Tanto el deslumbramiento fisiológico como el psicológico aparece en dos formas. En primer lugar se debe nombrar el deslumbramiento directo, en el que la propia fuente de luz deslumbrante está presente en el entorno de la tarea visual. El ángulo del deslumbramiento depende sobre todo de la luminancia de la fuente de luz deslumbrante, de su contraste de luminancia a la tarea visual, su tamaño y su proximidad a la tarea visual.

La segunda forma de deslumbramiento es el deslumbramiento por reflexión. En este caso la fuente de luz deslumbrante es reflejada por la tarea visual o su entorno. Esta forma de deslumbramiento depende de los factores antes mencionados además del grado de brillo y la situación de la superficie reflectante. Sobre todo el deslumbramiento psicológico debido a la luz reflectante representa un problema considerable en la lectura de textos escritos sobre papel cuché y los trabajos en pantalla, porque la competencia entre la tarea visual poco alejada y la imagen de la fuente de luz claramente más alejada lleva a un rápido cansancio de los ojos debido al continuo cambio de convergencia y acomodación. La valoración de luminancias y contrastes de luminancias, que posiblemente pueden producir efectos deslumbrantes, depende esencialmente de cada entorno y de los objetivos de la iluminación.

La zona del techo delante del observador puede originar el deslumbramiento directo, que en ángulo se ve más plano que 45° . El deslumbramiento por reflexión, en cambio, se produce sobre todo debido a las luminarias en la zona del techo inmediatamente delante del observador.

Un caso especial produce el deslumbramiento por reflexión sobre pantallas, es decir, sobre superficies dispuestas prácticamente en vertical. El deslumbramiento se produce en este caso sobre todo por fuentes de luz deslumbrantes en la zona del techo detrás del observador. Una disminución de los efectos deslumbrantes se consigue de pronto mediante la reducción del contraste de luminancias, sea mediante el aumento de la luminancia del entorno, sea mediante la reducción de la luminancia de la fuente de luz deslumbrante.

En función de la luminancia nominal, el tipo de luminaria y la característica de calidad de la iluminación pretendida se pueden encontrar curvas de limitación en el diagrama, que no deben ser sobrepasadas por la curva de luminancia de la luminaria utilizada.

Para el deslumbramiento directo existe un método de valoración cuantitativo mediante el procedimiento de las curvas de limitación. Para la valoración del deslumbramiento por reflexión, en cambio, sólo se dispone de criterios cualitativos. Para el área de deslumbramiento por reflexión en tareas de lectura, escritura y dibujo en posición horizontal, no obstante, existe un procedimiento que describe el grado cuantitativo del deslumbramiento por reflexión mediante el factor de reproducción de contraste (CRF). El factor de reproducción de contraste se define aquí como la relación entre el contraste de luminancia de una tarea visual y el de una iluminación de referencia, frente al contraste de luminancia de esta tarea visual con una iluminación dada.

El factor de reproducción de contraste se determina mediante un patrón de reflexión de referencia, que se compone de un disco de cerámica claro y otro oscuro de cualidades de reflexión estandarizados; los factores de luminancia de ambos discos constan bajo diferentes direcciones y ángulos visuales. Para una iluminación completamente difusa resulta aquí el valor de referencia de la reproducción de contraste. La reproducción de contraste con una iluminación indicada ya se puede calcular teniendo una instalación luminosa terminada en el patrón de referencia o mediante los datos de las luminarias por los factores de luminancia del patrón de referencia conocido. Por el valor de referencia y el valor real resulta el correspondiente factor de reproducción de contraste, así como la clasificación de la reproducción de contraste en una de las tres categorías que tiene.

1.4 Color de luz y reproducción cromática

Junto a la luminancia percibida como luminosidad, el ojo registra además un efecto cromático, que se basa en la composición espectral de la luz percibida. Como cromático ya se puede experimentar la propia luz (color de luz). Pero el color también se produce mediante la cualidad de numerosas sustancias que absorben determinadas zonas espectrales y de este modo modifican la composición espectral de la luz reflejada por ellas (color no autoluminoso).

Para la descripción unívoca de colores existen diferentes sistemas. En el sistema Munsell o la tabla de colores DIN se disponen colores no autoluminosos según los criterios luminosidad, tono de color y saturación, de modo que se obtiene un atlas de color completo en forma de una matriz tridimensional. Como luminosidad se designa aquí la reflectancia de un color no autoluminoso; el tono de color indica el propio color, mientras que el concepto de la saturación abarca el grado de policromía (variedad de colores) desde el color puro hasta la acromática escala de grises.

En el sistema colorimétrico patrón de CIE, en cambio, no se clasifican los colores no autoluminosos y colores de luz en el cuadro de un catálogo tridimensional, sino que se calculan o miden por la composición espectral del tipo de luz en colores de luz y tipo de luz, reflectancia o transmitancia espectral, respectivamente, representándolos en un diagrama continuado, bidimensional. A lo que no se presta atención en este caso es a la dimensión de la luminosidad, de modo que en el diagrama sólo se pueden determinar el tono de color y saturación de todos los colores.

Mediante una adecuada disposición del diagrama resulta una superficie de color que abarca todos los colores reales y que es suficiente para una serie de otras condiciones. La superficie de color es envuelta por una curva de estímulos, sobre la cual se encuentran los lugares de color de los colores espectrales totalmente saturados.

En el interior de la superficie se encuentra el punto de saturación más bajo, que se denomina punto blanco o acromático. Todas las categorías de saturación de un color se pueden

encontrar en la recta entre el punto blanco y el correspondiente lugar de color; todas las mezclas de dos colores se encuentran asimismo en la recta entre los correspondientes lugares de color.

En el interior de la superficie de color se puede dibujar una curva, que representa el color de luz de un proyector Planckiano con diferentes temperaturas; esta curva se puede utilizar para la descripción del color de luz de lámparas incandescentes.

Para describir el color de luz de lámparas de descarga y partiendo de la curva del proyector Planckiano, se incorporan las líneas de temperatura de color correlacionada, con cuya ayuda también se pueden añadir colores de luz a la temperatura de color de un radiador térmico, que no se encuentran en esta curva. Se pueden distinguir tres grupos principales; el área blanco cálido con temperaturas de color correlacionadas debajo de 3000 K, el área blanco neutral entre 3300 y 5000 K y el área de blanco luz diurno con las temperaturas de color correlacionado por encima de 5000 K.

El color de los objetos iluminados resulta de la coincidencia de luz y cuerpo, es decir, de la composición de la luz que incide sobre un cuerpo y la propiedad del mismo de absorber determinadas partes de esta luz y sólo reflejar las restantes áreas de frecuencia.

Adicionalmente a la equivalencia cromática así producida, objetivamente calculable y medible, para la percepción real también desempeña un papel la adaptación cromática del ojo. En este caso se produce a semejanza de lo que ocurre con la adaptación a un nivel de luminancia un ajuste paulatino al color de luz predominante, de modo que también en una iluminación con diferentes colores de luz se puede garantizar una percepción casi constante de la escala de colores no autoluminosos.

Iguals colores de luz pueden llevar a diferentes colores no autoluminosos, debido a la variada composición espectral.

El grado de esta desviación es descrita por la reproducción cromática. La reproducción cromática se define, además, como grado de alteración, que se produce en el efecto cromático de objetos por la iluminación de una determinada fuente de luz frente a la iluminación con una fuente de luz de referencia; lo que se aprecia, por tanto, es la uniformidad de efectos cromáticos bajo dos tipos de iluminación.

Como el ojo tiene la capacidad de adaptarse a la luz de las más variadas temperaturas de color, hay que determinar la reproducción cromática en función del color de luz. Como fuente de referencia por tanto no puede servir una sola fuente de luz; la escala comparativa es más bien una fuente de luz comparable con un espectro continuado, tanto si es un radiador térmico de temperatura de color comparable como si es la luz diurna.

Para determinar la reproducción cromática de una fuente de luz, se calculan y relacionan entre sí los efectos cromáticos de una escala de ocho colores no autoluminosos del tipo de iluminación a examinar, así como bajo la iluminación de referencia. La calidad de la reproducción cromática así averiguada se expresa en un índice que puede referirse tanto a la reproducción cromática general (Ra) como a la reproducción de colores individuales.

El índice máximo de 100 significa en este caso una reproducción cromática ideal, en tanto que valores menores caracterizan una reproducción cromática correspondientemente peor. La calidad de la reproducción cromática se clasifica en cuatro categorías según DIN, por las cuales se orientan las exigencias mínimas para la reproducción cromática de la iluminación de puestos de trabajo. Las categorías de reproducción cromática 1 y 2 están adicionalmente divididas en dos subcategorías —A y B— para posibilitar un juicio diferenciado de fuentes de luz.

La categoría de reproducción cromática 1 se exige para tareas que implican un juicio sobre colores. En la iluminación de espacios interiores, oficinas y puestos de trabajo industriales con elevadas tareas visuales se exige por lo menos la categoría de reproducción cromática 2, mientras que la categoría 3 es suficiente para puestos de trabajo industriales con tareas visuales fáciles. En cambio, la categoría de reproducción cromática 4 sólo es admisible con las mínimas exigencias e iluminancias hasta un máximo de 200 lux.

Para la elección de una fuente de luz en primer lugar desempeña un papel la calidad de su reproducción cromática, es decir, el grado en fidelidad cromática, con el que se reproducen objetos iluminados a partir de una iluminación de referencia.

En algunos casos hay que tener adicionalmente en cuenta el índice para la reproducción de un determinado color, así, por ejemplo, cuando depende del dictamen diferenciado del color de la piel en medicina y cosmética.

Pero por encima de la calidad de reproducción cromática también es de una importancia decisiva la elección del color de luz para el efecto cromático real. De este modo los colores azules y verdes aparecerán comparativamente grises y apagados bajo la luz de las lámparas incandescentes, a pesar de una magnífica reproducción cromática. Pero precisamente estas tonalidades —pese a la peor reproducción cromática— parecen claras y luminosas bajo el color de la luz blanca diurna de las lámparas fluorescentes. En la reproducción de tonalidades amarillas y rojas se invierte este fenómeno de la debilitación e intensificación respectivamente del efecto cromático. Para poder decidir qué iluminantes deben proyectarse, es necesario orientarse según cada situación. Algunos estudios están en favor de la preferencia por un color de luz cálido, sobre todo en iluminancias más bajas y luz dirigida, mientras que los colores de luz fríos se aceptan principalmente en iluminancias altas e iluminación difusa.

En la iluminación representativa se pueden lograr por la aplicación dirigida de colores de luz en caso necesario también de reproducción cromática moderada unos colores más luminosos de los objetos iluminados. Esta forma de dar conscientemente relieve a las cualidades cromáticas también se puede aplicar en la iluminación en áreas de venta. No obstante, en este caso la iluminación bajo la cual un cliente efectúa su elección de mercancías no debería desviarse demasiado de las condiciones de iluminación del propio cliente.

Temperatura de color correlacionada T de típicas fuentes de luz

Fuente de luz	Temperatura (K)
Candela	1900-1950
Lámpara de filamento de carbón	2100
Lámpara incandescente	2700-2900
Lámpara fluorescente	2800-7500
Luz lunar	4100
Luz solar	5000-6000
Luz diurna (sol, cielo, azul)	5800-6500
Cielo cubierto	6400-6900
Cielo despejado, azul	10000-26000

Reproducción cromática	
Categoría	Índice Ra
1 A	$Ra > 90$
1 B	$80 \leq Ra \leq 90$
2 A	$70 \leq Ra < 80$
2 B	$60 \leq Ra < 70$
3	$40 \leq Ra < 60$
4	$20 \leq Ra < 40$

Categoría de representación cromática con las correspondientes áreas del índice de la reproducción cromática

Tabla 1.1 fuentes de luz y reproducción cromática (Fuente Manual - Cómo planificar con luz).

1.5 Principios de la conducción de luz

En la construcción de luminarias se pueden aprovechar diferentes fenómenos ópticos como medio de la conducción de luz:

1.5.1 Reflexión

En este caso se refleja la luz que incide sobre un cuerpo y según la reflectancia de este cuerpo se refleja total o parcialmente. Además de la reflectancia, en la reflexión también desempeña un papel el grado de dispersión de la luz reflejada. En superficies brillantes no se produce ninguna dispersión; en este caso se habla de una reflexión especular. Cuanto mayor es la capacidad de dispersión de la superficie reflectante menor es el reflejo de la parte de la luz dirigida, hasta que con la reflexión difusa uniforme ya sólo se emite luz difusa. La reflexión es de importancia decisiva para la construcción de luminarias; posibilita, a través de adecuados contornos de los reflectores y las superficies, una conducción precisa de la luz, siendo responsable del rendimiento de la luminaria.

1.5.2 Transmisión

En la transmisión se transmite total o parcialmente la luz que incide sobre un cuerpo y según la transmitancia de este cuerpo. Adicionalmente, también desempeña un papel el grado de dispersión de la luz transmitida. En materiales completamente transparentes no se produce ninguna dispersión. Con creciente capacidad de dispersión disminuye cada vez más la parte regular de luz transmitida, hasta que ya sólo en la dispersión completa se entrega luz difusa. Materiales transmisores en luminarias pueden ser transparentes. Esto es válido para sencillos cristales como cierre de la luminaria, así como para filtros, que absorben determinadas zonas espectrales, pero que transmiten las restantes, proporcionando de este modo luz en colores o una disminución de los UV y parte infrarroja, respectivamente. Ocasionalmente también se utilizan materiales dispersores por ejemplo, vidrio o material plástico opalino como cierre de luminaria, para evitar de este modo efectos de deslumbramiento mediante la reducción de luminancia de la lámpara.

1.5.3 Absorción

La luz que incide sobre un cuerpo es absorbida total o parcialmente según la absorbencia de este cuerpo. En la construcción de luminarias se aprovecha sobre todo la absorción para el apantallamiento de fuentes de luz; para lograr confort visual es imprescindible. No obstante, la absorción resulta por principio un efecto no deseado, debido a que no conduce la luz sino que la destruye y de este modo reduce el rendimiento de la luminaria. Típicos elementos de luminarias absorbentes son diafragmas ranurados negros, cilindros, viseras y rejillas de apantallamiento de diferentes formas.

1.5.4 Refracción

Cuando los rayos de luz penetran en un medio transmisor de densidad variable como por ejemplo el aire en un vidrio o el gas en el aire— se produce la refracción, es decir, se modifica su dirección. En el caso de cuerpos con superficies paralelos se da sólo un desplazamiento paralelo de la luz, en el caso de prismas y lentes, en cambio, se producen efectos ópticos, que alcanzan desde la simple variación angular al enfoque y dispersión de luz hasta la imagen óptica. En la construcción de luminarias se utilizan elementos refractores como prismas o lentes, a menudo en combinación con reflectores para una conducción precisa de la luz.

1.5.5 Interferencia

Se denomina interferencia la mutua amplificación o atenuación en la superposición de ondas. Los efectos de interferencia se utilizan luminotécnicamente cuando la luz incide sobre capas muy delgadas, que conducen a que determinadas zonas de frecuencia sean reflejadas, pero otras transmitidas. Mediante una sucesión de capas de solidez y espesor adecuados, se puede producir una capacidad de reflexión selectiva para determinadas zonas de frecuencia, de modo que como en las lámparas de haz frío se refleja luz visible, pero la radiación infrarroja es transmitida. De este modo también se pueden fabricar reflectores y filtros para la creación de luz de colores. Los filtros de interferencia disponen de una transmitancia muy elevada y de una separación especialmente aguda entre las zonas espectrales reflejadas y transmitidas.

CAPÍTULO 2 CONCEPTOS DE ALUMBRADO VIAL

2.1 Objetivo del alumbrado vial

El objetivo fundamental del alumbrado público es permitir a los usuarios de vialidades, tanto a peatones como a conductores, desplazarse con la mayor seguridad y confort posibles durante la noche.

Un alumbrado satisfactorio debe ser continuo y uniforme para que el conductor tenga la facilidad de distinguir con certeza y con todo detalle, el camino que tiene frente a él y sus alrededores aún sin el uso de los faros del automóvil, teniendo el tiempo necesario para efectuar las maniobras necesarias para la prevención de cualquier situación que le ponga en peligro a sí mismo o a otros conductores, y también para la apreciación de todas y cada una de las señales de tránsito, además de dotarle de confort visual mientras conduce.

Los peatones podrán distinguir también las marcas para el cruce de calles, vehículos y obstáculos.

Para llevar a cabo este tipo de alumbrado, deben ser tomados en cuenta diversos factores, además de considerar los aspectos económico y estético de la vía iluminada, estudiando los costos de instalación y mantenimiento



Figura 2.1 alumbrado vial (Fuente Manual de iluminación vial SCyT).

2.2 Factores para el diseño de iluminación

Requerimientos para conductores

En todo momento el camino y sus áreas circunvecinas deben ser claramente visibles en detalle, como son los bordes de los arroyos y banquetas, la entrada de calles laterales y las señales de tránsito, ya sea que se encuentren a los lados o pintadas en el pavimento.

Cualquier objeto que signifique peligro, debe ser visto claramente y a tiempo para efectuar las maniobras necesarias. El tiempo debe ser el suficiente para determinar la distancia, velocidad y dirección del vehículo, la reacción del conductor y el espacio de frenado. Esta percepción, evidentemente debe abarcar todo el campo visual del conductor, es decir, en ambas zonas de la vía y la visión periférica para asegurarse de tener vía libre, y evitarle en esta forma fatiga por tensión.

Hay que considerar que los faros de los vehículos iluminan únicamente un área limitada delante de éstos, mientras que el alumbrado público ilumina la carretera y sus alrededores, abriendo el campo de visión al conductor, aproximándose a las condiciones de la luz diurna, lo cual puede ser importante en determinadas circunstancias del tráfico o del entorno.

Por otra parte, la sensibilidad diferencial al contraste para un mismo conductor es más de tres veces superior en una carretera dotada de alumbrado (2 cd/m^2), que solamente con la iluminación proporcionada por la luz de los faros del vehículo (0.2 a 0.3 cd/m^2).



Figura 2. 2 vista desde el interior de un vehículo (Fuente Manual de iluminación vial SCyT).

La agudeza visual en la conducción nocturna evoluciona de tal forma que un conductor que circula por una carretera provista de alumbrado, es dos veces y media superior a la agudeza visual de dicho conductor cuando circula únicamente con la luz de los faros del vehículo.

En la conducción nocturna con las luces de los faros de un vehículo (0.2-0.3 cd/m²), la eficacia de la visión binocular queda reducida a un tercio (1/3) de la que alcanza durante el día y, en consecuencia, la percepción de las distancias disminuye considerablemente, lo que implica un mayor riesgo de accidentes.

2.2.1 Campo visual del conductor

El campo visual normal del conductor comprende en orden de importancia:

- el carril,
- el acotamiento del camino, incluyendo signos y señales.
- el cielo, incluyendo las luminarias.

Cualquier circunstancia que pueda ocasionar una obstrucción, debe aparecer claramente en el campo visual.

Esta mancha tiene la forma de una letra T, donde el extremo vertical se acorta conforme el pavimento sea más difuso y la distribución de la intensidad luminosa sea cut-off .

La cabeza de la T se ensancha conforme la superficie sea más difusa y según la distribución de la luminaria se amplía a lo ancho de la carretera.

Nota: Las Luminarias cut-off se utilizan en entronques y cruces de carretera.

Luminarias non cut-off, son utilizadas en calles secundarias y de muy baja circulación.

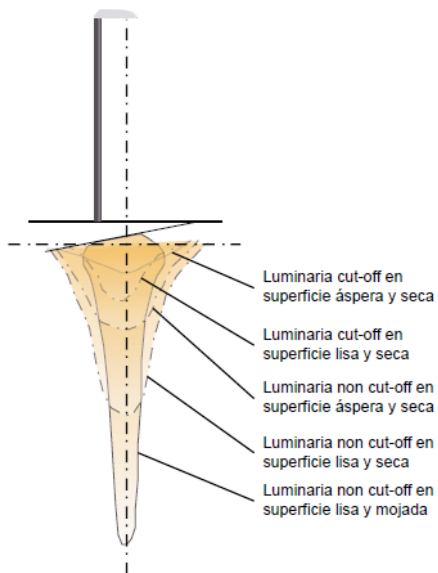


Figura 2. 3 Curvas de luminancia de acuerdo al tipo de luminaria (Fuente: Revista Lumitecnia-1973).

2.2.2 Visibilidad

El fenómeno de la visibilidad está directamente ligado al contraste. Por tanto un buen contraste debe estar siempre producido por:

a) la vialidad y todos los objetos que indican sus límites.

b) cualquier obstáculo que se pueda presentar y el fondo contra el que aparezca.

La visibilidad de un obstáculo situado sobre la calzada, depende de la diferencia de luminancias entre el obstáculo y el fondo, constituido por la vialidad sobre el que destaca.

En el caso de un objeto claro sobre fondo oscuro, su contraste es positivo, en cambio un objeto más oscuro que su fondo se ve en silueta y su contraste es negativo.

La iluminación de vialidades generalmente debe producir contrastes negativos para los objetos u obstáculos oscuros o de bajas reflectancias.



Figura 2.4 Peatón cruzando una avenida (Fuente Manual de iluminación vial SCyT).

1. En la figura 5.4 el conductor no alcanza a ver al peatón que está cruzando la calle debido a que las luminarias de las superficies que forman el fondo deben ser suficientemente altas y uniformes, para que exista el suficiente contraste entre su silueta y la superficie de la avenida. El contraste de un obstáculo depende de su propia luminancia y también de la luminancia de su fondo.

2. Las luminarias ubicadas a la altura del automovilista, no iluminan al peatón y además deslumbran al conductor, impidiendo que éste distinga al peatón.

2.2.3 Deslumbramiento y contaminación visual

En general el deslumbramiento es causado por las luminarias, éste disminuye la capacidad del ojo y por lo tanto la visibilidad de objetos, perjudicando el confort visual que a la larga puede provocar irritabilidad y fatiga.

Sin embargo, no hay que olvidar que existen otros factores que pueden llevar al deslumbramiento, como la presencia indeseable de grandes superficies con un alto factor de reflexión, las superficies brillantes, las vitrinas excesivamente luminosas, anuncios publicitarios o señalizaciones de tránsito.

En el siguiente ejemplo se ve un análisis de una luminaria cut-off en donde el ángulo de abertura de la luminaria no debe de pasar de los 70° respecto a su vertical, de esta manera se evita el deslumbramiento al conductor.

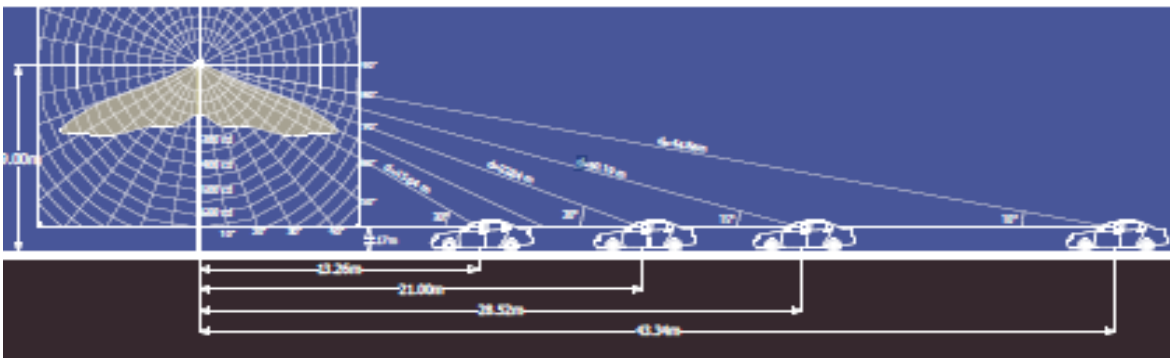


Figura 2.5 Ángulo de deslumbramiento de luminaria cut-off (Fuente: Revist luminarias cut-off Lumitecnia-1973).



Figura 2.6 Boulevard iluminado con luminarias cut-off (Fuente Manual de iluminación vial SCyT).

En el siguiente análisis vemos al mismo boulevard iluminado con luminarias non cut-off, con refractor tipo OV, en donde aparte de contaminar lumínicamente y desperdiciar el flujo luminoso al proyectarlo hacia los lados, deslumbran y no iluminan la calzada, siendo un desperdicio energético y por lo tanto económico.

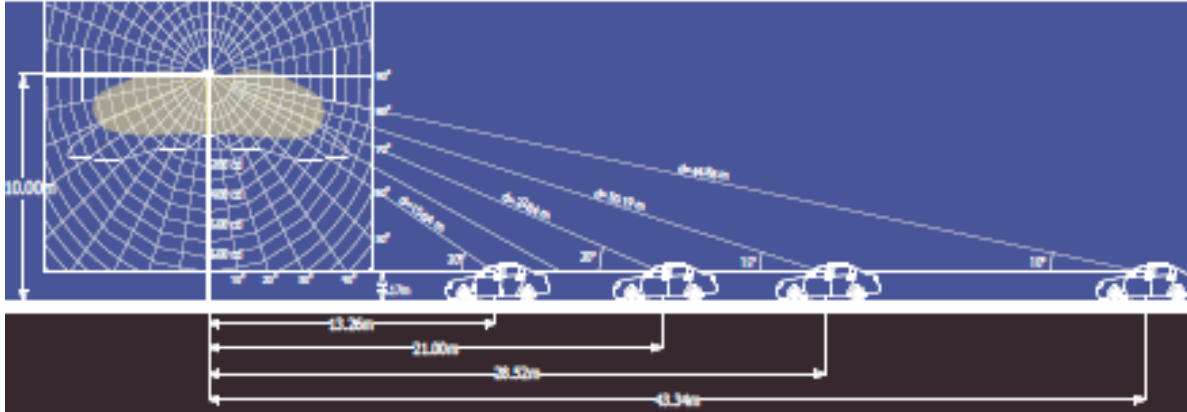


Figura 2.7 Ángulo de deslumbramiento de luminaria non cut-off (Fuente: Revista Lumitecnia-1973).



Figura 2.8 Boulevard iluminado con luminarias OV non cut-off (Fuente Manual de iluminación vial SCyT).

El deslumbramiento reduce la visibilidad, y es causado principalmente por el flujo luminoso emitido por las luminarias a los ojos del observador. Por esta razón, se han puesto límites a la intensidad luminosa generada por luminarias en dirección casi horizontal, que es el caso de las luminarias con refractor y luminaria non cut-off.

Estos factores contribuyen de manera muy importante a lo que llamamos contaminación visual o contaminación lumínica.

2.2.4 Contaminación visual

Contaminación visual: El campo visual del conductor está en la mayor parte lleno de estímulos luminosos que por contraste impiden ver hacia donde debe estar la vista, hacia la carpeta asfáltica y los obstáculos que en ella existan, afectando principalmente al conductor y también al entorno en detrimento de la imagen urbana.



Figura 2.9 Ejemplo de contaminación visual y lumínica (Fuente Manual de iluminación vial SCyT).

La contaminación visual contribuye también a un mayor desperdicio energético al no iluminar lo que se necesita que es la carpeta asfáltica, e igualmente contribuye al deslumbramiento.



Figura 2.10 Ejemplo de contaminación visual (Fuente Manual de iluminación vial SCyT).



Figura 2.11 Ejemplo de avenida iluminada por luminarias equipadas con refractor (Fuente Manual de iluminación vial SCyT).

2.2.4.1 Inconvenientes de los recubrimientos oscuros.

Tal y como se ha mostrado anteriormente, existe un especial interés en que el recubrimiento de las calles no sea en acabado liso sino granulada, ya que contribuye a la seguridad en el manejo en cuanto a la buena adherencia de las llantas de los vehículos en circulación.

El principal inconveniente que presentan los recubrimientos a base de asfalto y grava petrolizada es desde luego su color oscuro, el cual particularmente de noche y con el mal tiempo, hace difícil la percepción de obstáculos fijos o móviles. También existe la dificultad de realizar una buena instalación de alumbrado público que asegure a una regular distancia, una perfecta visibilidad de los obstáculos.

Dependiendo del color del revestimiento de la calle, ya sea oscuro, gris claro o claro, la obtención de una luminancia dada sobre el revestimiento requiere de un cierto nivel de iluminación (lúmenes/m² de carpeta), que puede variar, no solamente de sencillo a doble, sino en muchos casos de sencillo a cuádruple.

En el alumbrado nocturno, los obstáculos fijos o móviles son percibidos generalmente en forma de siluetas oscuras sobre el fondo constituido por la carpeta iluminada, por lo que es evidente la necesidad de proporcionarle a ésta, una luminancia suficiente mediante la instalación de alumbrado público para que ofrezca un buen contraste con los obstáculos que se presenten.

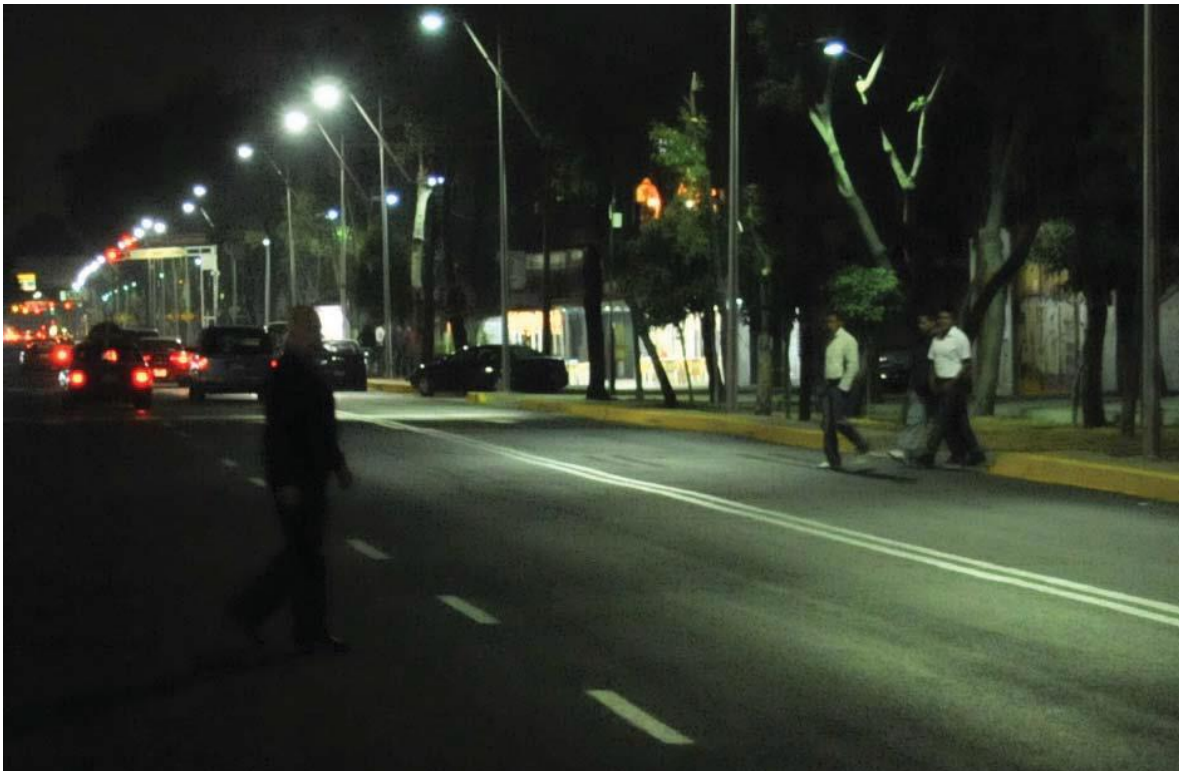


Figura 2.12 Foto de ejemplo (Fuente Manual de iluminación vial SCyT).

2.2.4.2 Ventajas de los recubrimientos claros

El empleo de carpetas o recubrimiento claros, tiene la enorme ventaja de permitir la realización de una instalación de alumbrado público eficaz y confortable, en condiciones particularmente económicas, ya que el flujo luminoso y la potencia eléctrica requerida por m² de calle, es la mitad y en muchos casos menor, de lo que sería necesario para el caso de una calle con recubrimiento oscuro.

Permite, además, una mejor visibilidad de los obstáculos y una apreciable economía tanto en la inversión inicial de la instalación, como para su operación y mantenimiento.

La noción de confort visual es más importante a medida que las densidades de tráfico y las velocidades de circulación aumentan.

Es necesario que los diversos objetos situados en el campo visual del conductor (carpeta iluminada, faros encendidos de los coches circulando en sentido contrario, etc.) no presenten entre ellos grandes diferencias de luminancias o brillantez, que provoquen el fenómeno de deslumbramiento del conductor, mismo que puede alcanzar grados variables y en casos extremos, provocar la ceguera momentánea, lo cual se reduce a un nivel muy bajo con el empleo de recubrimientos cada vez más claros.

Con todo lo antes expuesto, se demuestra la importancia que tiene el tipo de recubrimiento de una calle en la contribución de los resultados de instalación de alumbrado público.

Cabe recalcar que en función del tipo de recubrimiento se adecuan los demás elementos de la instalación, tales como la geometría de ésta y las cualidades fotométricas de las luminarias, ya que entre todos estos elementos existe una gran interrelación que dependiendo del procesamiento de la misma, nos conduce a obtener resultados buenos o mediocres en el terreno práctico.

A continuación se analizarán los demás parámetros de una instalación de alumbrado que contribuyen también a la definición de los demás criterios de calidad de la misma, partiendo ahora de la base de que ya es conocido el tipo de recubrimiento.

2.2.5 Elección correcta de las lámparas

Es importante entender las diferentes características y usos de las lámparas, sus ventajas y desventajas.

Las lámparas de aditivos metálicos con un alto rendimiento de color son buena opción para iluminar sitios en donde hay poco movimiento vehicular, como parques, jardines y estacionamientos,

PERO NO PARA VIALIDADES en donde la percepción del movimiento y el contraste es lo más importante para la seguridad del conductor y del peatón.

Las lámparas de LEDs hasta el día de hoy, aún no alcanzan por mucho los requerimientos en luminancia para vías urbanas y carreteras.

Recordemos que la luminancia y la Iluminancia son diferentes maneras de cuantificar la distribución de la luz en el espacio. La luminancia describe la cantidad de luz que despide o refleja un objeto, mientras que la Iluminancia describe la cantidad de luz que llega a dicho objeto.

La luminancia es lo que más se aproxima a lo que ve el ojo humano, pero la mayoría de los diseños y cálculos de alumbrado se basan en la iluminancia porque en el pasado era la forma más fácil de hacer los cálculos para un proyecto.

Actualmente, con el rápido desarrollo de la tecnología y el precio relativamente barato de los equipos y programas de cómputo especializado, se pueden crear mapas de luminancia. Un mapa de luminancia es la representación detallada de cientos o miles de valores de luminancia en cd/m^2 en un determinado campo visual, este análisis permite estudiar los efectos del deslumbramiento, el confort visual, el nivel de iluminación, la uniformidad de la luminancia, y la contaminación visual, entre otros.

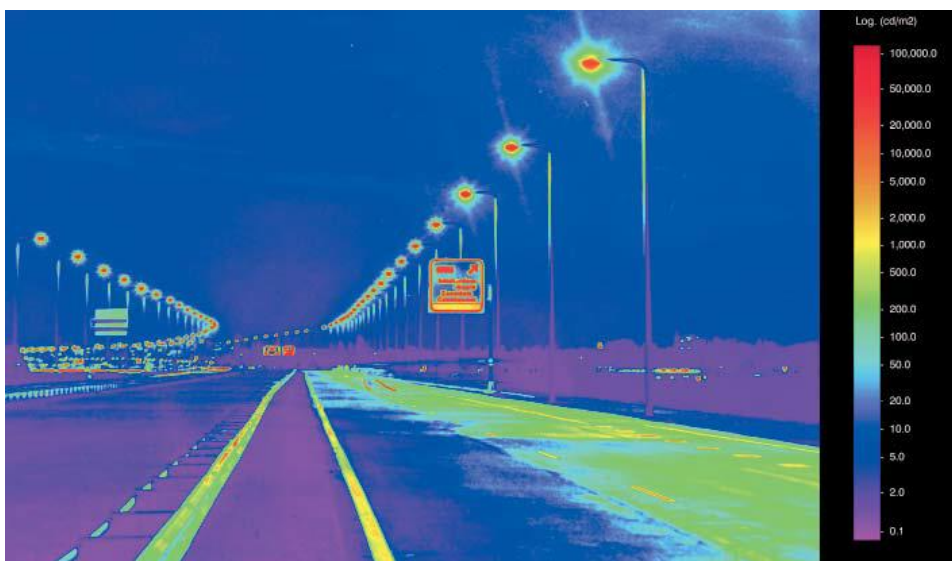


Figura 2.13 Mapa de luminancia (Fuente Manual de iluminación vial SCyT).

Por medio de estos mapas se pueden elaborar fichas técnicas para valorar diferentes tipos de alumbrado y poder compararlos en función de su luminancia.

En la fotografía vemos las diferentes luminancias entre lámparas de aditivos metálicos y lámparas de vapor de sodio alta presión, en donde se comprueba que las lámparas de aditivos metálicos son menos eficientes que las de vapor de sodio alta presión.

En una vialidad en donde lo más importante es la seguridad del conductor y del peatón, es indispensable en primer lugar distinguir las formas por contraste, mucho antes que distinguir los colores exactos de las formas.



Figura 2.14 Avenida con lámparas de vapor de sodio alta presión y lámparas con aditivos metálicos (Fuente Manual de iluminación vial SCyT).



Figura 2.15 Representación de las candelas por m², por medio de un mapa de luminancias (Fuente Manual de iluminación vial SCyT).

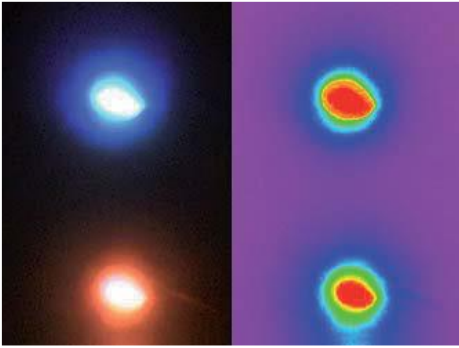


Figura 2.16 Lámpara de aditivos metálicos y lámpara de vapor de sodio de alta presión (Fuente Manual de iluminación vial SCyT).

La luminaria de la parte superior, tiene una lámpara de aditivos metálicos con mayor brillantez, de menor eficiencia.

La luminaria inferior tiene una lámpara de vapor de sodio alta de presión, con menor brillantez y mayor eficiencia.

2.3 Contaminación lumínica

2.3.1 Definición

La contaminación lumínica consiste en la luz que se emite o escapa por encima de la horizontal de las luminarias, en intensidades y rangos espectrales donde ésta no es necesaria.

La energía luminosa es desaprovechada y produce un halo luminoso o resplandor sobre las poblaciones, al iluminar las partículas de polvo o agua que el aire contiene en suspensión, la luz se envía de forma directa hacia el cielo en vez de ser utilizada para iluminar el suelo.

2.3.2 Causas

Esta contaminación lumínica es producida al utilizar farolas, anuncios publicitarios iluminados de abajo hacia arriba y excesivamente iluminados, luminarias del tipo OV (non cut-off), que al tener un mal diseño luminotécnico o una mala colocación, dejan escapar buena parte del flujo luminoso fuera del área que se necesita iluminar.



Figura 2.17 Ejemplo de contaminación lumínica (Fuente Manual de iluminación vial SCyT).

2.3.3 Efectos

Las consecuencias que tiene esta contaminación luminosa son: tener un consumo de energía innecesario, un desperdicio de energía y dinero al enviar hacia el cielo gran parte de la energía consumida, lo cual obliga a tener lámparas de mayor potencia como es el caso de las lámparas de aditivos metálicos que no tienen la eficiencia necesaria para lograr la iluminación requerida en la carpeta asfáltica, siendo necesario aumentar la potencia o el número de postes. Otra consecuencia de la iluminación inadecuada y excesiva es el deslumbramiento, cuyos efectos pueden ser graves en vías de circulación de vehículos, en detrimento de la seguridad vial. La luz que incide directamente desde la lámpara hacia nuestros ojos, tiene una intensidad superior a la que nos llega reflejada por el suelo y por los obstáculos que en él se presentan, haciendo que la abertura de las pupilas se cierre para adaptarse a aquella de mayor intensidad, provocando que forcemos la vista, lo cual nos produce fatiga visual, reduce nuestra percepción y, en consecuencia, aumenta el riesgo de accidentes, perjudicando el aspecto ecológico como contribuir al cambio climático al generar residuos durante la producción de ese exceso de energía, alteración de ciclos de diversas especies animales, pérdida de visibilidad del cielo nocturno, consecuencia lamentable para todos y no solamente para astrónomos e investigadores.

2.3.4 Soluciones

Evitar la contaminación lumínica no significa disminuir la seguridad ni la visibilidad, ni tampoco apagar luminarias, la solución es utilizar luminarias que emitan la luz exclusivamente hacia abajo como son las tipo cut-off y semi cut-off, y evitar utilizar las tipo OV (non cut-off) las cuales al tener refractor, dispersan la luz produciendo pérdidas de energía y deslumbramiento.

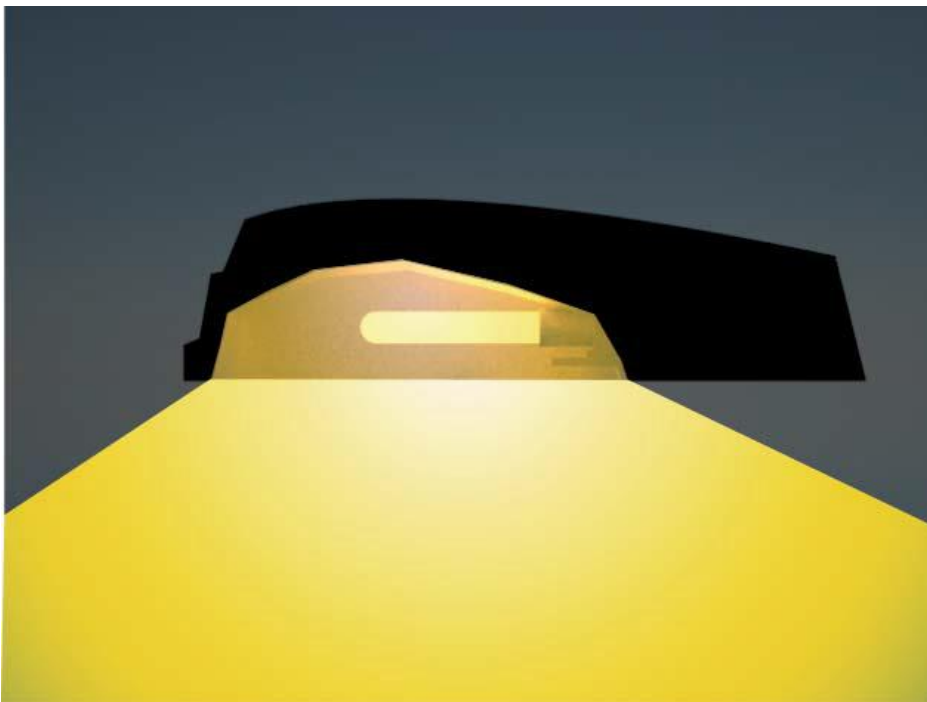


Figura 2.18 Vista transversal de una luminaria tipo semi cut-off (Fuente Manual de iluminación vial SCyT).

Es importante al elegir el tipo de lámpara para un proyecto de alumbrado, tener en cuenta los siguientes puntos:

- Rendimiento Luminoso:

Es la cantidad de luz que la lámpara produce por cada watt de energía eléctrica que consume, expresada en lúmenes/watt.

- Vida media o duración:

Es el tiempo promedio que la lámpara durará funcionando; se expresa en horas.

- Costo:

Que por sí solo no debe ser determinante, ya que una lámpara de alto rendimiento, al tener un menor consumo y una mayor duración, resulta a la larga más barata aunque su costo inicial sea mayor.

2.4 Iluminación de carreteras

La modernización y el desarrollo tecnológico se ha venido llevando a cabo en la construcción de carreteras y vías de comunicación en nuestro país, requiere de la aplicación técnica de alta calidad, eficiencia y economía en los sistemas de iluminación de las mismas la cual, se refleja en los bajos costos de operación (ahorro de energía) y mantenimiento. Para llevar a efecto este propósito es indispensable:

- Crear conciencia en las autoridades y funcionarios públicos, así como en los técnicos responsables de los proyectos y obras de alumbrado, para que se aseguren de la calidad de los equipos de iluminación involucrados para tales fines.
- Se deben comprobar físicamente los cálculos de gabinete y programas de cómputo en el terreno para certificar la veracidad de dichos estudios, previo a que estos equipos (luminarias, reactores y lámparas) sean comprados y así evitar las tediosas y engañosas polémicas de escritorio.
- Exigir a los proyectistas o fabricantes el estudio técnico-económico de operación y mantenimiento de los equipos antes que estos sean aprobados.



Figura 2.19 Carretera iluminada (Fuente Manual de iluminación vial SCyT).

La iluminación de carreteras ocupa un papel de suma importancia en la seguridad nocturna del auto-transportista, ya que ésta le debe proporcionar la visibilidad para distinguir cualquier

obstáculo que se le presente en el camino y poder maniobrar a tiempo para evadirlo, así como cerciorarse de los detalles de las áreas circunvecinas tales como las señales de tránsito, ya sea que se encuentren a los lados o pintadas en el pavimento, entradas de caminos laterales y posibles baches.

Para lograr un máximo de eficiencia y confort visual se tienen que tomar en cuenta las siguientes consideraciones:

- En la conducción nocturna actúa la denominada visión mesópica o crepuscular, que comprende el intervalo entre 10-3 y 3 ó 4 cd/m² cuya característica es la reducción de la agudeza visual y la disminución en la sensibilidad al contraste.
- Una clara visibilidad de los vehículos, obstáculos, bordes de las banquetas o acotamientos, así como de las zonas sombreadas es esencial para el peatón
- Procurar que los postes de alumbrado sean instalados fuera del acotamiento de las carreteras, así como que las luminarias queden fuera del ángulo visual del conductor.
- Asegurar una buena visibilidad y un confort visual satisfactorio. La visibilidad (posibilidad de percibir e identificar rápidamente un obstáculo fijo o móvil) que se presenta en su campo visual, depende de varios factores físicos y ópticos.
- Proporcionar un nivel de luminancia y uniformidad de la misma, para que la percepción de cualquier objeto se realice por efecto de silueta.

Las recomendaciones nacionales para alumbrado público y de carreteras, han diferido notablemente de un país a otro dentro de un mismo continente, así como de un continente a otro, originando con frecuencia serias controversias entre especialistas de estos países, sobre todo en los aspectos técnicos tanto teóricos como prácticos, al escoger el tipo de lámpara, luminaria por utilizar y la instalación eléctrica apropiada, puesto que las condiciones técnicas y financieras varían de un país a otro, así como la construcción y trazo de calles y carreteras.

Con la creación de la CIE y a medida que la tecnología progresa, estas controversias han disminuido y es así como los países de origen anglosajón (E.U.A., Inglaterra y Canadá) en los que anteriormente recomendaban la instalación de luminarias “non cut-off” “actualmente están cambiando a luminarias “cut-off” o “semi cut-off” como las utilizadas desde siempre en el Continente Europeo.



Figura 2.20 Carpeta seca nivel de luminancia uniforme (Fuente Manual de iluminación vial SCyT).

Uniformidad de luminancia de la carpeta en la carretera o calle

El objetivo principal de un alumbrado eficiente y funcional en carreteras y calles, es que los obstáculos que se encuentran sobre ella se destaquen claramente, por lo que ésta deberá quedar uniformemente iluminada.

La uniformidad depende:

- a) De la calidad de difusión y reflexión del recubrimiento de la carretera o calle.
- b) De la colocación de los equipos refiriéndose a la geometría de la instalación (altura de montaje, distancia interpostal, inclinación de las luminarias, etc.).
- c) Del ajuste de las luminarias y de sus cualidades fotométricas.

Se sabe que la impresión luminosa que recibe el ojo proveniente de un objeto iluminado, no es debido al nivel de iluminación de este objeto sino a su luminancia, es decir, que el ojo se sensibiliza no por la luz recibida por el objeto, sino por aquella que éste refleja hacia el observador, por lo tanto se define que la luminancia es el efecto que nos produce la sensación de ver.

Esto sucede en el alumbrado público en donde el objeto de nuestra atención, está constituido por la carpeta de la carretera o calle y sus alrededores inmediatos (guarniciones, banquetas, señalamientos, etc.). De ahí la importancia que tienen las características ópticas del recubrimiento de la carpeta.

Un rayo luminoso emitido por una luminaria al llegar a la carpeta de la carretera, se puede comportar de muchas formas dependiendo de la calidad de esparcimiento y reflexión de la carpeta.

Suponiendo que el recubrimiento de la calle sea una superficie perfectamente reflejante, el observador, cualquiera que sea su posición sobre la carretera, sólo verá la imagen de la luminaria reflejada por la carpeta.



Figura 2.21 Carpeta mojada se vuelve más reflejante (Fuente Manual de iluminación vial SCyT).

El rayo que emite la luminaria es reflejado hacia el observador, siguiendo las leyes elementales de óptica geométrica denominadas “Ley de Snell”, donde el ángulo de incidencia es igual al ángulo de reflexión. Algunas carpetas muy rodadas y en tiempos de lluvia se aproximan mucho a una carpeta reflectora, pero las irregularidades del suelo crean una sucesión de imágenes de la fuente luminosa en forma de banda, prácticamente continua o raya de luminancia desde la base del poste hasta el observador.

Está comprobado que en carpetas muy lisas, la zona de luminancia máxima nunca se extiende más allá de la base del poste; lo que se explica fácilmente, ya que los rayos luminosos son reflejados en sentido opuesto al de observación (rayo P) y por lo tanto no pueden ser percibidos por el ojo. Cuando el observador se desplaza, la raya de luminancia se desplaza también con él.

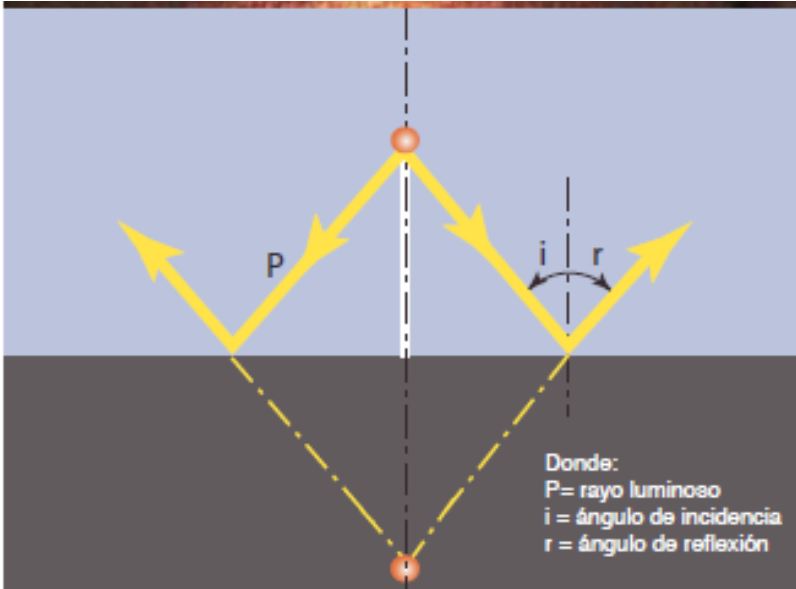


Figura 2.22 Angulo de incidencia igual al ángulo de reflexión (Fuente Manual de iluminacion vial SCyT).

Teóricamente en una carpeta con esparcimiento (lo que más se asemeja es una carpeta cubierta de nieve como la mostrada en la figura 6.5), la cantidad de flujo luminoso que llega a la carpeta, se reparte uniformemente en todas direcciones.

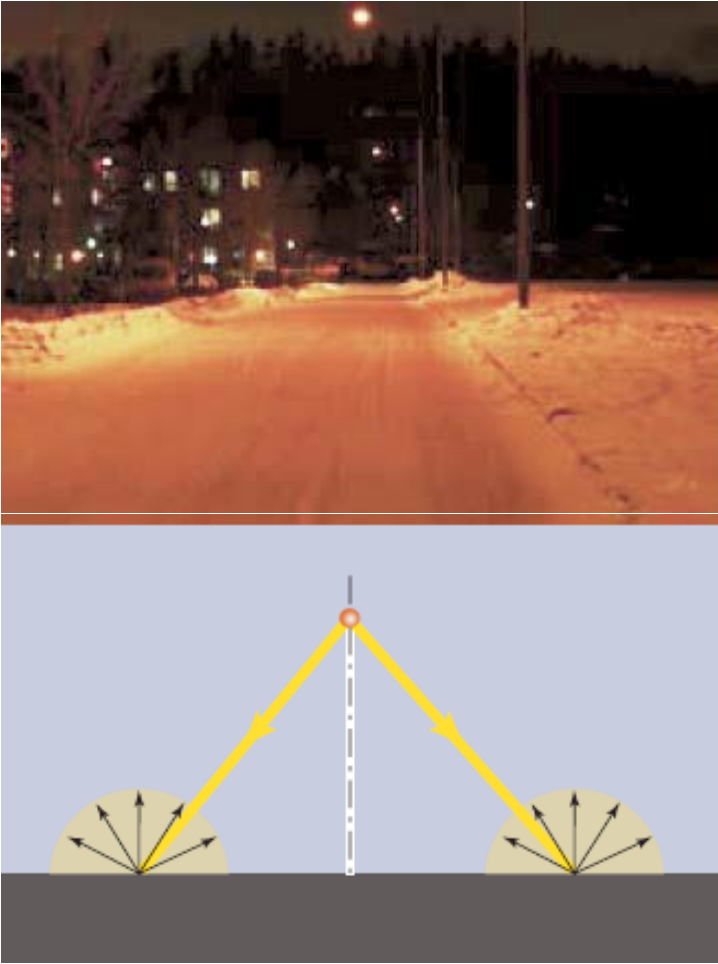


Figura 2.23 Carpeta con esparcimiento (Fuente Manual de iluminación vial SCyT).

Cualquiera que sea la posición del observador con relación a un punto indefinido de la carpeta, tendrá siempre un componente de flujo reflejado que llegará al ojo del observador. Por lo tanto, la luminancia de la carpeta es entonces independiente de la posición del observador.

En la práctica las características ópticas de los recubrimientos de las calles comunes, contienen en proporciones variables los dos ejemplos de reflexión citados anteriormente, ya que parte del flujo es difundido y la otra parte es reenviado en una dirección privilegiada que está muy próxima a la del rayo reflejado, de acuerdo con las leyes de Descartes (Reflexión Especular). Se pueden representar esquemáticamente los componentes de flujo como se indica en la figura.

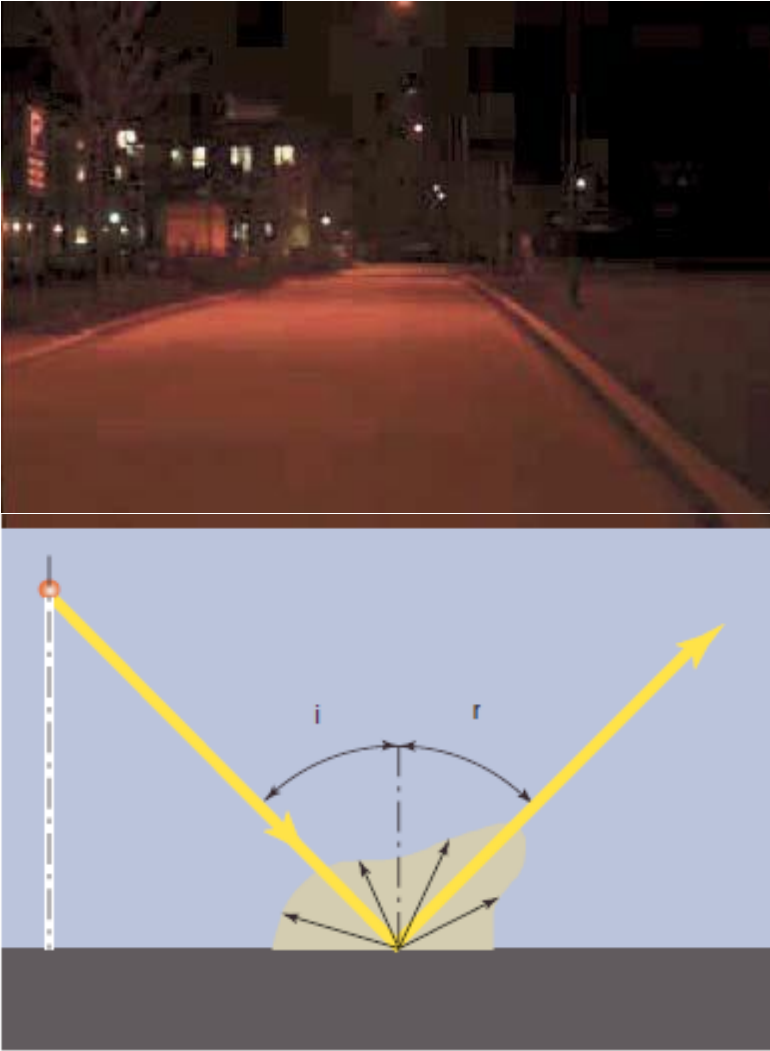


Figura 2.24 Reflexión de carpeta (Fuente Manual de iluminación vial SCyT).

Es conveniente que los recubrimientos de las carreteras o calles no sean de acabado liso sino granuloso o rugoso, contribuyendo así a la seguridad en el manejo en cuanto a la buena adherencia de las llantas de los vehículos de circulación

2.5 Pavimentos

Es importante que los ingenieros responsables de los proyectos de las nuevas instalaciones, tengan una relación técnica más estrecha con los ingenieros responsables de los recubrimientos de las calles, con el objeto de buscar en la medida de lo posible una mejor solución desde el punto de vista óptico para dichos recubrimientos, ya que además del acabado granulado, el color del recubrimiento juega un papel muy importante en los resultados ópticos de una instalación de alumbrado, pues con carpetas de acabado granulado y más claras que las actuales, se obtendrá una superficie más difusora y más reflectora de los rayos luminosos incidentes a ella, procedentes de los equipos de iluminación, con lo cual se aumentará el rendimiento óptico del conjunto de la instalación y consecuentemente se reflejará en un menor costo de la misma.

La CIE ha determinado (después de haber efectuado durante largo tiempo pruebas de laboratorio y aplicaciones prácticas), una clasificación de recubrimientos más usuales existentes en la actualidad, el factor R que liga al Nivel de Iluminación Promedio (que conocemos y que recomienda la I.E.S.) con el nivel de Luminancia Promedio, ha sido substituido por el establecido por la CIE en sus publicaciones N° 30.2 y 30.6 por las matrices de reflexión Q0 y que la NORMA OFICIAL MEXICANA adoptó simplificando en su siguiente tabla los valores:

NOM-001-SEDE-2005, Instalaciones Eléctricas (utilización) 930-5 Especificaciones auxiliares





clase	Qo	descripcion		Tipo de reflectancia
R1		Superficie de concreto cemento portland.		Casi difuso
R2		Superficie de asfalto con un agregado compuesto de un mínimo de 60% de grava de tamaño mayor de 10 mm.		Difuso especular
R3		Superficie de asfalto regular y con recubrimiento sellado, con agregados oscuros de roca, textura rugosa después de algunos meses de uso (Típico de autopistas).		Ligeramente especular
R4		Superficie de asfalto con textura muy tersa.		Muy especular

Tabla 2.1 Características de reflectancia del pavimento (Fuente: CIE).

luminancia [cd/m²] = iluminancia [lux] x reflectancia [Qo]

El inconveniente que presentan los recubrimientos a base de asfalto y grava petrolizada tienen un color oscuro, el cual, de noche y con el mal tiempo dificulta la percepción de obstáculos fijos o móviles. El hecho de utilizar en las carpetas recubrimientos claros tiene la enorme ventaja de permitir una instalación de alumbrado público eficaz y confortable en condiciones particularmente económicas, ya que el flujo luminoso y por ende, la potencia requerida por m² de calle, es la mitad y en muchos casos menor de lo que sería necesario para el caso de una carpeta con recubrimiento oscuro.

Por lo tanto, es importante tomar en cuenta el color de revestimiento de la carpeta de la carretera o calle, ya sea gris oscuro o claro; la obtención de una luminancia dada sobre el revestimiento requiere de un cierto nivel de iluminación (lux), que puede variar no solamente de sencillo a doble sino en muchos casos de sencillo a cuádruple.

La CIE recomienda los siguientes niveles para carpetas oscuras o claras en varios tipos de vías de circulación:




		Carpeta oscura	Carpeta clara
	Complejos viales a varios niveles Vías de circulación Plazas importantes	50 lux	25 lux
	Vías urbanas de tráfico importante y velocidad limitada	30 lux	15 lux
	Vías residenciales	20 lux	10 lux

Tabla 2.2 Recomienda los siguientes niveles para carpetas oscuras o claras en varios tipos de vías de circulación (REF 3).

2.6 Nivel de luminancia

Los recubrimientos de las carreteras o calles se comportan como superficies semi-difusoras y semi-reflejantes, ya que los rayos más inclinados reflejan mejor la luz hacia el observador, que los rayos cerca de la vertical, tal como se muestra en la figura. 2.25

Figura 2.25 Nivel de luminancia (Fuente: CIE 1977)

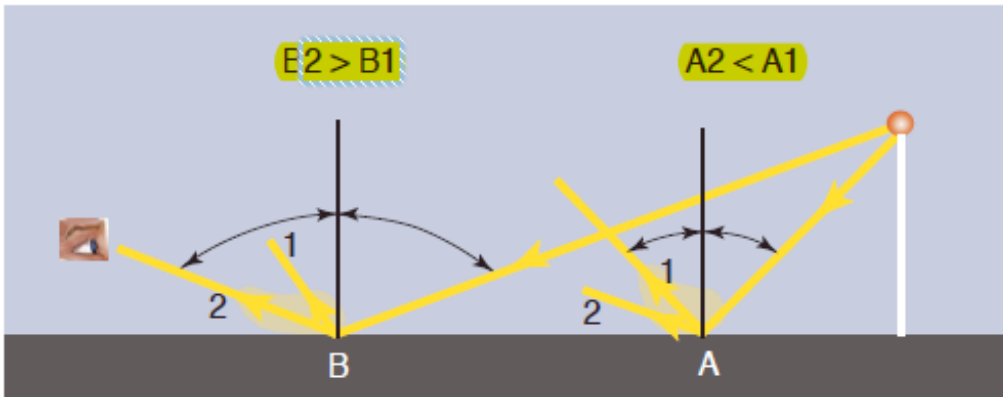


Figura 2.25 Nivel de luminancia (Fuente: CIE 1977).

La uniformidad de los niveles de iluminación en una carretera con un observador en posición estática se establece cuando un observador se encuentra en un vehículo en movimiento, la uniformidad de luminancia conduce a obtener alternancias de bandas claras y oscuras (Efecto de Escalera o Efecto Cebra).

La CIE REF4, recomienda para los recubrimientos de calles más comunes que la UNIFORMIDAD DEL NIVEL LONGITUDINAL SOBRE EL EJE DE OBSERVACIÓN DEBE SER DEL ORDEN DE:

$$\frac{E_{\min}}{E_{\max}} > 0.5 \text{ y } < 0.8$$

Al obtener valores por encima de los indicados dará como resultado la obtención de manchas brillantes entre los equipos instalados.

Estar por debajo de estos valores, ocasionará obtener manchas muy oscuras entre los equipos.

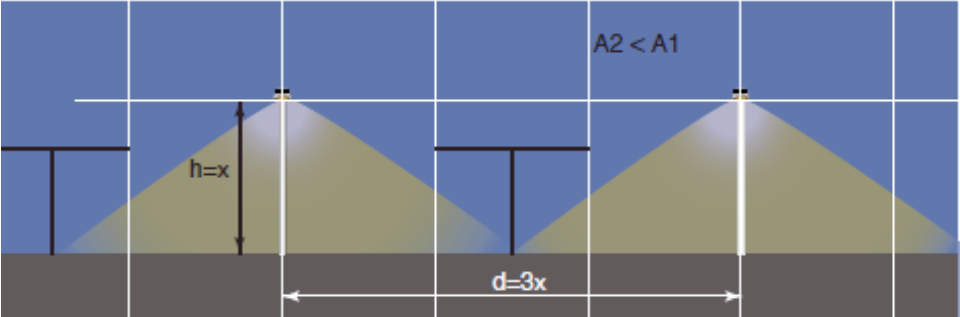
En nuestro país es aceptable dadas las condiciones de los pavimentos existentes:

$$\frac{E_{\min}}{E_{\max}} > 0.4 \text{ y } < 0.8$$

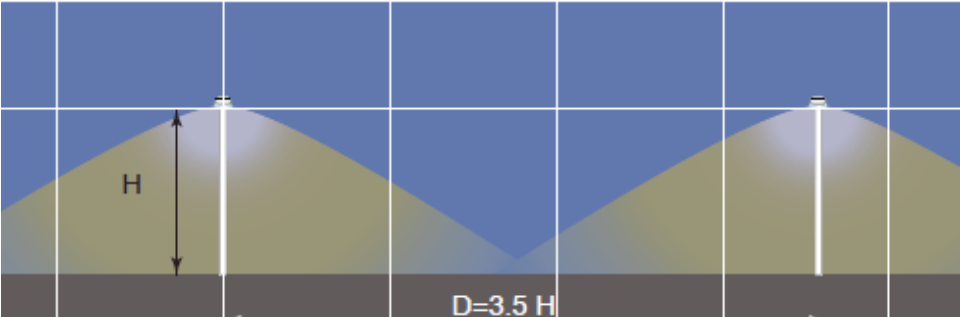
Conservando la uniformidad del nivel de iluminación con los valores anteriores, se alcanza una buena uniformidad de luminancia que permite la visibilidad de los obstáculos existentes en la carretera o calle (baches, topes, etc.).

Este resultado se obtiene generalmente con una relación de distancia igual a tres veces la altura de montaje para luminarias del tipo cut-off, con lámparas con recubrimiento interior y de 3.5 con lámparas claras, desde luego, que los valores de esta relación pueden aumentarse a 4 respectivamente con carpetas o recubrimientos de la carretera o calles claras y difusas.

Luminaria Cut-off



Luminaria Semicut-off



Luminaria Non cut-off

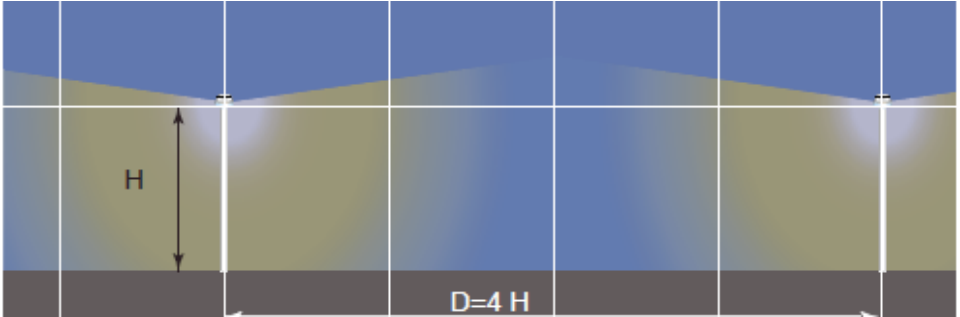


Figura 2.26 Relación de espaciamiento y altura en diferentes tipos de luminarias (Fuente Manual de iluminación vial SCyT).

2.7 Confort visual

El control del deslumbramiento es importante, para obtener un confort visual en una instalación en la práctica y en condiciones normales, el deslumbramiento depende mucho del tipo de luminaria que se emplea, generalmente el deslumbramiento es ocasionado por el uso de luminarias tipo non cut-off. En 1965 la CIE clasifico las luminarias de acuerdo a la dirección de la intensidad máxima con relación a la vertical, este sistema se sigue utilizando para iluminación vial.

Tipo de luminaria	Dirección de la intensidad máxima	Valor máximo de la intensidad luminosa emitida en un ángulo de elevación de 90°	Valor máximo de la intensidad luminosa emitida en un ángulo de elevación de 80°
Cut-off	0-65°	10cd / 1000 lumen	30cd / 1000 lumen
Semi Cut-off	0-75°	50cd / 1000 lumen	100cd / 1000 lumen
Non Cut-off	0-90	100cd independientemente del flujo luminoso	

Tabla 2.3 Intensidad máxima con relación a la vertical (Fuente Manual de iluminación vial SCyT).

En los siguientes tres ejemplos de curvas fotométricas, se aprecia los diferentes ángulos de intensidad máxima de las luminarias:

La luminaria Cut-off, tiene una intensidad máxima a un ángulo de 54°.

La luminaria Semi cut-off, tiene una intensidad máxima a un ángulo de 65°.

La luminaria Non cut-off, tiene una intensidad máxima a un ángulo de 77°, (por arriba del ángulo máximo permitido de 70°, por lo cual causa deslumbramiento y molestia visual).

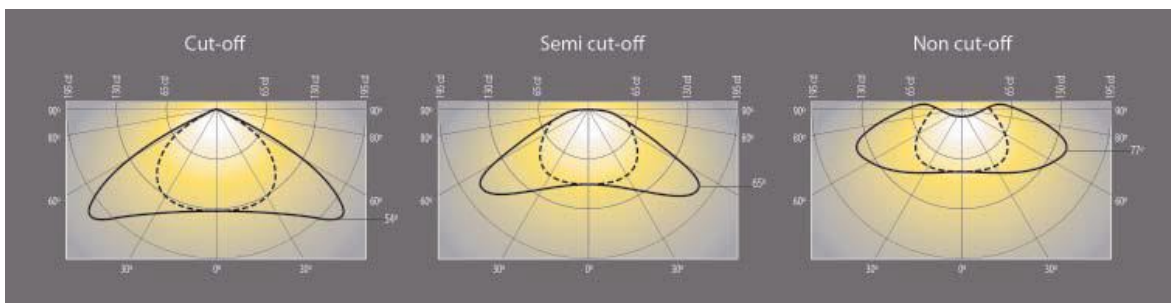


Figura 2.27 Aplicación de curvas fotométricas según su clasificación (Fuente Manual de iluminación vial SCyT.).

Debemos recalcar que las luminarias Non cut-off, dispersan la mayor parte del flujo luminoso hacia los lados, en lugar de dirigirlos a la vialidad, contribuyendo fuertemente a la contaminación luminosa.

2.8 Nivel de iluminación

Para verificar la uniformidad de luminancia y el confort visual, debemos saber cuál es el nivel de iluminación promedio obtenido con un sistema de iluminación bien diseñado.

El nivel de iluminación nos indica el rendimiento de los equipos instalados y sobre todo su eficiencia para enviar hacia la calle la mayor cantidad de flujo luminoso posible, a esta acción se le denomina FACTOR DE UTILIZACIÓN DEL EQUIPO (F_u), el cual depende de la concepción de sus componentes, de la altura de montaje y del ancho de la calle.

La SCT exige que el factor F_u sea igual o mayor a 0.40, para cualquier tipo de luminarias con la relación:

$$F_u = \frac{\text{ancho de la calle}}{\text{altura de montaje}} \geq 0.40$$

Con el análisis de los criterios de calidad anteriores, se verán ahora los cálculos de iluminación, tomando en consideración el criterio de luminancia a partir de los niveles de iluminación.

Sabemos que con un determinado nivel de iluminación obtenemos un nivel de luminancia en el sentido de observación.

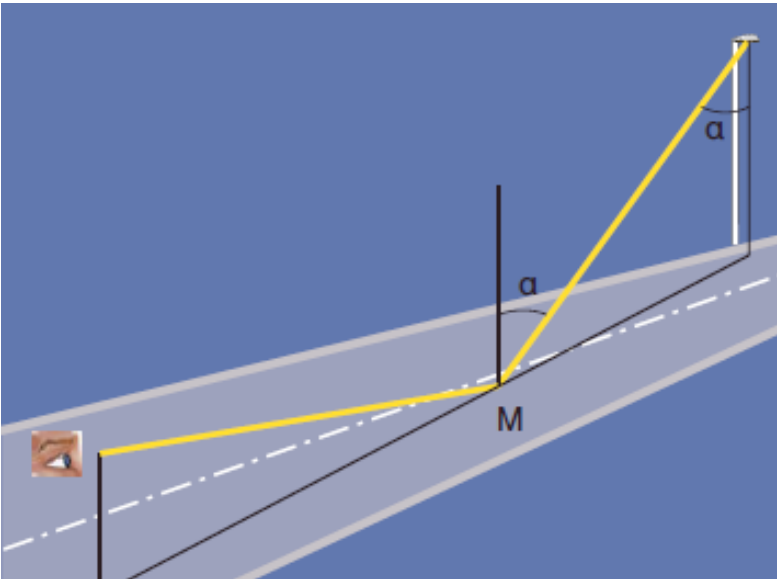


Figura 2.28 Nivel de luminancia (Fuente: CIE) (Fuente Manual de iluminación vial SCyT).

Este nivel de luminancia depende del tipo de superficie en donde se está reflejando la luz de la fuente luminosa.

El nivel de luminancia es lo que el ojo capta, por lo que, el cálculo de luminancias es lo que más se asemeja a la sensación de ver.

La CIE REF5, Manual de Alumbrado Vial REF6, ha determinado una clasificación de recubrimientos más usuales actualmente; interviene un factor R, que relaciona al nivel de iluminación promedio con el nivel de luminancia promedio.

$$luminancia [cd / m^2] = \frac{nivel\ de\ iluminacion [lux]}{R}$$

El factor R, depende de las características ópticas de cada recubrimiento.

	Tipo de recubrimiento	Luminarias cut-off	Luminarias semicut-off
	Concreto limpio	12	8
	Concreto sucio	14	10
	Asfalto emblanquecido	19	14
	asfalto gris	19	14
	Asfalto oscuro	24	18
	empedrados	18	13

Tabla 2.4 Factor R para diferentes tipos de recubrimientos (Fuente: CIE).

El Manual de Alumbrado Vial REF7, requiere que todas las obras de iluminación de carreteras sean eficientes y funcionales, por lo que recomienda analizar cuidadosamente la fisonomía de las luminarias por instalar, tanto en su sistema óptico como mecánico, este último debe tener un fácil mantenimiento, así como realizar pruebas sobre el terreno de los equipos a instalar antes de dar el visto bueno a las obras.

En la siguiente tabla se muestran valores de luminancia promedio para diferentes instalaciones de alumbrado que recomienda la CIE REF8 y el Manual de Alumbrado Vial REF9 (Tabla 2.5).

Clase de vía	Luminancia promedio	Tipo de luminaria
Vías rápidas	1.5-2.5 cd/m ²	Cut-off o Semi cut-off
Alumbrado urbano	1.5-2 cd/m ²	Semi cut-off
Glorietas y cruces peligrosos	1.5-2 cd/m ²	Semi cut-off
Puntos singulares fuera de zona alumbrada	0.5kl-1 cd/m ²	Semi cut-off

Tabla 2.5 Valores de luminancia promedio para diferentes instalaciones (Fuente Manual de iluminación vial SCyT).

El factor de envejecimiento (Vlu) de la luminaria, se debe tomar en cuenta para conocer la eficiencia del equipo después de 12 meses de operación.

	Luminaria sin cubierta (abierta)	Luminaria con cubierta (cerrada)
Atmosfera contaminada	0.65	0.70
Atmosfera no contaminada	0.90	0.95

Tabla 2.6 Factores de envejecimiento de una luminaria (Fuente Manual de iluminación vial SCyT).

Después de un año de operación, un equipo que no ha recibido mantenimiento por este tiempo, tiene un factor de envejecimiento V.

$$V = Vla \times Vlu$$

V = Factor de envejecimiento de equipo

Vla = Factor de envejecimiento de lámpara

Vlu = Factor de envejecimiento de luminaria

Se recomienda realizar cuando menos una vez por año mantenimiento de alumbrado (limpieza de reflector, cubierta y revisión del equipo de foto-control), así como el repintado de los postes.

El cambio de lámpara habrá de realizarse cada 3 o 4 años (dependiendo del tipo de lámpara), para que su operación resulte rentable.

2.9 Clasificación de carreteras según la CIE

Los criterios indicados en la Tabla 2.7 indican los valores de intensidades medias diarias de tráfico (IMD) que se deben tomar en cuenta para iluminar una carretera

Tipo de vía	IMD mínima para iluminar (vehículos/hora)
Carreteras convencionales	12000
Periféricos y autopistas	22000
Interciones	4000
entronques	7000

Tabla 2.7 Valores límites de IMD (intensidad media diaria) recomendados para iluminación (Fuente: CIE)

Tipo de vía	Tipo de usuarios				Tipo de carretera
	M	S	C	P	
Carreteras de calzadas separadas con cruces a distinto nivel y accesos controlados (autopistas y autovías). Carreteras de calzada única de doble sentido de circulación y accesos limitados (vías rápidas).	M				A1
Carreteras interurbanas sin separación de aceras o carril bici.		S			A2
Vías colectoras y rotondas de circunvalación. Carreteras interurbanas con accesos no restringidos.		S	C	P	A3

Tabla 2.8 Clasificación de la CIE de los diferentes tipos de carreteras (Fuente Manual de iluminación vial SCyT).

M = Tráfico motorizado

S = Vehículos en movimiento lento

C = Ciclistas

P = Peatones

2.9.1 Selección de clases de alumbrado

Teniendo las características de la carretera a iluminar y de acuerdo a la clasificación de la tabla (2.8) se procede a seleccionar la clase de alumbrado.

De acuerdo al CIE para calzadas secas se definen las siguientes clases de alumbrado de la serie ME: ME1, ME2, ME3 (a,b) y ME4 (a,b) clasificadas de mayor a menor importancia en los niveles de iluminación.

Carretera tipo:	Tipo de vías	Clase de alumbrado serie ME
A1	<ul style="list-style-type: none"> • Carreteras de calzadas separadas con cruces a distinto nivel y accesos controlados (autopistas y autovías) * Intensidad de tráfico y complejidad del trazado de carreteras: Alta (IMD) > 25,000 Media (IMD) - Entre 15,000 y 25,000 Baja (IMD) < 15,000 	ME 1 ME 2 ME 3a
	<ul style="list-style-type: none"> • Carreteras de calzada única de doble sentido de circulación y accesos limitados (vías rápidas) * Intensidad de tráfico y complejidad del trazado de la carretera: Alta (IMD) > 15,000 Media y baja (IMD) < 15,000 	ME 1 ME 2
A2	<ul style="list-style-type: none"> • Carreteras interurbanas sin separación de aceras o carriles bici. * Intensidad de tráfico y complejidad del trazado de la carretera. * Control de tráfico y separación de los distintos tipos de usuarios * Parámetros específicos 	ME 1 ME 2 ME 3 ^a ME 4a
A3	<ul style="list-style-type: none"> • Vías, colectoras y rotondas de circunvalación. • Carreteras interurbanas con accesos no restringidos. * Intensidades de tráfico y complejidad del trazado de la carretera. * Control de tráfico y separación de los distintos tipos de usuario. * Parámetros específicos. 	ME 1 ME 2 ME 3b ME 4 ^a ME 4b

Tabla 2.9 Clases de alumbrado para carreteras (Fuente: CIE).

La serie de alumbrado ME requiere de los siguientes cálculos de iluminación.

- Nivel de luminancia de la superficie de la calzada.
- Uniformidad global de luminancia.
- Uniformidad longitudinal de luminancia.
- Deslumbramiento perturbador (incremento umbral de contraste).
- Relación entorno (iluminación de zonas adyacentes a la calzada).

La luminancia se expresa en cd/m^2 , en tanto las uniformidades como la relación entre luminancias carecen de unidades.

El deslumbramiento perturbador se expresa en tanto por ciento.

Clase de alumbrado o serie ME *	Luminancia de la superficie de la calzada en condiciones secas			Deslumbramiento perturbador	Iluminación de alrededores
	Luminancia media Lm (cd/m^2)	Uniformidad global Uo	Uniformidad longitudinal Ul	Incremento umbral TI (%)**	Relación entorno SR***
ME 1	2.0	0.4	0.7	10	0.5
ME 2	1.5	0.4	0.7	10	0.5
ME 3	a	0.4	0.4	15	0.5
	b	0.4	0.4	15	0.5
ME 4	a	0.4	0.6	15	0.5
	b	0.4	0.4	15	0.5

Tabla 2.10 Clases de alumbrado SERIE ME. (De acuerdo con la CIE).

* Los niveles de la tabla son valores mínimos en servicio con mantenimiento de la instalación de alumbrado, a excepción de TI que son valores máximos iniciales. A fin de mantener dichos niveles de servicio debe considerarse un factor de depreciación no mayor a 0.8 dependiendo del tipo de luminaria y grado de contaminación del aire.

** Cuando se utilicen fuentes de luces de baja luminancia (lámparas fluorescentes y de vapor de sodio a baja presión), puede permitirse un incremento de 5% del incremento de umbral.

*** La relación entorno SR debe aplicarse en aquellas vías de tráfico rodado donde no existan otras áreas adyacentes a la calzada con sus propios requerimientos.

2.9.2 Clases de recubrimientos mojados

En el caso de vialidades mojadas, la superficie refleja la luz de forma mucho más especular o dirigida que difusa (misma luminancia en todas las direcciones del espacio) y la uniformidad de las luminancias del arroyo de circulación queda degradada afectando negativamente a la visibilidad de los obstáculos en la carretera.

En las zonas geográficas en las que la intensidad y la lluvia constante durante una parte significativa de las horas nocturnas a lo largo del año, provoque que la superficie de la calzada permanezca mojada, se tomaran en cuenta los criterios que se muestran en la tabla 2.11.

Estas recomendaciones son para aquellas zonas con una medida superior a 100 días de lluvia al año. Para esta situación, el cálculo de la uniformidad global de luminancias se realizara de acuerdo al método que aparece descrito en la publicación CIE REF10, tomando en cuenta las características fotométricas de los pavimentos normalizados al respecto.

Clases de alumbrado serie ME	Luminancia de la superficie de la calzada en condiciones secas y húmedas				Deslumbramiento perturbador	Iluminación de alrededores
	Calzada seca			Calzada húmeda		
	Luminancia media Lm (cd/m ²)	Uniformidad global U _o	Uniformidad longitudinal UI*	Uniformidad global U _o	Incremento Umbral TI (%)	Relación entorno SR
MEW 1	2.00	0.40	0.60	0.15	10	0.50
MEW 2	1.50	0.40	0.60	0.15	10	0.50
MEW 3	1.00	0.40	0.60	0.15	15	0.50
MEW 4	0.75	0.40	-	0.15	15	0.50

Tabla 2.11 Clases de alumbrado SERIE MEW (Fuente: CIE).

* Este criterio no es restrictivo pero puede aplicarse, por ejemplo, en autopistas, autovías y carreteras de calzada única de doble sentido de circulación y accesos limitados.

2.9.3 Tramos singulares

Se define como tramo singular de una carretera, aquel que presenta complejidad de problemas de visión y maniobras que tienen que realizar los conductores de vehículos que circulan por él.

Como son:

- Entronques (enlaces e intersecciones) y glorietas.
- Zonas de reducción del número de carriles o disminución del ancho de la calzada.
- Zonas de incorporación de nuevos carriles.
- Pasos subterráneos.
- Pasos elevados.

También se consideran tramos singulares, aquellos sectores de gran dificultad por los que transitan peatones, ciclistas u otros usuarios de la vía de tráfico. Por lo tanto, el sistema de alumbrado que se proyecte debe vislumbrar del tramo singular todas las características del mismo, tales como la posición de los bordillos, marcas viales, diferentes señalizaciones, direcciones de tráfico, etc., así como evidenciar la presencia de peatones, ciclistas, obstáculos (baches), vehículos y el movimiento de los mismos en el entorno del tramo singular.

a) Criterio de luminancia

De ser posible, en los tramos singulares se aplicaran los criterios de luminancias, uniformidades global y longitudinal, deslumbramiento perturbador y relación entorno, que han sido definidos para las distintas clases de alumbrado. Se tomara en cuenta la clase de alumbrado que se defina para el tramo singular, sea de un grado superior al de la vía de tráfico a la que corresponde dicho tramo singular.

Como ejemplo, si una carretera tiene una clase de alumbrado ME1 a un tramo singular incluido en su recorrido, le corresponde una clase de alumbrado CE0. Si coinciden varias vías en un tramo singular tal y como sucede en los cruces, la clase de alumbrado será un grado superior al de la vía que tenga la clase de alumbrado mayor.

b) Criterio de Iluminancia

Cuando resulte impracticable aplicar los criterios de luminancia. Se utilizaran los criterios de iluminancia. Esta situación puede ocurrir cuando la distancia de visión sea inferior a los 60m (valor mínimo que se utiliza para el cálculo de luminancia), y cuando no se puede situar adecuadamente el observador debido a la sinuosidad y complejidad del trazado de la carretera, o bien cuando se carece de la información técnica necesaria.

En estos casos se aplicaran los criterios de iluminación mediante la iluminancia media y su uniformidad, que corresponden a las clases de alumbrado de la serie CE (Tabla 2.12).

Se cumplirá también con las limitaciones de deslumbramiento o de control de la contaminación luminosa, representadas por las clases de intensidades serie G (Tabla 2.13).

Clase de alumbrado serie CE*	Iluminación horizontal	
	Iluminancia media E_m (lux)	Uniformidad media U_m
CE 0	50	0.40
CE 1	30	0.40
CE 2	20	0.40
CE 3	15	0.40
CE 4	10	0.40
CE 5	7.5	0.40

Tabla 2.12 Clases de alumbrado SERIE CE (Fuente: CIE).

* Los niveles de iluminancia de la tabla son valores mínimos en servicio con mantenimiento de la instalación de alumbrado. Debe de considerarse un factor de depreciación no mayor a 0.80, dependiendo del tipo de luminaria y grado de contaminación del aire.

Cuando una carretera presenta entronques con una especial complejidad y un elevado riesgo de accidentes, este tramo deberá tener una clase de alumbrado CE0 (50 lux) o similar nivel de luminancia 3.3 cd/m². En situaciones intermedias, podrán adoptarse clases de alumbrado comprendidas en el intervalo entre las clases de alumbrado CE1 y CE0, correspondiente a

niveles de Iluminancia de 35, 40 y 50 lux o sus valores similares 2,3 – 2,7 y 3 cd/m² respectivamente.

Clases de intensidad	Intensidad máxima (cd-7Klm)**			Otro requerimientos
	A 70°*	A 80°*	A 90°*	
G1	-	200	50	ninguno
G2	-	150	30	Ninguno
G3	-	100	20	ninguno
G4	500	100	10	Intensidades por encima de 95° deben ser cero
G5	350	100	10	Intensidades por encima de 95° deben ser cero
G6	350	100	0	Intensidades por encima de 90° deben ser cero

Tabla 2.13 Clases de alumbrado SERIE G (Fuente: CIE).

*Cuando no se precise un requerimiento exhaustivo en la limitación del deslumbramiento

Cuadro comparativo de niveles de iluminancia y luminancia.

Aplicable cuando no se cuenta con los datos suficientes para el cálculo de luminancias.

Comparable por columnas					
Clase de alumbrado serie CE	Uniformidad media (UM)	Iluminación Promedio lux	Luminancia Promedio cd/m ²	Uniformidad Media(Uo)	Clase de Alumbrado Serie ME
CE 0	0.40	50	3.5	0.40	ME 0
CE 1	0.40	30	2.9	0.40	ME 1
CE 2	0.40	20	1.5	0.40	ME 2
CE 3	0.40	15	1.0	0.40	ME 3
CE 4	0.40	10	0.75	0.40	ME 4

Tabla 2.14 Comparativo de niveles de iluminancia y luminancia REF11.

2.10 Tipos de carreteras

2.10.1 El tipo A1

El tipo A1 clasificación CIE corresponde al tipo A4S de la SCT con cuerpos separados

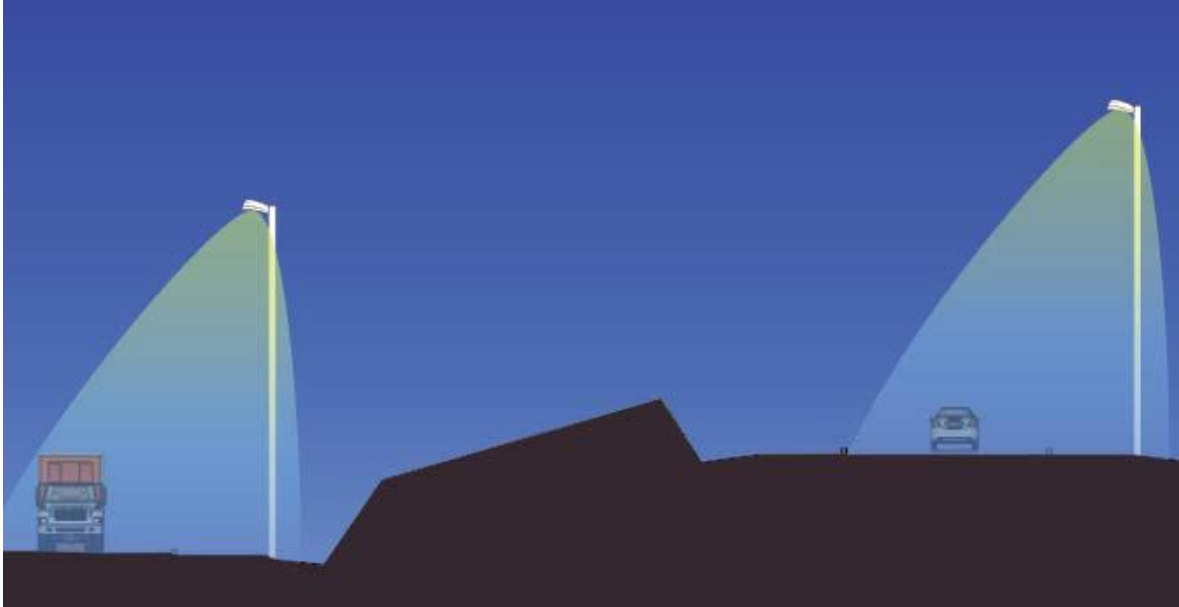


Figura 2.29 Vista en corte transversal de la carretera tipo A1 REF12 con cuerpos separados.

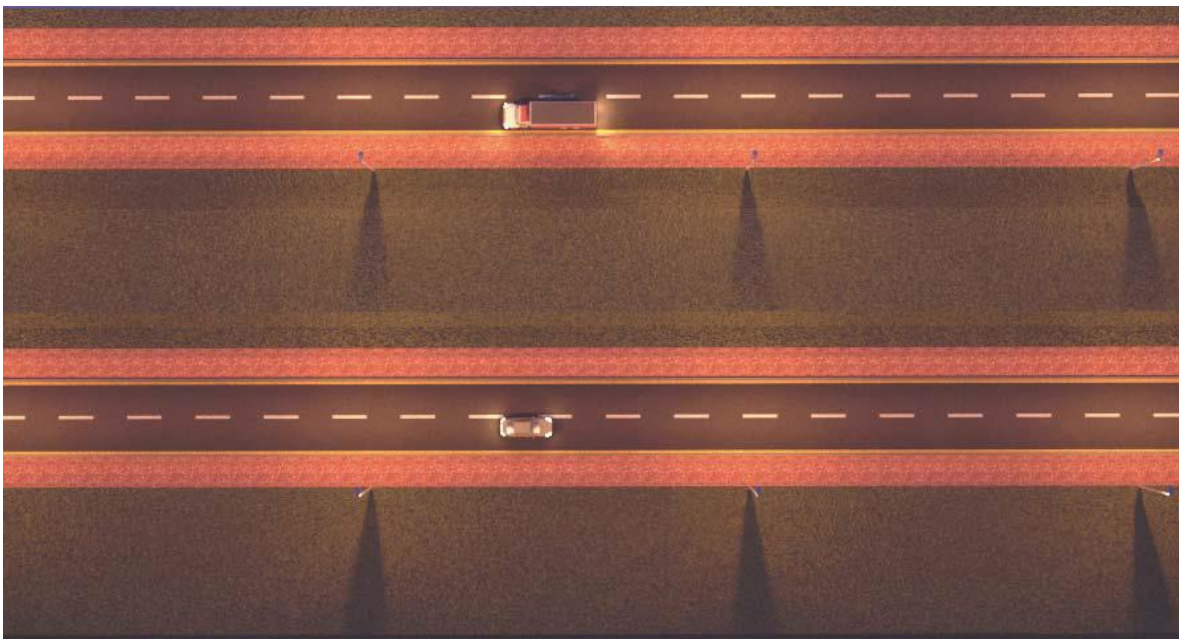


Figura 6.12 Vista en planta de la carretera tipo A1 con sistemas de iluminación (Fuente Manual de iluminación vial SCyT).

Carretera de calzadas separadas a distinto nivel. Los postes de alumbrado se colocaran fuera del acotamiento.

El Tipo A1 clasificación CIE corresponde al tipo SCT A 4 (un cuerpo con camellón)

Figura 2.30 Vista en corte transversal de la carretera tipo A4 (un cuerpo con Camellón central)



Figura 2.30 Vista en corte transversal de la carretera tipo A4 (un cuerpo con Camellón central) (Fuente Manual de iluminación vial SCyT).

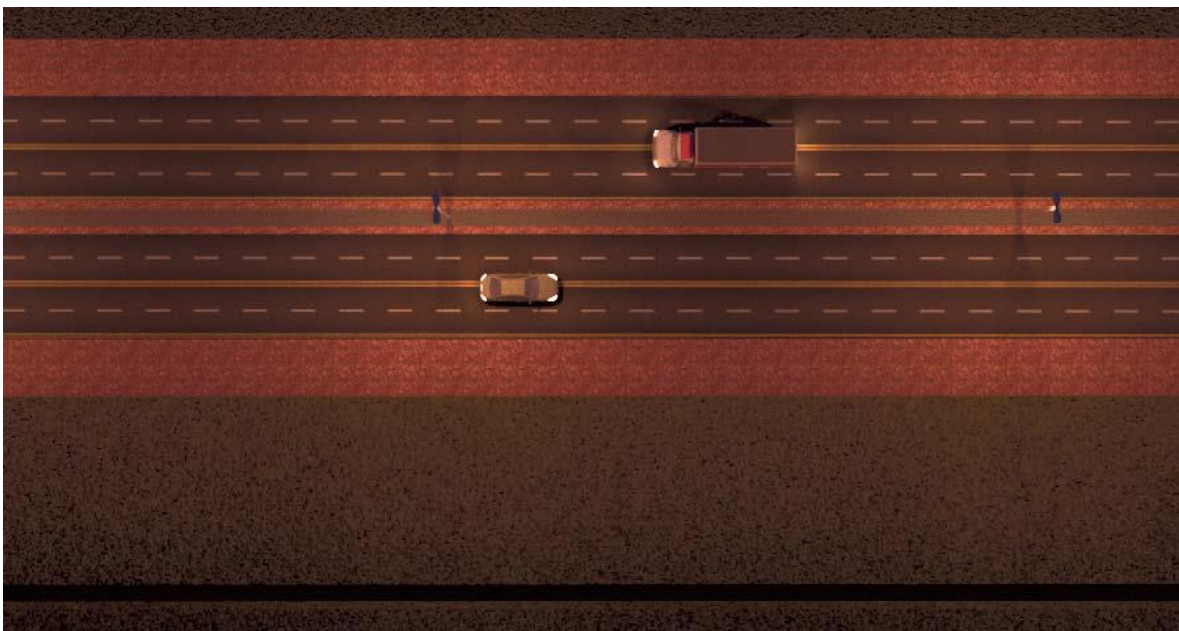


Figura 2.31 Vista en planta de la carretera tipo A4 con sistemas de iluminación. (Fuente Manual de iluminación vial SCyT).

Cuando el camellón tiene un ancho igual o mayor a 2 m y se encuentra libre de otras instalaciones, se colocara el sistema de iluminación al centro del mismo.

Colocación de postes frente a frente, cuando el ancho de la carretera es mayor a 1.3 veces la altura de montaje de las luminarias, o cuando el camellón de la misma es muy angosto.

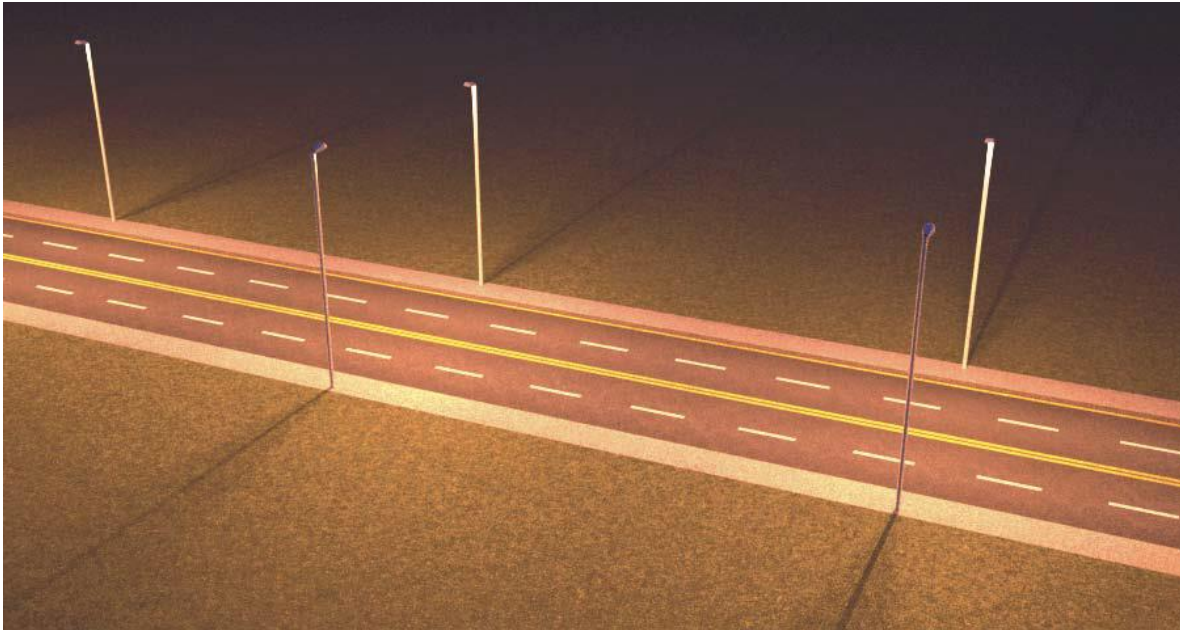


Figura 2.32 Perspectiva donde los postes están colocados fuera del acotamiento (Fuente Manual de iluminación vial SCyT).

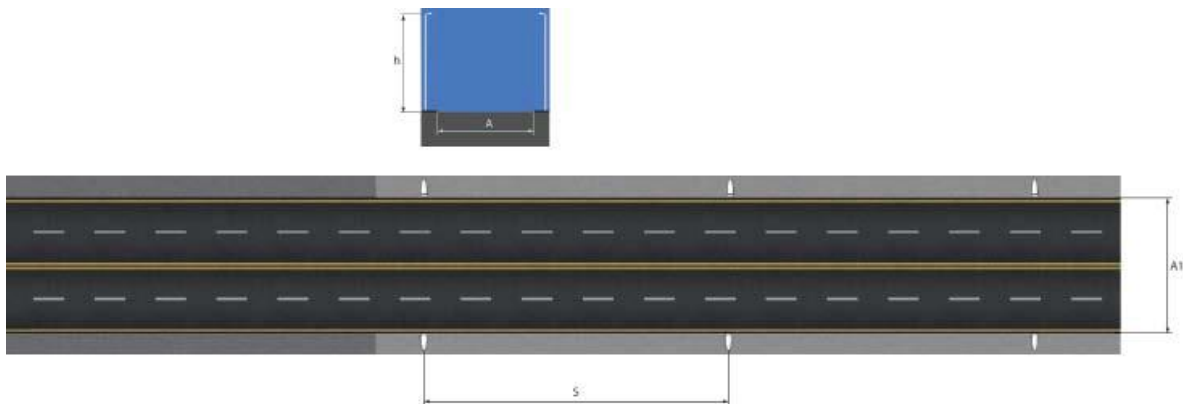


Figura 2.33 Vista de planta (Fuente Manual de iluminación vial SCyT)

h = Altura de poste

A = Ancho de calzada

S = Distancia interpostal

$A1$ = Ancho de carretera

Disposición	Relación h/A	
	Valor mínimo	Valor máximo
Unilateral	0.85	1
Tresbolillo	0.5	0.66
Frente a frente	0.33	0.5
axial	0.85	1

Tabla 2.15 Tipo de distribución de puntos de cruz en función de la relación (h/A). (Fuente: CIE).

2.10.2 El tipo A2

Carretera tipo A2 un cuerpo

Los postes de alumbrado serán colocados fuera del acotamiento como se muestra en las Figuras 2.34 y 2.35

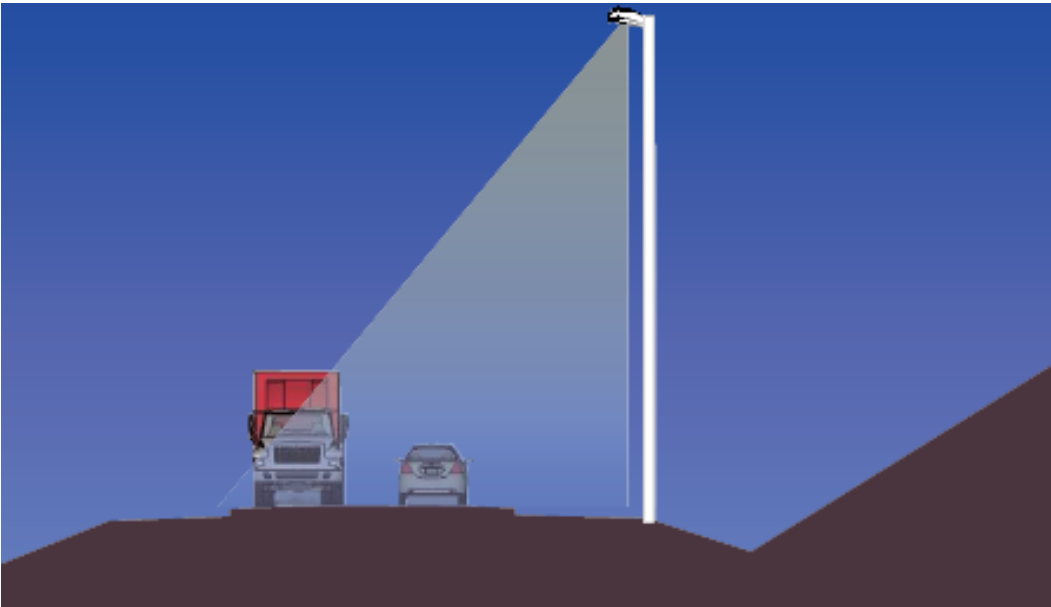


Figura 2.34 Vista en corte transversal de la carretera tipo A2 (Fuente Manual de iluminación vial SCyT).



Figura 2.35 Vista en planta de la carretera tipo A2 con sistemas de iluminación (Fuente Manual de iluminación vial SCyT).

Colocación de postes en “tresbolillo”, esta disposición de postes de alumbrado resulta costosa por la doble instalación que presenta el sistema en carreteras.



Figura 2.36 Perspectiva de instalación denominada "Tresbolillo" (Fuente Manual de iluminación vial SCyT).

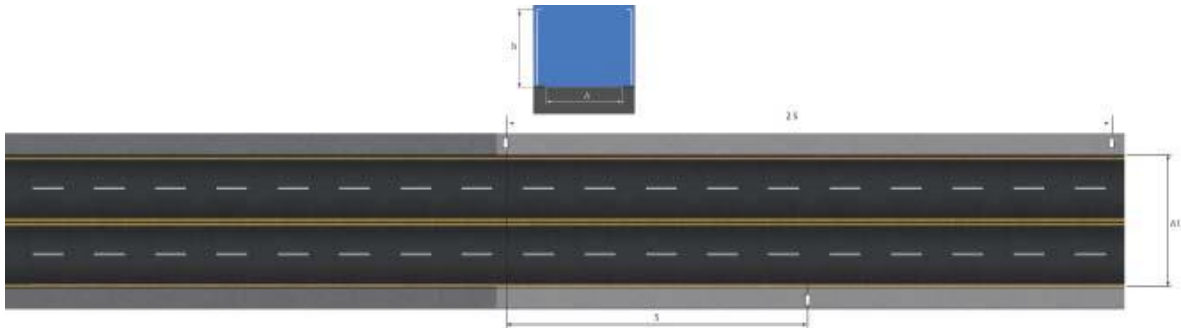


Figura 2.37 Vista de planta (Fuente Manual de iluminación vial SCyT).

h = Altura de poste

A = Ancho de calzada

S = Distancia interpostal

$A1$ = Ancho de carretera

25 = Distancia Interpostal a tresbolillo

Disposición	Relación h/A	
	Valor mínimo	Valor máximo
Unilateral	0.85	1
Tresbolillo	0.5	0.66
Frente a frente	0.33	0.5
axial	0.85	1

Tabla 2.16 Tipo de distribución de puntos de cruz en función de la relación (h/A) (Fuente: CIE).

Instalación en la que se debe presentar la uniformidad de luminancias como se muestra en la perspectiva.

2.11 Método de los 21 puntos

Las obras de alumbrado público, deberán pasar la prueba denominada “método de los 21 puntos” para ser aceptada por la Secretaría de Comunicaciones y Transportes así como las autoridades competentes.

Antes de iniciar la obra de alumbrado, se acondicionara un tramo de carretera, vía rápida o calle, según sea el caso, para colocar tres postes con sus respectivas luminarias a las distancias interpostales y alturas de montaje de proyecto y verificar que se cumpla con los coeficientes de uniformidad de iluminación requeridos para obtener la máxima calidad, seguridad y eficiencia.

INSTRUCTIVO PARA REALIZAR MEDICIONES DE NIVELES DE Iluminancia APLICANDO EL MÉTODO DE LOS 21 PUNTOS ADAPTÁNDOSE A LA GEOMETRÍA DE LA INSTALACIÓN DE ACUERDO CON EL TERRENO.

Datos:

Altura de Montaje -----

Distancia Interpostal -----

Ancho de Camellón -----

Ancho de Carriles de Circulación -----

RESULTADOS MÍNIMOS REQUERIDOS PARA VERIFICAR Y APROBAR LA CALIDAD Y EFICIENCIA DE LOS EQUIPOS POR INSTALAR.

$$E_{prom} = \frac{E1 + E2 + E3 + \dots + E21}{21} = [lux]$$

$$\text{coeficiente de uniformidad general} = \frac{E_{min}}{E_{prom}} \leq 0.50 \text{ min}$$

$$\text{coeficiente de uniformidad longitudinal en los tres ejes} = \frac{E_{min}}{E_{max}} \leq 0.50 \text{ min}$$

$$\text{coeficiente de uniformidad transversal} = \frac{E_{min}}{E_{max}} \leq 0.40 \text{ min}$$



Figura 2.38 Trazado en la carretera de los 21 puntos requeridos para efectuar las Mediciones (Fuente: Tecnología del alumbrado público en las vialidades principales del Estado de México. Ing. A. Horacio López Díaz).

CAPÍTULO 3 ILUMINACIÓN VIAL CON TECNOLOGÍA LED

3.1 Calidad, seguridad y eficiencia en el alumbrado vial

La tecnología LED avanza rápidamente y ofrece un gran potencial de ahorro de energía. El aumento de la eficacia y la mejora del diseño de luminarias y control de la iluminación permiten mejorar la optimización de diferentes condiciones de iluminación, incluyendo vías de tráfico. Si bien la implementación de iluminación LED para espacios exteriores está empezando a hacerse realidad en el mercado, su uso en las calles de las ciudades europeas no se ha extendido. Existe un gran potencial para mejorar la implementación de la tecnología LED, así como para mejorar las políticas locales y nacionales relacionadas con su aplicación.

La tecnología LED puede ser una buena alternativa a los sistemas actuales de iluminación vial, si cumplen con los criterios sobre calidad del sonido, eficiencia y seguridad. Los siguientes capítulos proporcionan una visión general de los criterios esenciales y explican aspectos específicos de la tecnología LED.

3.1.1 Criterios de calidad

Los criterios de calidad describen, entre otros, aspectos esenciales como la luminancia, el color de la luz, la reproducción del color, la distribución de la luz, el parpadeo o el deslumbramiento, entre otros.

3.1.1.1 Luminancia

Para cuantificar la cantidad de luz proporcionada por un sistema de iluminación se utilizan diferentes métricas:

El flujo luminoso (medido en lumen, o lm) es la cantidad total de radiación emitida por una fuente de luz visible para el ojo humano. Como la sensibilidad del ojo humano varía para diferentes longitudes de onda (es mayor para la luz verde que para la roja o azul), el flujo luminoso se ajusta en relación a dichos parámetros.

La intensidad luminosa (medida en candela, o cd $1\text{cd}=1\text{lm/sterorradián}$) representa la distribución espacial de la luz calculada como flujo luminoso en un ángulo determinado de una fuente de luz. Para el alumbrado público, la distribución espacial debe garantizar que la carretera, el mobiliario urbano y los usuarios de la vía estén adecuadamente iluminados, mientras que cualquier iluminación ascendente suele ser indeseable.

La iluminancia (medida en lux, o lx; siendo $1\text{lux}=1\text{lm/m}^2$) representa la cantidad total de luz que llega a una determinada superficie. Los criterios mínimos se establecen para diferentes clases de carreteras, excepto para autopistas. Los requisitos mínimos de iluminancia más frecuentes para carreteras con un tráfico complejo (por ejemplo, con distancias de visibilidad inferior a 60 m, o con espacio para ciclistas o peatones) tienen un

rango de 7,5 a 50 lx . Las recomendaciones para los requisitos de iluminancia y luminancia estándar se especifican en la EN 13201.

La luminancia, calculada en cd/m^2 , representa el brillo de las superficies u objetos iluminados tal como los percibe el ojo humano. La luminancia mínima para las vías de tráfico de velocidad media a alta se mueve entre 0,3 y 2 cd/m^2 . [EN 13201-2] Por ello, normalmente se encuentra dentro del llamado «rango mesópico» (entre 0,001 y 3 cd/m^2) que combina la visión a altos niveles de luz (fotópica) y a bajos niveles (escotópica). En este rango, el tiempo de reacción a los nuevos estímulos está determinado por los contrastes de iluminación y color, por lo que tanto la luminancia del área iluminada como la representación del color de la fuente de luz son importantes para la percepción humana y para la seguridad del tráfico. Los requisitos mínimos de luminancia se especifican para carreteras de velocidad media a alta.



Figura 3.1 diferentes definiciones de cantidad de luz (Fuente Iluminación LED exterior en el sector de servicios públicos y privados).

3.1.1.2 Deslumbramiento

El deslumbramiento es un efecto visual desagradable causado por una distribución desfavorable de la luminosidad o por altos contrastes, que fuerza a la vista a ajustarse rápidamente [véase también la EN 12665-1].

Normalmente, se distinguen dos tipos de efectos de deslumbramiento:

(1) discapacidad por deslumbramiento, causada por una dispersión de luz en el ojo que reduce la sensibilidad al contraste

(2) incomodidad por deslumbramiento, que provoca una sensación subjetiva de incomodidad. Si bien la susceptibilidad al deslumbramiento puede variar entre diferentes individuos (los efectos se acentuarán con la edad), se puede calcular de forma objetiva. En

un ambiente muy iluminado, el ojo humano puede detectar diferencias en la luminancia hasta un cierto umbral. Si se compara este umbral con el del mismo entorno tras agregar una fuente de deslumbramiento, obtenemos el incremento del umbral.

La incomodidad por deslumbramiento, por otro lado, es un fenómeno subjetivo y no hay consenso sobre cómo debería calificarse, aunque la escala más utilizada en el campo de la iluminación pública automotriz es la escala de DeBoer, de 9 puntos, en la que 1 corresponde a "insoportable" y 9 a "imperceptible". La discapacidad por deslumbramiento reduce la capacidad de percibir pequeños contrastes, y puede afectar a los conductores a la hora de identificar objetos cruciales, controlar las luces o evaluar situaciones que pueden ser críticas, entre otras. Por lo tanto, el deslumbramiento es también un peligro para el resto de usuarios de la vía. El deslumbramiento provocado por las luces de carretera LED está influenciado por los siguientes factores:

- La relación entre la iluminancia en el punto de deslumbramiento donde se encuentra el observador y la luminancia de fondo.
- El ángulo entre la fuente de deslumbramiento y el campo visual del observador.

Las fuentes de luz LED pueden proporcionar niveles de luminancia muy altos que pueden causar deslumbramiento. Por esta razón, las lámparas LED suelen estar equipadas con difusores que reducen la luminancia. Los sistemas de alumbrado público deben diseñarse de manera que se eviten niveles de luminancia muy diferentes en la fuente de luz y en las áreas iluminadas. Además, una variación constante de los niveles de iluminación puede causar fatiga visual y se debe evitar sobre todo en trayectos prolongados. Unos niveles de luminancia más altos facilitan que la vista se adapte a los faros de otros vehículos. Para mayor discusión sobre el diseño de los sistemas de alumbrado vial.

Existen diferentes tipos de incomodidad y discapacidad por deslumbramiento que nos permiten clasificar las diferentes categorías de pantallas para lámparas. Las pantallas utilizadas para la discapacidad por deslumbramiento corresponden a los niveles G1-G6 y se describen con mayor detalle en la EN 13201-2 (consulte la Tabla 3.1). Los tipos de pantallas para la incomodidad por deslumbramiento se especifican como D1-D6 (consulte la Tabla 3.2).

Tipo de pantalla	Intensidad luminosa máxima en cd/klm			Pantallas
	a 70 °	a 80 °	a 90 °	
G1		200	50	Opcional
G2		150	30	Opcional
G3		100	20	Opcional
G4	500	100	10	Ninguna a más de 95°
G5	350	100	10	Ninguna a más de 95°
G6	350	100	0	Ninguna a más de 95°

Tabla 3.1 Tipos de discapacidad por deslumbramiento (EN 13201-2 y Vejregler2015).

Tipo de deslumbramiento	
D0	No se especifica
D1	7000
D2	5500
D3	4000
D4	2000
D5	1000
D6	500

Tabla 3.2 Clasificación de incomodidad por deslumbramiento (VEJ 2015).

3.1.1.3 Color, temperatura y cromaticidad de color

Las fuentes de luz a menudo emiten una amplia gama de longitudes de onda, aunque, por lo general, se percibe un solo color. Este color aparente se conoce como la «temperatura de color» de la fuente de luz. La temperatura de color corresponde a un color de referencia de un lugar planckiano conceptual que se calienta a una temperatura específica (calculada en kelvin). El sol, por ejemplo, tiene una temperatura de color de 5780 K cuando se observa al mediodía y se aproxima mucho a un radiador del lugar planckiano.

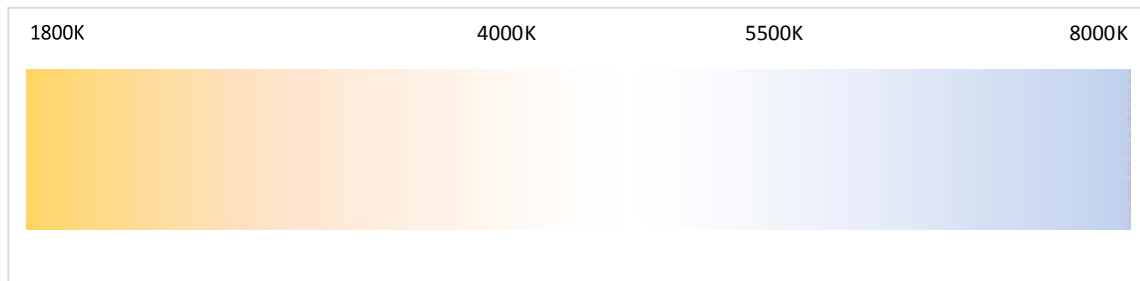


Figura 3.2 temperatura de color (Fuente Iluminación LED exterior en el sector de servicios públicos y privados).

El color de luz utilizado para el alumbrado público suele oscilar entre el ámbar, el neutro y el blanco azulado, que corresponden a temperaturas de color entre 1900 y 5000 Kelvin. Se ha demostrado que en diferentes regiones europeas se tienen preferencias diferentes con respecto a los colores, tanto para la iluminación interior como para la exterior. Por ejemplo, a nivel municipal español, los técnicos municipales prefieren iluminar las zonas exteriores con luz cálida, ya que la fría se considera desapacible.

La iluminación LED, a diferencia de varias tecnologías de iluminación antiguas, permite ajustar o seleccionar la temperatura de color de forma flexible para diversas aplicaciones. Sin embargo, se debe considerar que la temperatura de color de la fuente de luz tiene un efecto sobre la eficiencia energética del sistema de iluminación y puede causar efectos fisiológicos para los seres humanos y los animales. La luz blanca fría con una temperatura de color alta facilita una mayor eficiencia energética del sistema de iluminación. Por otro lado, un elevado nivel de luz azul en las fuentes de luz blanca fría también puede causar efectos fisiológicos a tener en cuenta, tanto en seres humanos como en animales, y contaminación lumínica por la noche. Se ha demostrado que la luz blanca favorece la percepción del ojo humano de manera más efectiva que la luz ámbar, pues se percibe una mayor intensidad. Por esa razón, se prefiere luz blanca (por ejemplo, de 4000 K) en carreteras complicadas con diferentes tipos de usuarios (automóviles, ciclistas, peatones, etc.). En contraposición, se suelen preferir temperaturas de color más bajo (luz blanca cálida) en las áreas domésticas.

En general, la selección de la temperatura de color es un aspecto importante en el diseño de la iluminación vial. La iluminación LED puede cubrir todo el espectro de temperaturas de color y, por lo tanto, permite una selección muy detallada de la temperatura de color y del color de la luz para diferentes necesidades y funciones. Además de la temperatura de color, la cromaticidad (determinadas coordenadas de un color de luz en el espectro cromático) permite indicar la uniformidad del color de un tipo de lámpara. Estas coordenadas de color también son útiles para describir el cambio del color de la luz a lo largo del tiempo. Las diferencias del color de la luz en un lote de lámparas o durante un cierto periodo de tiempo se miden con las llamadas elipses de MacAdams, cuyo tamaño indica la consistencia del color de una lámpara o tipo de luminaria específico. Los requisitos para la consistencia cromática de un lote de lámparas y su cambio con el paso del tiempo deberían especificarse para la compra. Los requisitos mínimos para los productos vendidos en el mercado de la UE se indican en la correspondiente normativa europea. Actualmente, el requisito mínimo establecido por la legislación de diseño ecológico es una elipse MacAdams de cinco pasos.

3.1.1.4 Reproducción cromática

Las fuentes de luz con la misma temperatura de color pueden reproducir de distinta manera los colores de objetos y áreas iluminados, ya que la reproducción de color no depende de la temperatura de color de una fuente de luz, sino de las longitudes de onda espectrales emitidas por una fuente. Las fuentes de luz que proporcionan un espectro completo de longitudes de onda reproducen cualquier color de los objetos iluminados de manera muy natural, pero las fuentes de luz que sólo emiten unos colores predeterminados sólo favorecen la reproducción de dichos colores en concreto.

Un ejemplo práctico es el reconocimiento facial para los peatones, para el que es también necesario poder percibir los contrastes de color. Se ha demostrado que deben poder reconocer rostros a 4m de distancia para sentir mayor seguridad (consulte las clases de iluminación P, por lo que es especialmente importante en zonas con problemas de seguridad ciudadana. [LRT])

La capacidad de reproducción de color de las fuentes de luz se mide en condiciones de laboratorio mediante ocho colores estándar. La reproducción del color se indica mediante el índice de reproducción cromática (IRC, con valor máximo de 100). Los sistemas de iluminación con una reproducción de color de 80 o superior favorecen un buen reconocimiento facial. [LRT] Con respecto a la iluminación LED, también es relevante la reproducción específica para la luz roja. Este valor, conocido como R9, no suele incluirse en el IRC clásico tradicional, sino en el índice ampliado a 14 colores estándar. Para la iluminación LED se debe considerar el IRC estándar y el valor R9 en conjunto. La Tabla 3 muestra los niveles de reproducción cromática típicos de diferentes tecnologías utilizadas en el alumbrado vial. En cuanto a las luminarias LED, suelen ofrecer un valor superior a 80. Una reproducción de color de 70Ra suele ser suficiente en calles con un patrón simple de iluminación, aunque para usos más complejos y situaciones donde se requiera una buena iluminación, puede ser preferible un Ra superior a 80.

Tanto el color de la luz (temperatura del color) como la reproducción cromática de una fuente de luz son relevantes para la visibilidad y percepción de los objetos de nuestro entorno.

Tipo de lámpara	IRC
Mercurio	40 – 60
Halogenuros metálicos	70 – 95
Vapor de sodio a baja presión (SBP)	monocromático
Vapor de sodio a alta presión (SAP)	20
LED	+80

Tabla 3.3 Índice de reproducción cromática para sistemas de alumbrado vial [BG] (Fuente Iluminación LED exterior en el sector de servicios públicos y privados).

3.1.1.5 Mantenimiento del color

El mantenimiento del color es un tema especialmente importante en la iluminación LED, ya que al envejecer los módulos LED pueden cambiar su temperatura y coordenadas del color. Los problemas relacionados con el mantenimiento del color pueden deberse a la degradación del material utilizado para encapsular las luces LED, las lentes de los LED, la contaminación u otros tipos de degradación del sistema. En la actualidad se estudian otras causas, como las temperaturas de funcionamiento elevadas, las corrientes de funcionamiento todavía más altas y la decoloración de los materiales ópticos debido a la radiación azul o ultravioleta.

Hasta el momento, solo algunos fabricantes de paquetes LED ofrecen garantías para el mantenimiento del color, y no existen procedimientos estándar para predecirla [ENG].

La desviación del color con el paso del tiempo puede especificarse y evaluarse mediante las coordenadas de color y las elipses MacAdam.

3.1.1.6 Contaminación lumínica

La iluminación artificial puede tener efectos perjudiciales en personas y animales, incluyendo la indeseada difusión de la luz en exteriores y la contaminación lumínica, que repercute de manera adversa en la salud humana, el ecosistema y la visión del cielo nocturno. Para los humanos, las consecuencias van desde la iluminación del cielo nocturno en ciudades y alrededores hasta las interrupciones del ciclo del sueño mediante la iluminación exterior en áreas residenciales. Los animales, por otro lado, usan fuentes de luz natural como ayuda para la navegación y, por lo tanto, pueden confundirse o asustarse con la iluminación artificial. En general, los seres vivos que tiene una actividad nocturna necesitan condiciones de total oscuridad para poder desarrollarla con garantías y competir de manera natural con otras especies. Muchos animales perciben unos rangos de longitudes de onda diferentes a los del ojo humano.

Las fuentes de luz LED pueden atraer menos insectos que otras fuentes de iluminación utilizadas en el alumbrado vial. Los LED «blancos cálidos», con una temperatura de color inferior o igual a 3000K, atraen considerablemente menos insectos que los «blancos fríos», de una temperatura de color de 6000K). Aun así, la temperatura de color más conservadora desde un punto de vista medioambiental es la conocida como PC-Ámbar, que tiene una temperatura de color de 1900K y una tonalidad anaranjada en la luz. [SdN]

Se puede reducir la contaminación lumínica dirigiendo la luz de las luminarias sólo hacia las áreas que se busca iluminar. Las fuentes de luz LED direccionales son especialmente adecuadas para lograr una distribución optimizada de la luz. Las emisiones de luz por encima de la fuente de luz suelen no ser deseables.

La relación entre la luz emitida hacia arriba desde una luminaria con respecto al flujo total saliente se conoce como flujo hemisférico superior (FHS):

$$FHS = \frac{\text{luz emitida hacia arriba desde la luminaria}}{\text{flujo total saliente de la luminaria}}$$

Dependiendo de la distribución de luz vertical, las luminarias se dividen en cuatro tipos básicos [IIEC]:

- Luminarias cut-off completas: emiten un máximo del 10% del lumen total de la lámpara en un ángulo de 80° por encima del nadir, y 0% en un ángulo de 90° por encima del nadir.
- Luminarias cut-off : emiten un máximo del 10% del lumen total de la lámpara en un ángulo de 80° por encima del nadir y del 2,5% en ángulo de 90° por encima del nadir.
- Luminarias semi-cut-off: emiten un máximo del 20% del lumen total de la lámpara perceptible en un ángulo de 80° por encima del nadir, y del 5% en un ángulo de 90° por encima del nadir.
- Luminarias non-cut-off : emiten luz en todas las direcciones. Esta definición tradicional de cut-off incluye seis clases diferentes de intensidad luminosa en la norma EN 13201- 2, con valores máximos para un ángulo de 70° y superior.

Consulte la sección 2.2.2 para obtener más información sobre la EN 13201-2.

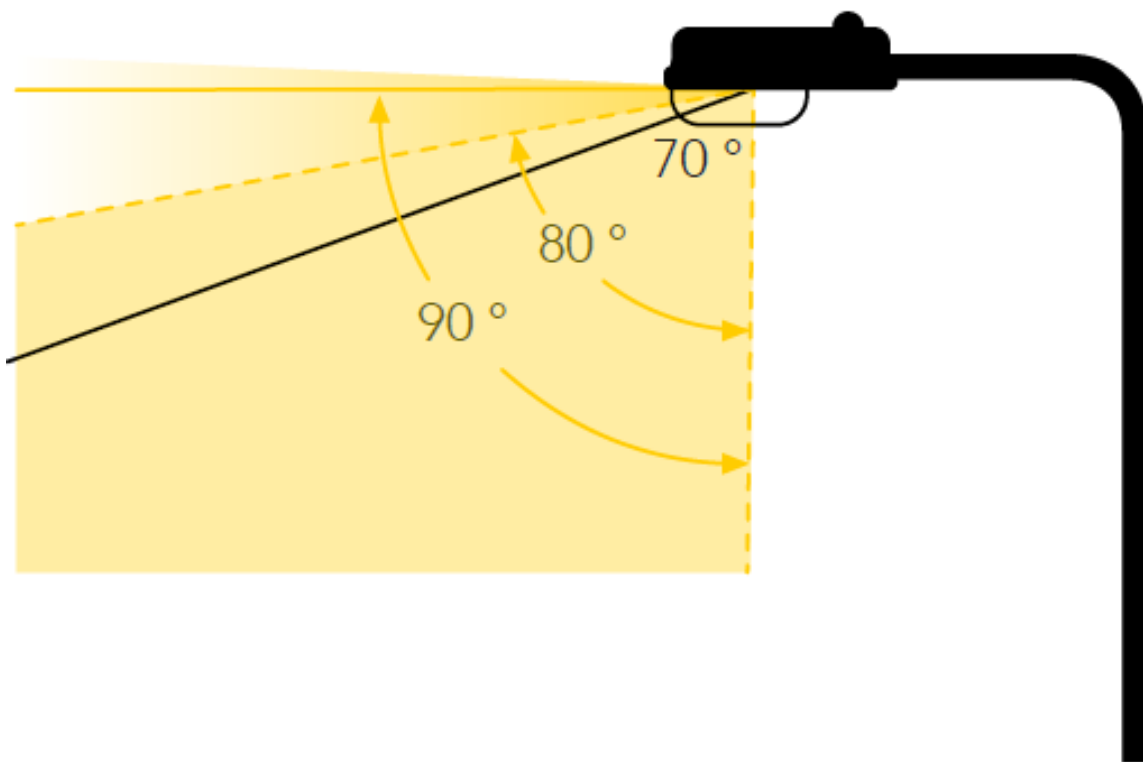


Figura 3.3 Definición de los parámetros cut-off (Fuente Iluminación LED exterior en el sector de servicios públicos y privados).

Otras opciones para reducir la contaminación lumínica:

- Reducir la iluminancia: Esta medida debe sopesarse en función de los requisitos de seguridad para los usuarios de las carreteras. El control de iluminación inteligente puede ajustar la iluminancia a los niveles apropiados para periodos de tiempo y situaciones específico [JAE]. Sin embargo, apagar o reducir la iluminación más tarde en la noche (por ejemplo, entre la medianoche y las 5:30 a.m.) es poco probable que proporcione muchos beneficios para la fauna local, ya que las especies nocturnas están activas en las primeras horas de la noche, cuando los sistemas de alumbrado todavía funcionan al máximo nivel [BAT].
- Cambiar el espectro: La sensibilidad frente a diferentes colores claros varía de una especie a otra. En general, las tecnologías de iluminación que emiten un espectro reducido de luz blanca cálida, como las lámparas de vapor de sodio a baja presión (SBP), tienen un impacto ecológico menor. Con la tecnología LED, la temperatura del color puede adaptarse a las necesidades, aunque siempre debe cumplir con los requisitos de calidad y seguridad.

La tecnología LED se puede usar para crear un nivel de iluminación más uniforme. Tanto las lámparas de descarga de alta intensidad (HID) como las lámparas vapor de sodio a alta presión (SAP) o de halogenuros metálicos (MH) tienen su nivel máximo de iluminación directamente debajo de la luminaria, aunque dejan espacios oscuros entre las luminarias.

3.1.2 Criterios de seguridad

Las luminarias para alumbrado vial deben protegerse contra partículas externas, sólidas o líquidas, impactos mecánicos y fluctuaciones de voltaje para garantizar su continuo funcionamiento de forma adecuada. Para ello, se suelen indicar los requisitos de protección contra el ingreso, impactos y protección de voltaje.

3.1.2.1 Grado de protección IP

La resistencia de las luminarias contra materiales externos se indica mediante el llamado código de protección contra entrada (IP), un número de dos dígitos definido en la norma IEC 60529. El primer dígito representa la resistencia contra materiales sólidos, mientras que el segundo califica la resistencia frente a los líquidos.

Para iluminación vial, se recomienda emplear luminarias IP65 para garantizar una adecuada resistencia al polvo y las inclemencias del tiempo. [IEA]

Código	Primer dígito	Segundo dígito
--------	---------------	----------------

IP		
0	Ninguna protección	Ninguna protección
1	Protegido contra cuerpos sólidos de más de 50 mm	Protegido contra el goteo de agua / condensación
2	Protegido contra cuerpos sólidos de más de 12 mm	Protegido contra el agua de lluvia hasta 15 ° desde la vertical
3	Protegido contra cuerpos sólidos de más de 2.5 mm	Protegido contra el agua de lluvia hasta 60 ° desde la vertical
4	Protegido contra cuerpos sólidos de más de 1 mm	Protegido contra las salpicaduras de agua en todas las direcciones
5	Protegido contra el polvo (sin depósitos nocivos)	Protegido contra chorros de agua desde todas las direcciones
6	Totalmente protegido contra el polvo	Protegido contra chorros de agua tipo ondas desde todas las direcciones
7		Protegido contra la inmersión
8		Protegido contra los efectos de la inmersión prolongada bajo el agua

Tabla 3.4 Clasificación del grado de protección contra entrada (IP). [IIEC, 2015].

3.1.2.2 Impacto mecánico

La resistencia de las luminarias a los impactos mecánicos se indica mediante su código de impacto mecánico (IK), un número definido por en las normas IEC 62262:

Clasificación IK	Fuerza del impacto (en julios)
00	–
01	0.15
02	0.2
03	0.35
04	0.5
05	0.7
06	1
07	2
08	5
09	1
10	20

Tabla 3.5 Clasificación del impacto mecánico (IK) (Fuente Iluminación LED exterior en el sector de servicios públicos y privados).

Las luminarias exteriores pueden recibir golpes de ramas de árboles sueltas u otros objetos a causa de fuertes vientos, e incluso pueden sufrir vandalismo. Por ello, se recomienda un mínimo de IK08.

3.1.2.3 Protección del voltaje

Las sobretensiones transitorias (aumentos de tensión por encima del voltaje de diseño estándar que pueden durar desde microsegundos hasta unos pocos milisegundos) pueden dañar los módulos LED y el engranaje de control. Su resistencia frente a tales fluctuaciones se mide mediante la clasificación de protección contra sobretensiones. Si bien es cierto que la EN 61547 regula los criterios mínimos de protección contra sobretensiones para iluminación LED, también es verdad que sus especificaciones para la fase de 0,5kV de cable neutro son demasiado simples, insuficientes para situaciones más serias como el impacto de rayos. Por este motivo, muchos proyectos de alumbrado vial exigen una protección contra las sobretensiones de hasta 10kV. [ZVEI2]

3.1.3 Criterios de eficiencia

En comparación con la mayoría de las otras tecnologías, los LED alcanzan niveles de eficiencia energética (lumen por watt de potencia) muy altos.

Tipo de lámpara	Eficiencia energética (lm/ W)
Mercurio	60
Halogenuros metálicos	120
Vapor de sodio a baja presión (SBP)	200
Vapor de sodio a alta presión (SAP)	150
LED	150

Tabla 3.6 Valores típicos de eficacia energética según el tipo de lámpara exterior [BG] (Fuente Iluminación LED exterior en el sector de servicios públicos y privados).

La eficiencia total de los sistemas LED no depende solamente de la eficacia del módulo LED, sino también de la luminaria, el sistema de control de iluminación y el diseño general del sistema de iluminación. Por esta razón, es importante distinguir la eficacia a nivel de módulo LED, luminaria y el conjunto del sistema.

La eficiencia del conjunto del sistema está influenciada, entre otros, por la distribución espacial de la luz (intensidad luminosa) y la disposición geométrica de la carretera y el sistema de iluminación. Para evaluar la eficiencia energética a nivel de sistema de carreteras,

se estableció el indicador de densidad de potencia (PDI, del inglés Power Density Indicator) como medida.

Mientras que el indicador de densidad de potencia proporciona información útil sobre la eficiencia energética para un determinado estado de iluminación en un sistema de alumbrado vial, los niveles de iluminación pueden cambiar durante la noche y el año dependiendo de los sistemas de control de iluminación implementados.

La eficiencia energética total y el consumo de energía a lo largo de un año, por lo tanto, se expresan mejor mediante el indicador de consumo anual de energía (AECI, del inglés Annual Energy Consumption Indicator).

3.1.4 Vida útil

Para medir la vida útil de los módulos LED, el estándar IEC 62722-2-1 define las siguientes métricas:

La vida nominal media L_x indica el periodo de tiempo a partir del cual el módulo LED promedio proporciona menos del x por ciento de su salida de luz inicial. Por ejemplo,

$L_{80} 50\ 000$ h significa que la salida de lumen del módulo se reduce en un 20% después de 50 000 horas de funcionamiento.

La vida nominal $L_x B_y$ indica el porcentaje (y) de los módulos LED con x salida de lumen después del periodo especificado. Según este indicador, $L_{80} B_{10} 50\ 000$ h significará que:

- Después de 50 000 horas de funcionamiento, el 10% de los LED tendrá un flujo luminoso igual o menor al 80% del original.

El tiempo de falla abrupta C_z señala el tiempo a partir del cual el z por ciento de los LED ha fallado. Según este indicador, $C_{10} 50\ 000\ t = 35^\circ\text{C}$ significará que:

- Después de un periodo de 50 000 horas y una temperatura ambiente de 35°C , el 10% de las luminarias LED instaladas con los mismos módulos LED han experimentado una falla total.

Debido a la larga vida útil de la luminaria LED y sus ciclos de desarrollo cortos en comparación, debe tenerse en cuenta que los tiempos de vida nominales y los valores de falla son estimaciones estadísticas. La vida útil concreta de una luminaria puede depender de varios factores, pues la falla total y la degradación del flujo luminoso también dependen de los datos de funcionamiento eléctrico y térmico, la temperatura ambiente y otros parámetros. El proyectista debe obtener todos los datos relevantes de los fabricantes para seleccionar una luminaria adecuada para la función prevista y crear planes de mantenimiento adecuados basados en esta información [ZVEI, 2015]. Los LED tienen una vida útil de 100 000 horas o más, aunque la vida útil del dispositivo de control de la luminaria también debe tenerse en cuenta. Esta suele expresarse como una probabilidad porcentual de falla en un periodo de tiempo, como una tasa de fallo del 0,2% cada 1000 horas.

3.1.5 Protección del cielo nocturno

En el diseño y gestión del alumbrado exterior se deben contemplar los siguientes criterios ambientales: iluminar sólo donde y cuando sea necesario, con la dirección, los niveles y el color de luz adecuados al uso de la zona.

Entre estos preceptos, uno de los que recientemente ha cobrado mayor protagonismo es el color, debido a la proliferación en los últimos años de luz blanca con elevado componente azul, siendo ésta la más perjudicial para la biodiversidad y las observaciones astronómicas.

Asimismo, conforme a la práctica totalidad de los estudios publicados, la luz con elevada proporción en este color es la que mayor efecto negativo tiene sobre la salud. Por tal motivo, se recomienda el uso de fuentes de luz con reducidas emisiones en la banda azul

3.1.5.1 Índice espectral G

Con objeto de poder cuantificar este parámetro, se ha desarrollado el Índice espectral G, indicador gestado en Andalucía que caracteriza las propiedades espectrales de las fuentes de luz, posibilitando su clasificación de modo cuantitativo y preciso en función de la cantidad real de luz azul emitida respecto al visible. La inclusión de este parámetro en las especificaciones técnicas de las lámparas aportará un nuevo criterio de sostenibilidad sobre el producto que se adquiere.

La Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio de Andalucía incorporará el Índice G al nuevo Reglamento para la preservación de la oscuridad natural de la noche frente a la contaminación lumínica, a objeto de garantizar el uso de fuentes de luz con el mínimo contenido posible en el azul en horas nocturnas y en todo el territorio andaluz. Dependiendo de la zona lumínica en la que se encuentre se debe cumplir con unos valores determinados de Índice espectral G.

3.1.5.2 Descripción y cálculo del índice espectral G

El índice espectral G de es un indicador que caracteriza las propiedades espectrales de las fuentes de luz, posibilitando su clasificación de modo cuantitativo y preciso en función de la relación entre la radiancia total emitida en el azul y la radiancia total emitida a la que es sensible el ojo humano.

A efectos de su cálculo, se ha de tener en consideración que un filtro espectral F es una función de la longitud de onda λ , $F(\lambda)$, que adopta valores entre cero y la unidad y selecciona un intervalo determinado de longitudes de onda al multiplicarlo por un espectro de emisión $E(\lambda)$. De este modo, el espectro filtrado $F(\lambda) \cdot E(\lambda)$ que se obtiene queda anulado en las longitudes de onda en las que $F(\lambda)$ tenga valor nulo, resulta igual a $E(\lambda)$ donde $F(\lambda)$ valga la unidad, y adopta valores inferiores a los de $E(\lambda)$ en las longitudes de onda, si las hubiera, en las que $F(\lambda)$ presenta valores intermedios.

Los filtros espectrales utilizados para la obtención del índice G se definen como:

- L500: igual a la unidad para valores de entre 0 y 500 nm, nulo para valores de superiores.
- V: equivalente a la curva de sensibilidad fotópica de la visión humana definida por los estándares de la *Commission Internationale de l'Éclairage*, normalizada a máximo unidad.

El procedimiento de obtención, a partir de los datos espectrales medidos en los laboratorios, es el siguiente:

Dado el espectro E de una fuente de luz y los filtros espectrales L500 y V, definidos todos ellos en función de la longitud de onda λ por las funciones $E(\lambda)$, $L500(\lambda)$, $V(\lambda)$, el índice espectral G se computa como el resultado de multiplicar por el factor -2,5 el logaritmo decimal del cociente de las integrales de los espectros filtrados, siendo el numerador $E(\lambda) \cdot L500(\lambda)$ y el denominador $E(\lambda) \cdot V(\lambda)$. Las integrales se efectúan respecto de la longitud de onda en el intervalo 380-780nm.

El cálculo práctico del índice G se efectuará aplicando la siguiente fórmula, a partir del espectro de la fuente de luz $E(\lambda)$ tabulado con resolución (paso de la tabla) de 1nm, y de la función de sensibilidad fotópica de la visión humana $V(\lambda)$ normalizada a máximo unidad y tabulada con la misma resolución.

$$G = -2 \log_{10} \frac{\sum_{\lambda=360nm}^{500nm} E(\lambda)}{\sum_{\lambda=380nm}^{780nm} E(\lambda)V(\lambda)}$$

3.2 La norma europea EN 13201

El objetivo principal del alumbrado vial es garantizar la seguridad de las carreteras en las horas de poca luz natural. Un buen sistema permite que los usuarios de la vía distingan personas, obstáculos y fuentes de peligro cercanas o en la carretera. Esto les permite actuar en consecuencia, lo que significa una reducción efectiva de los accidentes graves en la oscuridad.

Los criterios de calidad para el alumbrado vial se establecen en la norma europea EN 13201 «Iluminación vial», que incluye los siguientes apartados:

- PD CEN/TR 13201-1:2014: *Guidelines on selection of lighting classes* (Directrices para la selección de clases de iluminación).
- EN 13201-2:2015: *Performance requirements* (requisitos de rendimiento).
- EN 13201-3:2015: *Calculation of performance* (Cálculo del rendimiento).
- EN 13201-4:2015: *Methods of measuring lighting performance* (métodos para medir el rendimiento de iluminación).
- EN 13201-5:2015: *Energy performance indicators* (indicadores de rendimiento energético).

3.2.1 Selección de clases de iluminación

En la PD CEN/TR 13201-1:2014 se establecen un sistema de parámetros que describe de forma detallada las situaciones de iluminación más frecuentes en el tráfico rodado. Gracias a este estándar europeo, se pueden determinar los requisitos de iluminación según las características específicas de cada carretera. Para identificar las clases de iluminación, descritas en cuanto a requisitos de iluminación cualitativa y cuantitativa, se utilizan varios parámetros de iluminación como la geometría de la zona de tráfico, el uso de la vía y los factores ambientales.

La PD CEN/TR 13201-1:2014 utiliza un procedimiento de selección para establecer las clases de iluminación de M1 a M6, de C0 a C6, y de P1 a P6, pero no ofrece directrices para seleccionar las clases HS, SC y EV, disponibles para cada país a nivel nacional.

Los criterios de selección para cada subclase, señalada con un dígito, se basan en la geometría de la carretera, el tráfico y el entorno. Los criterios efectivos, de acuerdo a la PD CEN/TR 13201-1:2014, incluyen:

- Velocidad de proyecto o velocidad de diseño
- Velocidad de desplazamiento (para la clase de iluminación P)
- Volumen de tráfico

- Composición del tráfico
- Separación de calzada
- Densidad de tráfico en una intersección
- Vehículos aparcados
- Luminosidad ambiental
- Reconocimiento facial (para la clase de iluminación P)
- Conducción

Ciertos parámetros, como el volumen del tráfico, la composición del tráfico y la luminosidad ambiental, pueden variar de una temporada a otra o entre diferentes horas de la noche. Por lo tanto, partes de la carretera pueden corresponder a una clase de carretera diferente.

[PD CEN/TR 13201-1:2014; EN 13201-2:2003; EN 13201- 2:2015]

3.2.2 Requisitos de rendimiento, métodos de medición y cálculo

La segunda parte de la EN 13201 proporciona los parámetros para las diferentes clases de iluminación, estableciendo un conjunto de requisitos fotométricos que dependen de:

(1) Las necesidades y requisitos de los usuarios de la carretera y (2) los tipos de vía en cada caso.

Las clases de iluminación simplifican el desarrollo y la aplicación de productos de alumbrado vial y su mantenimiento en los estados miembros de la UE. Para armonizar ampliamente los requisitos, las clases de iluminación se establecieron sobre la base de las normas nacionales de los Estados miembros y las normas CIE 115: 2010.

La segunda parte introduce métricas adicionales que establecen los criterios mínimos o máximos para cada subclase.

Las carreteras de clase M (autopistas) son rutas para el tráfico motorizado con una velocidad de conducción media o alta. Para cumplir los criterios de la normativa, se debe garantizar:

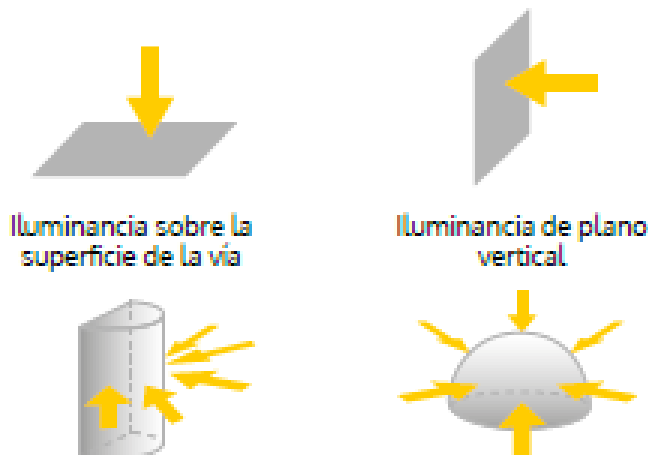
- (1) una luminancia promedio mínima en la superficie de la carretera;
- (2) una uniformidad mínima de la luminancia en la superficie de la carretera, con valores mínimos adecuados a condiciones secas y húmedas;
- (3) una uniformidad mínima de luminancia a lo largo de la parte central de las vías; (4) un máximo de deslumbramiento; que la iluminancia fuera de la calzada no disminuya con demasiada rapidez.

Las carreteras de clase C (de dos carriles o redes secundarias) representan áreas donde los vehículos motorizados suelen encontrarse otros usuarios de la carretera (peatones o ciclistas) o deben conducir por zonas de tráfico complicado, como intersecciones de carreteras complejas, rotondas, áreas de espera, etc. Aunque los sistemas de iluminación para las carreteras de la clase C necesitan cumplir con una uniformidad mínima, el resto de criterios para las carreteras de clase M no son en su mayoría aplicables o al tipo C. Por ejemplo, muchas áreas no tienen definida una franja clara donde se calcule cómo disminuye la iluminancia más allá de la calzada. En cambio, se exige que mantengan una iluminancia horizontal promedio en el área en la carretera. Las carreteras de clase C, a diferencia de las de clase M, no disponen de criterios obligatorios para minimizar el deslumbramiento. Aun así, el Anexo C de EN 13201-2 ofrece criterios de carácter informativo.

Las carreteras de clase P y HS están destinadas a peatones y ciclistas en aceras, carriles bici, carriles de emergencia, áreas separadas o a lo largo de la calzada de una carretera, así como en caminos residenciales, calles peatonales, estacionamientos, patios de recreo, etcétera.

Los criterios para esta clase incluyen: (1) una iluminancia promedio mínima y (2) una luminancia mínima constante en el área de la carretera. En caso de que el reconocimiento facial sea importante, deben cumplirse los criterios adicionales para la iluminación del plano vertical, en un punto, y la iluminación mínima semicilíndrica, en un plano sobre el área de la carretera. Como alternativa a la clase P, la clase HS basa sus criterios en la uniformidad general de la luminancia de la superficie de la carretera, así como en la luminancia hemisférica promedio.

Las carreteras de clase SC son un tipo adicional para áreas peatonales donde el reconocimiento facial y la sensación de seguridad son especialmente importantes. Exigen unos niveles mínimos de iluminancia semicilíndrica. Las carreteras de clase EV son un tipo adicional para áreas de intercambio donde las superficies verticales necesitan percibirse con claridad.



Figuran 3.4 Tipos de criterios de iluminancia (Fuente Iluminación LED exterior en el sector de servicios públicos y privados).

Clases de iluminación	Tipo de lámpara				
	Mercurio	Halogenuro metálico	Vapor de sodio de alta presión	Vapor de sodio de baja presión	LED
M1		45 / 5.0		34 – 41 / 4.0 – 5.3	25–32/3.0–3.8
M2	100 / 10.8	50 / 4.6		31 – 40 / 3.2 – 4.2	24–27/2.4–2.5
M3	84 / 6.0	47 / 3.6	40 / 2.8 – 3.1	34 – 38 / 2.5 – 2.6	23– 25 / 1.5
M4	90 / 5.0	60 / 3.1	41– 47 / 2.3 – 2.5	34 – 42 / 1.8 – 2.4	23 / 1.1
M5	86 / 3.2	30 / 0.9	47 / 1.7	38 – 45 / 1.1 – 1.6	24 / 0.8
M6	85 / 1.9	37 / 0.6		45 – 49 / 0.2 – 1.2	20–27/0.4–0.5

Tabla 3.7 Ejemplos DP (en $[W/(lx \cdot m^2)]$) / DE (medido en $[(kWh)/m^2]$) valores para una carretera de dos carriles para el tráfico motorizado. (Fuente Iluminación LED exterior en el sector de servicios públicos y privados).

El anexo informativo A de la EN 13201-2 introduce seis clases diferentes de intensidad luminosa para reducir el deslumbramiento cuando no es posible calcular la métrica normal (incremento del umbral). Las clases G*1, G*2 y G*3 corresponden a los conceptos tradicionales de «semicut-off » y «cut-off », mientras que G*4, G*5 y G *6 corresponden a «fullcut-off ».

La EN 13201-3 describe los métodos y procedimientos matemáticos que se deben utilizar para calcular las características de rendimiento de iluminación definidas en la EN 13201-2.

La EN 13201-4 describe los métodos para medir el rendimiento de la iluminación. Hay cuatro tipos básicos de situaciones en las que se deberían realizar medidas:

- En la fase de prueba final, se deben tomar medidas para verificar el cumplimiento de los requisitos estándar o las especificaciones del diseño.
- A intervalos predeterminados, durante la vida útil del alumbrado vial para cuantificar la degradación del rendimiento de la iluminación y determinar la necesidad de mantenimiento.
- Continuamente o en intervalos predeterminados, para ajustar el flujo luminoso de las luminarias si la carretera tiene luces adaptables (la luminancia o iluminación se regula según el volumen de tráfico, el tiempo, el clima u otros factores ambientales).

3.2.3 Indicadores de rendimiento energético

La EN 13201-5 describe las dos métricas de rendimiento energético:

- (1) el indicador de densidad de potencia (PDI) DP, cuya unidad es el $W/(lx \cdot m^2)$

(2) el indicador de consumo anual de energía (AECI) DE, cuya unidad es el Wh/m², ambas introducidas en el capítulo anterior. Cuando se realice el asesoramiento del rendimiento energético de un sistema de iluminación en particular, siempre se deben utilizar estos indicadores en conjunto.

El indicador de densidad de potencia establece la manera de calcular el rendimiento energético de una determinada instalación de alumbrado vial y permite comparar diferentes configuraciones y tecnologías para un mismo proyecto de alumbrado vial. Puesto que diferentes ubicaciones tienen geometría y condiciones ambientales diferentes, los valores de PDI sólo pueden utilizarse para comparar diferentes configuraciones de la misma instalación. Para calcular el indicador de densidad de potencia de cualquier área es necesario conocer:

- La potencia total del sistema (P) en el sistema de iluminación, ya sea toda la instalación o una parte representativa, que incluye la potencia operativa de todos los puntos de iluminación individuales (fuentes de luz y cualquier equipo de dispositivos asociado) y de dispositivos que no forman parte de los puntos de iluminación individuales pero que son necesarios para su funcionamiento, como los sistemas de control centralizado y los interruptores.
- La iluminación horizontal media mantenida \bar{E} (en lx) de cada subárea, así como el tamaño de cada subárea. Se excluyen las zonas de césped utilizadas para calcular la rapidez con la que la iluminancia aparece más allá de la calzada. La iluminancia se puede deducir de mediciones ya llevadas a cabo para seleccionar la clase de iluminación de la carretera.

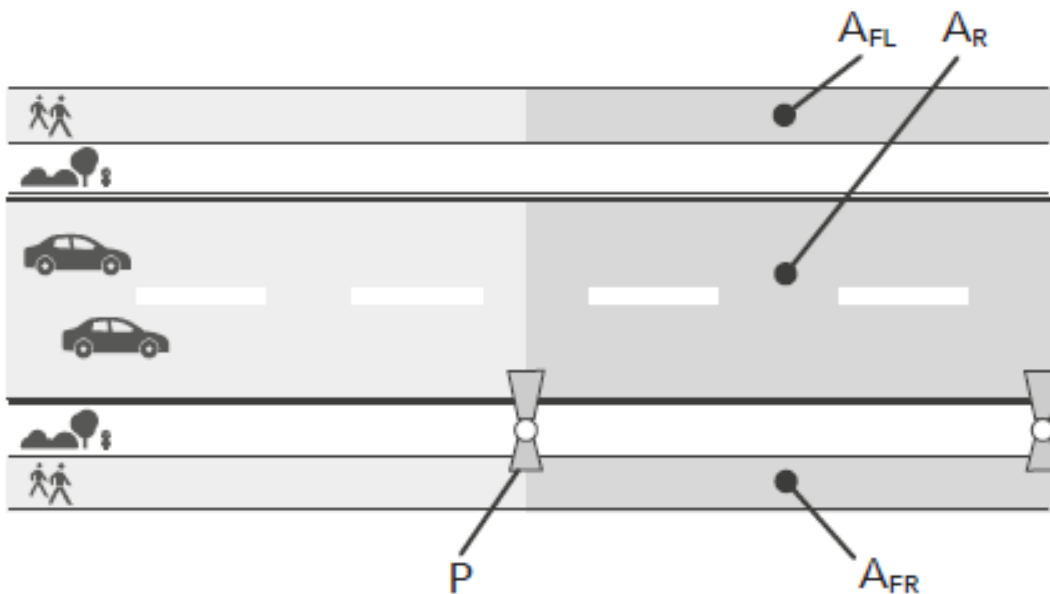


Figura 3.5 Ejemplo de un diseño para calcular el PDI o AECI. (Fuente Iluminación LED exterior en el sector de servicios públicos y privados).

La ecuación completa para calcular el PDI es:

$$D_P = \frac{P}{\sum_{i=1}^n (\bar{E}_i \times A_i \times n)}$$

En esta ecuación, \bar{E}_i es la iluminancia horizontal promedio mantenida en la subárea; A_i es el tamaño de la subárea, "i" iluminada por la iluminaria instalada (en [m²]); y n es el número de subáreas a iluminar. Para las clases de alumbrado vial que no utilizan la iluminancia horizontal promedio mantenida (es decir, todas excepto M), se puede encontrar más información en la sección 4.2 de la EN 132015 que ofrece pautas de conversión

Ya que la clase de iluminación suele cambiar con las estaciones y durante la noche, el PDI debe calcularse por separado para cada clase. Para comparar las diferencias de consumo de energía entre dos casos, durante todo un año de funcionamiento, es necesario calcular el AECI. Por esa razón hay que dividir el año en períodos operacionales a los que se aplican diferentes valores para P. La ecuación completa para calcular el AECI es:

$$D_E = \frac{\sum_{j=1}^m (P_j \times t_j)}{A}$$

Donde, P_j es la potencia total del sistema asociada con el j^{th} período de funcionamiento (en W); t_j es la duración del j^{th} perfil del período de funcionamiento cuando se consume la potencia P_j (en h); A es el tamaño del área iluminada por la misma disposición de iluminación (en m²), y m es el número de períodos con diferentes valores de potencia de funcionamiento P_j .

La duración acumulada total de las t_j debe sumar un año. Deben incluirse también en el cálculo los períodos de tiempo en los que la iluminación está inoperativa, por ejemplo durante el día, ya que incluso en estos periodos el sistema sigue consumiendo energía de reserva.

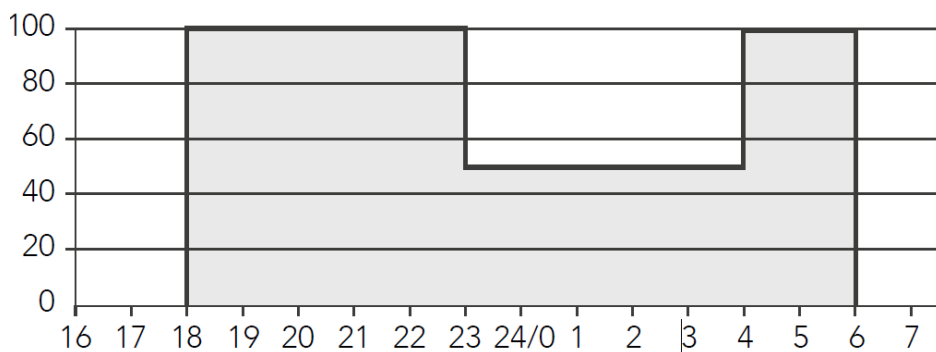


Figura 3.6 Ejemplo de salida de luz según la hora: potencia máxima durante la noche y a primeras horas de la mañana, potencia media a altas horas de la noche. (Fuente Iluminación LED exterior en el sector de servicios públicos y privados.

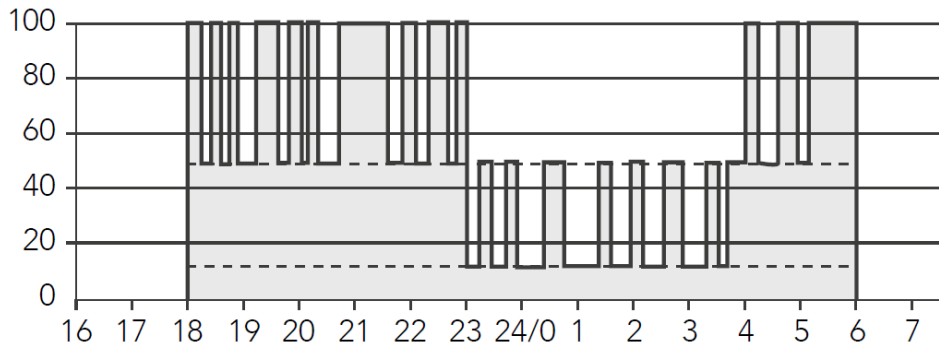


Figura 3.7 Salida de luz según la hora, con detectores de movimiento que detectan vehículos y personas: potencia máxima cuando se detecta movimiento. (Fuente Iluminación LED exterior en el sector de servicios públicos y privados).

El anexo A de la EN 13201-5 incluye una muestra de valores PDI y AECI para una amplia gama de clases de iluminación, anchuras de calzada y tipos de lámparas, basada en productos de iluminación disponibles en 2014. A continuación, se muestran algunos ejemplos de valores para una anchura de calzada de 7 m.

El anexo C de la EN 13201-5 ofrece un método simplificado para comparar sistemas de iluminación de clase M, en función de la iluminancia horizontal media mantenida \bar{E} . El anexo D presenta un esquema con información sobre el indicador de rendimiento energético.

3.2.4 Ejemplo: carreteras en áreas urbanas

La siguiente sección ilustra cómo aplicar la norma EN 13201 para diferentes situaciones de iluminación en términos de clasificación y requisitos de la carretera. El primer ejemplo es en un centro urbano que incluye un cruce peatonal y un carril para bicicletas. La calle es muy estrecha lo que causa congestiones de tráfico severas durante las horas de tráfico intenso (horas pico).

Según la PD CEN/TR 13201-1:2014, es una zona de intensa confluencia y tráfico porque hay un paso de peatones y, por lo tanto, la mejor clase de iluminación será la C, para zonas donde la situaciones de tráfico es compleja).



Figura 3.8 Ubicación céntrica (Fuente Iluminación LED exterior en el sector de servicios públicos y privados).

La Tabla 3.8 debe ser usada para determinar la clase de iluminación exacta.

- Límite de velocidad: en horas punta el tráfico es bastante lento (≤ 40 km/h), lo que da un valor de ponderación igual a -1.
- Volumen de tráfico: dado que el volumen de tráfico es alto, el valor de ponderación es 1.
- Composición del tráfico: el paso peatonal y el carril bici dan una composición de tráfico mixto. Esto comporta un valor de ponderación de 1.
- Separación de la calzada: no existe tal separación, por lo tanto, el valor de ponderación es 1.
- Vehículos estacionados: en general, no hay vehículos estacionados, por lo que el valor de ponderación es 0.
- Luminosidad ambiental: en las horas punta el área tiene una luminosidad clara y alta, por lo que el valor de ponderación es 1.
- Conducción: se considera difícil debido al paso de peatones por lo que el valor de ponderación es 1.

La suma de todos los factores de ponderación «VWS» es 4, lo que proporciona la clase de iluminación final C2 ($C = 6 - VWS$).

Según la Tabla 2 de la EN 13201-2, se producen los siguientes requisitos para las horas punta de mañana y tarde:

Parámetro	Opciones	Descripción*	Ponderación Vw*
Velocidad de diseño o límite de velocidad	Muy alta	$v \geq 100$ km/h	3
	Alta	$70 < v < 100$ km/h	2
	Moderada	$40 < v \leq 70$ km/h	0
	Baja	$v \leq 40$ km/h	-1
Volumen de tráfico	Alto		1
	Moderado		0
	Bajo		-1
Composición del tráfico	Mixto con alto porcentaje de no motorizado		2
	Mixto		1
	Solo motorizado		0
Separación de carriles	No		1
	Sí		0
Vehículos aparcados	Presentes		1
	Ausentes		0
Luminosidad ambiental	Alta	Vitrinas, vallas, campos deportivos, manifestaciones, áreas de servicio, almacenes	1
	Moderada	Situación normal	0
	Baja		2
Maniobras	Muy difíciles		2
	Difíciles		1
	Fáciles		0

Tabla 3.8 Elección de la iluminación para una ubicación céntrica (Norma EN13201-1:2014) (Fuente Iluminación LED exterior en el sector de servicios públicos y privados).

* Los valores indicados en la columna son un ejemplo. Se puede adaptar el método o utilizar valores de ponderación más adecuados a escala nacional.

- Iluminancia horizontal media mínima mantenida \bar{E} : 20 lx
- Uniformidad general mínima de la luminancia de la superficie de la carretera $U_0 = 0.4$
- El anexo informativo C de la EN 13201-2 también sugiere un incremento del umbral máximo f_m de 15% (véase 2.1.1.2, que trata el deslumbramiento y el incremento del umbral).

3.2.5 Ejemplo: carreteras en áreas rurales

El segundo ejemplo es una vía entre dos pueblos. La iluminación del camino no es obligatoria. Sin embargo, si se planifica el alumbrado vial, por ejemplo para reducir los accidentes, la clase de iluminación y los criterios mínimos deben establecerse con anterioridad.



Figura 3.9 Ubicación rural (Fuente Iluminación LED exterior en el sector de servicios públicos y privados).

Parámetro	Opciones	Descripción*		Ponderación V_w *
Velocidad de diseño o límite de velocidad	Muy alta	$v \geq 100$ km/h		2
	Alta	$70 < v < 100$ km/h		1
	Moderada	$40 < v \leq 70$ km/h		-1
	Baja	$v \leq 40$ km/h		-2
Volumen de tráfico	Alto	Autopistas, vías de múltiples carriles	Vías de dos carriles	1
	Moderado	35 – 65 % de la capacidad máxima	15 – 45 % de la capacidad máxima	0
	Bajo	< 35 % de la capacidad máxima	< 15 % de la capacidad máxima	-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 intersección		Intersección/km	Intercambios, distancia entre puentes, km	
	Alta	> 3	< 3	1
		≥ 3	≤ 3	0
Vehículos aparcados	Presentes			1
	Ausentes			0
Luminosidad ambiental	Alta	Vitrinas, vallas, campos deportivos, señales, áreas de servicio, almacenes		1
	Moderada	Situación normal		0
	Baja			-1
Maniobras de conducción	Muy difíciles			2
	Difíciles			1
	Fáciles			0

Tabla 3.9 Elección de la clase de iluminación para una área rural (Norma EN 13201) (Fuente Iluminación LED exterior en el sector de servicios públicos y privados).

Aun así, para determinar la clase de iluminación exacta, se debe usar la Tabla 1 del estándar PD CEN/TR 13201-1:2015 (Tabla 3.9).

- Límite de velocidad: la velocidad promedio de los usuarios principales de la carretera se encuentra entre 70 y 100 km/h, por lo que el valor de ponderación es 1.
- Volumen de tráfico: en este ejemplo asumiremos un volumen moderado de tráfico que conduce a un valor de ponderación de 0.
- Composición del tráfico: como hay un carril destinado a bicicletas y peatones, en la carretera sólo hay vehículos motorizados y el valor de ponderación es 0.
- Densidad en los puntos de intersección: hay menos de 3 intersecciones por km, así que la densidad es moderada y el valor de ponderación correspondiente es 0.
- Vehículos estacionados: no hay vehículos estacionados, por lo que el valor de ponderación es 0.
- Luminosidad ambiental: el brillo ambiental y, por lo tanto, también la luminosidad ambiental son bajos, por lo que el valor de ponderación será -1.
- Conducción: dado que no hay muchas intersecciones y sólo hay vehículos motorizados, la conducción son fáciles y el valor es 0.

El número final de la clase de iluminación que se utilizará se calcula con $M=6 - VWS$. Con un valor de ponderación general de 1, corresponde a la clase de iluminación M5. Según los estándares, esto requiere:

- Luminancia mínima mantenida en la superficie de la carretera L_{-} : 0,5 cd/m².
- Uniformidad general mínima de la luminancia de la superficie de la carretera: $U_0 = 0,4$
- Uniformidad longitudinal mínima de la luminancia de la superficie de la carretera: $U_0 = 0,4$
- Uniformidad general mínima de la luminancia de la superficie de la carretera: $U_0 = 0,15$ (condiciones húmedas)
- Incremento de umbral: $f_m = 15\%$
- Ratio iluminación en los alrededores $REI = 0,3$ (obsérvese que se refiere sólo al lado de la carretera, y por tanto no incluye la vía combinada para bicicletas y peatones, sino que esta es independiente y tendrá su propia clase de iluminación y criterios).

3.3 Componentes y diseño de la iluminación

3.3.1 Componentes del sistema de iluminación

Los componentes del sistema de alumbrado vial se pueden dividir en tres amplias categorías:

- Sistemas ópticos que incluyen luminarias (incluidos reflectores, refractores y lentes), lámparas o fuentes de luz y el equipo de control.
- Sistemas de soporte compuestos por postes y sus cimientos.
- Sistemas eléctricos que incluyen instalaciones de suministro, control y medición de energía.

3.3.1.1 Sistemas ópticos

3.3.1.1.1 Luminarias, lámparas y fuentes de luz

Para distinguir los términos «luminarias», «lámparas» y «fuentes de luz» se hace referencia a las definiciones previstas en las recientes regulaciones de la UE 874/2012 (etiquetado energético de lámparas eléctricas y luminarias) y 1194/2012 (requisitos de diseño ecológico aplicables a las lámparas direccionales, a las lámparas LED y a sus equipos):

- Una «luminaria» es un aparato que distribuye, filtra o transforma la luz transmitida desde una o más lámparas e incluye todas las piezas necesarias para soportar, fijar y proteger las lámparas y, cuando sea necesario, los auxiliares de circuito junto con los medios para conectarlos a la fuente de electricidad.
- Una «lámpara» es una unidad cuyo rendimiento se puede evaluar independientemente y que consiste en una o más fuentes de luz. Puede incluir componentes adicionales necesarios para el arranque, el suministro de energía o el funcionamiento estable de la unidad o para

distribuir, filtrar o transformar la radiación óptica, en los casos en que dichos componentes no puedan eliminarse sin dañar permanentemente la unidad.

- El término «fuente de luz» hace referencia a una superficie u objeto diseñado para emitir radiación óptica principalmente visible producida por una transformación de la energía. La expresión «visible» se refiere a una longitud de onda de 380–780 nm.

En este contexto, una luminaria puede contener una o más lámparas, mientras que una lámpara puede estar equipada con una o más fuentes de luz.

3.3.1.1.2 Lámparas

Desde el punto de vista físico, todas las tecnologías de lámparas utilizadas hoy en día para el alumbrado vial transforman la energía eléctrica en luz visible. Las lámparas de descarga de alta intensidad han dominado el alumbrado vial durante décadas. La tecnología LED está reemplazando a todos los tipos de lámparas, en particular en los nuevos sistemas de iluminación vial. Las lámparas de vapor de sodio de alta presión (SAP) siguen siendo una opción relevante sobre todo en autopistas o vías similares. Las lámparas son muy eficientes en cuanto a energía, pero ofrecen una baja reproducción cromática, aunque esto no es un problema en ciertos casos. Se espera que las lámparas de halogenuro metálico y las lámparas de descarga de baja presión sean reemplazadas por LED a medio plazo.

En las lámparas LED, la luz se produce por el llamado efecto de electroluminiscencia. Al igual que en otros diodos, los electrones van del ánodo al cátodo y emiten un fotón cuando caen a un nivel de energía más bajo.

La longitud de onda de la luz emitida, y por tanto su color, depende de los materiales utilizados. Para el alumbrado vial se suelen utilizar LED azules que proporcionan luz blanca cuando se encapsulan en un recubrimiento de fósforo (véase el revestimiento amarillo en la Figura 11, y la Figura 12 que ilustra diferentes principios para la generación de luz blanca basada en el recubrimiento de fósforo). Los LED de emisión azul actuales tienen la mayor eficiencia de todos los tipos de LED, con una relación de conversión de potencia del 55%. El 45% restante se transforma en calor. Como una temperatura de unión (temperatura del material semiconductor LED) elevada reduce tanto la eficacia como la vida útil, es necesario un buen diseño térmico. Para disipar el calor, el chip LED y la copa del reflector están montados en un disipador de calor. Este disipador de calor a su vez debe transferir el calor a la luminaria, lo que disipa el calor en el ambiente.

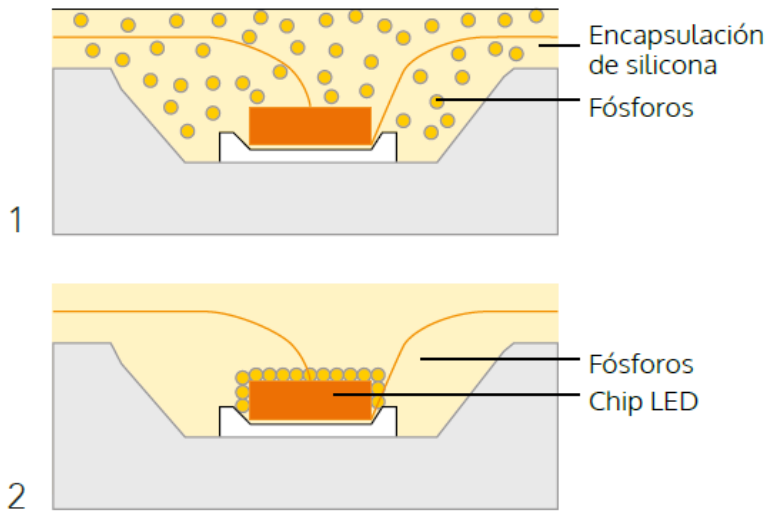


Figura 3.10 Fósforo suspendido en encapsulado de silicio (izquierda) y revestimiento de fósforo (derecha). (Fuente Iluminación LED exterior en el sector de servicios públicos y privados).

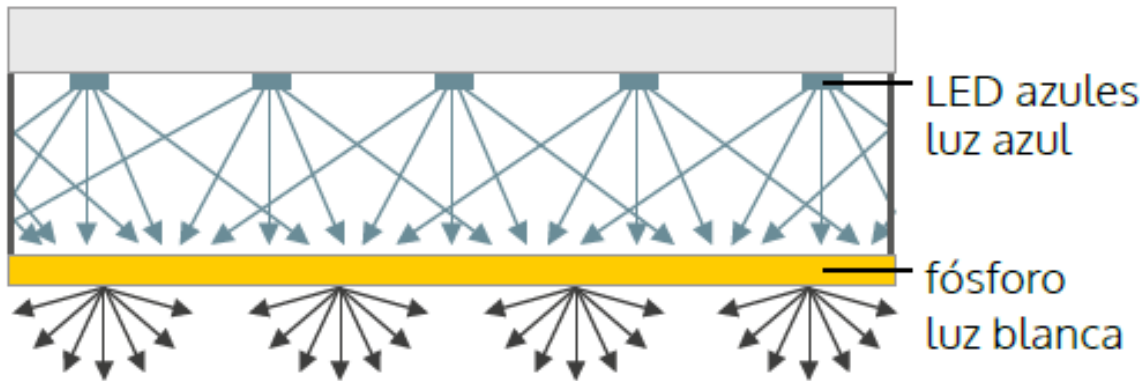


Figura 11 Módulo LED de fósforo remoto que crea luz blanca. (Fuente Iluminación LED exterior en el sector de servicios públicos y privados).

Otro tipo de LED son los LED orgánicos (OLED) que utilizan una capa plana de moléculas orgánicas en lugar de semiconductores como sustancia emisora de luz. A pesar de que existen muchas aplicaciones interesantes para los OLED, como los televisores planos de alta gama, y que la tecnología avanza rápidamente, todavía no son adecuados para el alumbrado vial.

Dado que el flujo luminoso de un LED individual es bastante bajo en comparación con el lux requerido para el alumbrado vial, varios chips LED se ensamblan en una placa de circuito y se pueden combinar con componentes adicionales. Por lo tanto, se deben distinguir varios niveles de integración. Las siguientes definiciones relacionadas con LED se pueden encontrar en los Reglamentos de la Comisión 874/2012 y 1194/2012:

- "Diodo emisor de luz (LED)" es una fuente de luz que consiste en un dispositivo de estado sólido que incorpora una unión p-n. La unión emite radiación óptica cuando es excitada por una corriente eléctrica.
- Un «paquete de LED» es un paquete que tiene uno o más LED. Puede incluir un elemento óptico e interfaces térmicas, mecánicas y eléctricas;
- Un «módulo LED» es un conjunto que no tiene tapa e incorpora uno o más paquetes de LED en una placa de circuito impreso. Puede tener componentes eléctricos, ópticos, mecánicos y térmicos, interfaces y equipos de control;
- Una «lámpara LED» es una lámpara que incorpora uno o más módulos LED. Puede estar equipada con una tapa;

Esta distinción está en línea con la segmentación de los productos LED comúnmente establecidos dentro de la industria de la iluminación [RL], excluyendo el nivel 2 (Tabla 10).

Nivel de integración	Descripción
Nivel 0	Chip LED
Nivel 1	Paquete LED que incluye conexión eléctrica, conexión y protección mecánicas, dispositivo de disipación de calor y componentes ópticos básicos.
Nivel 2	Montaje de varios LEDs (clúster LED) en una placa de circuito impreso.
Nivel 3	Módulo LED (o motor LED). Un módulo con un clúster LED, disipador de calor, controlador eléctrico y, en ocasiones, un dispositivo óptico. El módulo LED funciona como una lámpara.
Nivel 4	Luminaria compuesta por un módulo LED (nivel 3) y carcasa y óptica secundaria
Nivel 5	Sistema de iluminación LED que incluye funciones de control.

Tabla 3.10 Niveles de integración de los LED (Fuente Iluminación LED exterior en el sector de servicios públicos y privados).

La temperatura de funcionamiento del chip LED es un aspecto crucial que influye sobre todo en la eficacia y la vida útil. Los datos de rendimiento de los chips LED se indican para una temperatura de 25°C. Sin embargo, las temperaturas reales en condiciones de funcionamiento normales pueden alcanzar fácilmente los 60–90°C y provocar una caída de la salida del lumen de hasta un 40%. Sin embargo, los LED azules se ven menos afectados por el aumento de las temperaturas de funcionamiento (con una disminución del flujo de 5–20 % a 80°C de temperatura del chip).

La vida útil de las fuentes de luz LED puede exceder las 100 000 h , pero depende mucho de la temperatura de funcionamiento real y de la eficacia de la gestión térmica de la luminaria, asegurando una disipación de calor suficiente.

Comúnmente y en contraste con otras tecnologías de iluminación, los módulos LED están fijados a la luminaria y no están diseñados para ser reemplazados como componentes estandarizados, lo cual dificulta una posible reparación y el reemplazo a largo plazo. Varios profesionales de la industria se han dedicado a establecer un estándar abierto llamado Zhaga para la interoperabilidad e intercambiabilidad de los módulos LED y las luminarias, ofrecidos por diferentes proveedores. Sin embargo, los productos certificados con Zhaga (motores LED, módulos y luminarias) sólo representan de momento un nicho del mercado en general.

Los LED no pueden funcionar con la corriente alterna (AC) y necesitan un engranaje de control («controlador»), cuya función principal es proporcionar una tensión continua estabilizada. Dependiendo de la calidad del controlador, las pérdidas de potencia pueden variar entre el 10 y el 30 % de la potencia nominal de la fuente de luz. Los controladores de baja calidad pueden tener pérdidas de hasta el 50% y pueden reducir la vida útil de la fuente de luz [RL]. Una función secundaria importante del controlador es la atenuación.

3.3.1.3 Luminarias

La luminaria es el aparato de iluminación completo que consta de la carcasa, así como de todas las piezas necesarias para el montaje y el funcionamiento, incluidas las lámparas, las piezas de control, los engranajes, el cableado, etc. Las fuentes de luz LED generalmente se montan en luminarias planas diseñadas específicamente para que se haga un uso óptimo de sus propiedades ópticas. Existe otros tipos de luminarias LED pensadas y diseñadas a partir del modelo de luminarias clásicas y que se utilizan para reemplazarlas. Estos diseños generalmente no hacen uso de sistemas ópticos optimizados y sistemas de disipación de calor disponibles para tecnología LED. No obstante, su aplicación puede seguir siendo adecuada para ubicaciones en las que no es factible la renovación integral del sistema de iluminación.

El estándar de prueba para luminarias utilizadas por los fabricantes es IEC 605982-3, que proporciona recomendaciones generales para las luminarias y sus cubiertas. Las luminarias deben ser resistentes a la corrosión o estar protegidas de la corrosión con los acabados apropiados. Las luminarias contienen elementos ópticos como reflectores, refractores y lentes que crean la distribución de luz deseada y aseguran el control del deslumbramiento y la limitación de la contaminación lumínica.

Los reflectores se utilizan para redirigir la salida de luz. Los espejos del reflector crean múltiples imágenes de la fuente de luz, soportando así un patrón de luminancia relativamente uniforme en la superficie iluminada. Además, los reflectores permiten minimizar la contaminación lumínica o el deslumbramiento (véanse 2.1.1.2 y 2.1.1.6).

Los refractores o lentes prismáticos redirigen la luz de la lámpara y el reflector y brindan protección adicional contra daños. Se usan con mayor frecuencia en luminarias estilo cobra.

		
Luminaria plana	Luminaria estilo mástil alto	Luminaria estilo cobra

Figura 3.12 Tipos de luminaria LED. (Fuente Iluminación LED exterior en el sector de servicios públicos y privados).

Las lentes permiten un mayor control direccional de la luz y se instalan directamente en los LED. Al igual que los otros componentes mencionados, admiten la redirección de la luz, la reducción del deslumbramiento y la protección de entrada.

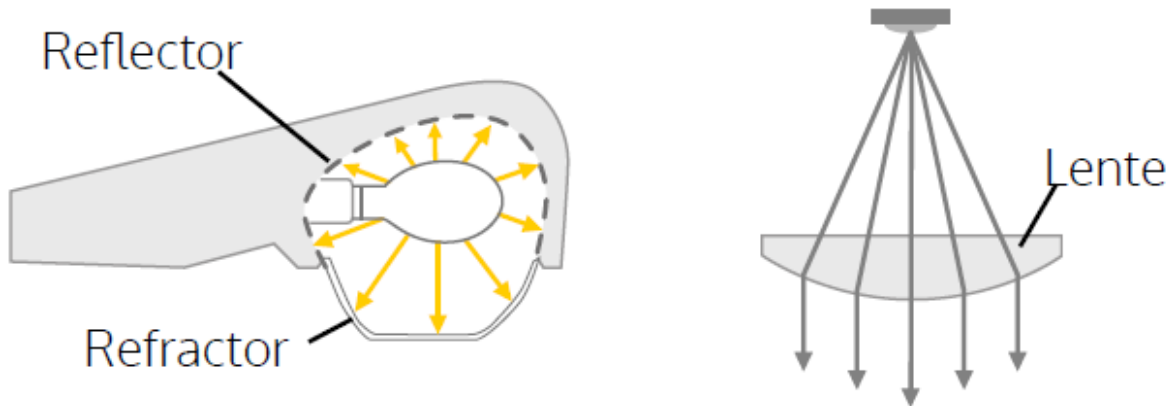


Figura 3.13 Reflector, refractor y lente en alumbrado vial. (Fuente Iluminación LED exterior en el sector de servicios públicos y privados).

En las luminarias LED modernas, se pueden instalar refractores de tipo lente avanzados en cada LED individual, lo que permite modificar la distribución de la luz mediante el cambio o la atenuación de los LED con diferentes lentes. Esto permite una mayor flexibilidad en el ajuste de la distribución de la luz al espaciado de la luminaria, el ancho de la carretera, las propiedades de reflexión de la superficie de la carretera y las condiciones climáticas, que son cambiantes [RL].

El Informe técnico CIE 115: 2010 ofrece clases de intensidad luminosa para luminarias, que definen los criterios para valores máximos de intensidad luminosa para diferentes ángulos de elevación. La clasificación incluye los niveles G1 a G6, que representan criterios cada vez más estrictos para ángulos más altos (y por lo tanto, reduce la contaminación lumínica y el deslumbramiento), [CIE].

Los componentes de una luminaria deben ser modulares para que se puedan reemplazar las partes en caso de fallo o por si es necesario sustituir un componente idéntico o compatible para evitar tener que sustituir toda la luminaria. Como se ha explicado en la sección anterior, la disipación de calor es especialmente importante para las luminarias LED. Además de garantizar una buena conducción de calor entre la lámpara y la luminaria, la disipación del calor se mejora mediante:

- El volumen de la luminaria: cuanto mayor es el volumen, menor es la temperatura dentro de la luminaria.
- Las propiedades de conducción de calor de la carcasa de la luminaria, que determinan como de rápido se transfiere el calor al aire circundante: la mayoría de los metales proporcionan características de disipación de calor adecuados, mientras que los plásticos son aislantes térmicos y, por lo tanto, generalmente inadecuados para luminarias LED.
- Aletas de enfriamiento: se pueden usar para mejorar la transferencia de calor en el entorno, ya que aumentan el área de la superficie de la luminaria.

Las luminarias generalmente se clasifican por su temperatura ambiente máxima (T_a), en la que pueden funcionar de forma segura. Si no se proporciona ningún valor de T_a , están diseñados para una temperatura ambiente máxima de 25 °C.

Marca de conformidad y marcas de calidad para luminarias de alumbrado vial.

CE

Cualquier producto comercializado dentro de la Unión Europea debe cumplir con todas las directivas pertinentes de la UE. Con la marca CE, una empresa confirma de forma legal y vinculante que producto cumple las reglamentaciones pertinentes. Desde 1997, se debe colocar una marca CE en todos los productos comercializados en Europa que se vean afectados por las directivas de marcado CE.

La marca CE (*Communautés Européennes* Comunidad Europea) no es una marca de prueba como ENEC u otras marcas nacionales de calidad, sino una marca de conformidad. El símbolo CE no lo emite un instituto de pruebas (de terceros), sino el propio fabricante.

Las autoridades de control reconocen un producto con marcado CE (sin necesidad de realizar más pruebas) como comercializable. El cumplimiento sólo se verifica mediante de controles puntuales o en caso de que se sospeche que los productos no los cumplen.

Para luminarias de alumbrado vial, la marca de cumplimiento CE satisface la siguiente legislación:

- Directiva 2014/35/UE, de baja tensión, sobre la armonización de las legislaciones de los estados miembros sobre la comercialización de equipos eléctricos diseñados para su uso dentro de determinados límites de tensión
- Directiva 2014/30/UE, de refundición, sobre la armonización de las legislaciones de los Estados miembros en cuanto a compatibilidad electromagnética

ENEC

La marca ENEC (*European Standard Electric Certification*) es una marca de seguridad europea con condiciones de prueba uniformes en toda Europa. El Acuerdo ENEC describe el procedimiento para el otorgamiento y el uso de una marca comúnmente acordada para ciertos equipos eléctricos que cumplen con los estándares europeos. En la actualidad, los siguientes 20 países han firmado el acuerdo: Austria, Bélgica, Chequia, Dinamarca, Finlandia, Francia, Alemania, Grecia, Hungría, Italia, Luxemburgo, Países Bajos, Noruega, Portugal, Eslovenia, España, Suecia, Suiza, Reino Unido.

El símbolo ENEC confirma que el producto cumple con los requisitos correspondientes de la Unión Europea. La marca ENEC puede ser otorgada por un organismo nacional de certificación que sea parte del Acuerdo ENEC. El número después de la marca ENEC indica qué centro de prueba ha sido certificado y en qué país (por ejemplo, ENEC 03 para Italia).

Las condiciones de prueba conjunta están estipuladas en la serie de normas EN 60598. Para garantizar la calidad del producto garantizada por la marca ENEC, los fabricantes también deben tener un sistema de garantía de calidad.

Un producto con marca ENEC de otro país europeo se trata como si hubiera sido certificado por el organismo nacional de inspección en su propio país. Esto simplifica la libre circulación de mercancías en el área económica europea, incluida Suiza, y cada vez más en Europa oriental.

3.3.2 Sistemas de soporte

Los postes deben cumplir con la norma EN 12767, «Seguridad pasiva de estructuras de soporte para equipamiento vial», que especifica los criterios para minimizar los riesgos de los ocupantes del vehículo en caso de colisión. La norma clasifica las estructuras de soporte del equipamiento vial en tres categorías de seguridad pasiva:

- Alta absorción de energía (HE, por sus siglas en inglés)
- Baja absorción de energía (LE, por sus siglas en inglés)
- Sin absorción de energía (NE, por sus siglas en inglés)

Las estructuras de soporte que absorben energía ralentizarán significativamente el vehículo durante una colisión y reducirán el riesgo de colisiones secundarias. Las estructuras que no absorben energía permitirán que el vehículo continúe con reducciones leves en la velocidad, lo que reduce el riesgo para los ocupantes en la colisión inicial, pero lo aumenta en colisiones

secundarias, incluso con otros usuarios de la vía pública. El tipo de poste seleccionado para un tramo de carretera en particular lo puede elegir la propia organización responsable de la administración tras evaluar las necesidades locales. Por ejemplo, pueden instalarse postes HE en áreas urbanas para reducir el riesgo secundario para otros usuarios de la vía pública.

Se especifican cuatro niveles de seguridad para los ocupantes para las estructuras de soporte. El nivel 4 representa las estructuras de soporte no perjudiciales que sólo deberían causar daños menores. Los otros tres niveles se establecen mediante pruebas de impacto con turismos ligeros con velocidades de 35, 50, 70 y 100 km/h. Los datos de las pruebas se utilizan para deducir la gravedad de la aceleración (ASI, por sus siglas en inglés) y las medidas teóricas de velocidad de impacto de la cabeza (THIV), que describen el peligro para los pasajeros.

Los mástiles de luz estacionarios suponen una vida útil de varias décadas. Los de acero están galvanizados, aunque en el pasado llevaban anticorrosivos para asegurar la protección contra la oxidación. Las versiones de acero inoxidable solo se utilizan en áreas específicas. Las instalaciones eléctricas o de otro tipo se revisan e intercambian con mucha más frecuencia que el mismo mástil. Los factores ambientales como el sol, la lluvia y el viento tienen poco impacto sobre las piezas. Sin embargo, fuertes tormentas, grandes cantidades de nieve o incluso cortinas de hielo pueden representar una amenaza para los postes.

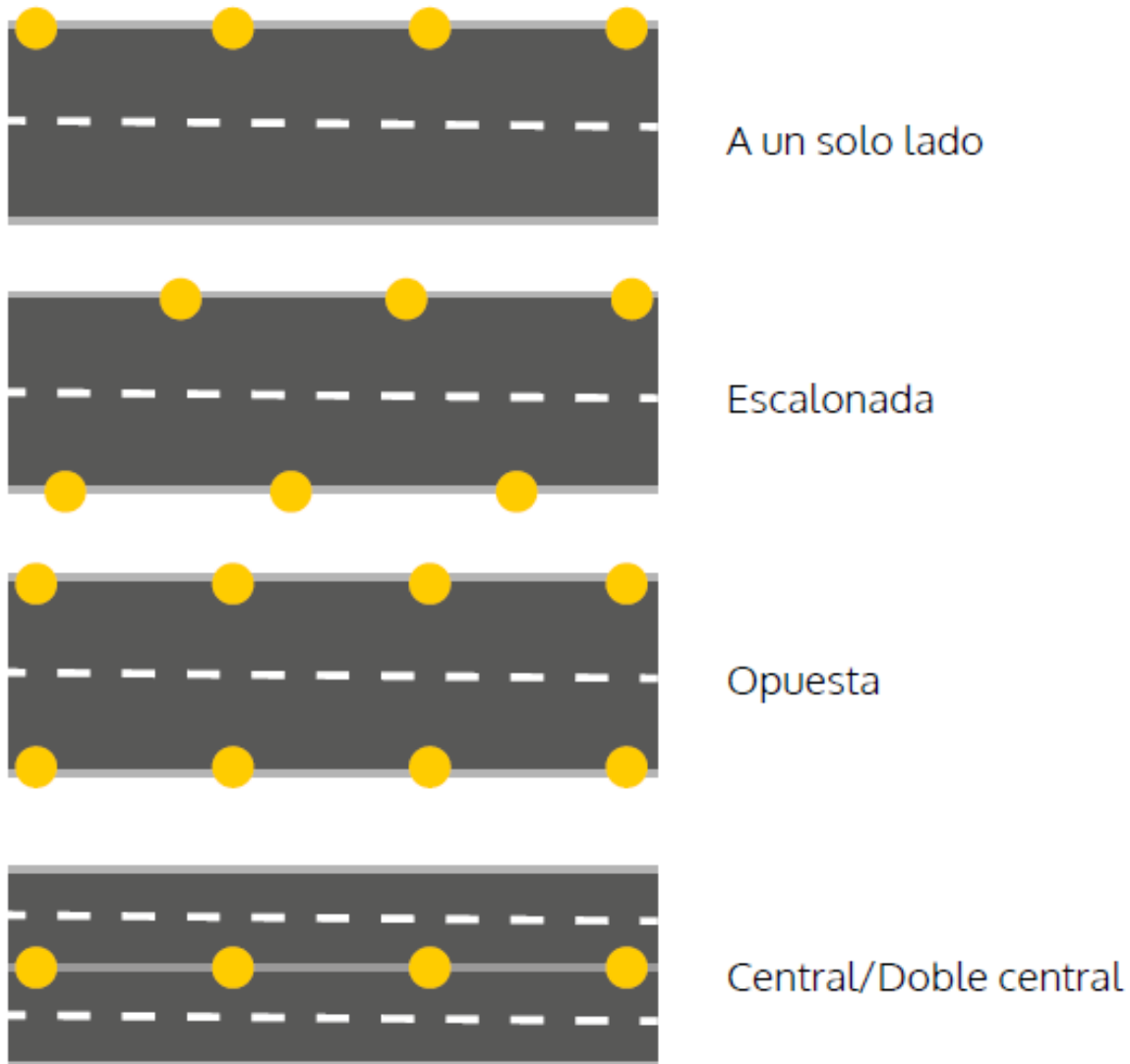


Figura 3.14 Disposición de las luminarias. (Fuente Iluminación LED exterior en el sector de servicios públicos y privados).

La disposición de los mástiles y su altura son decisiones técnicas basadas en la geometría de la carretera, las características del sistema, las condiciones del terreno de la vía, las características físicas del mástil, las condiciones ambientales, el espacio disponible para el mantenimiento, el presupuesto, la estética y los objetivos de iluminación. Las colocaciones más comunes se muestran a continuación.

La disposición elegida determina la altura mínima de montaje de la luminaria. Se determina como un factor del ancho efectivo de la vía y se mide desde la posición horizontal de la luminaria hasta el lado más alejado de la carretera.

- En la disposición un solo lateral, el ancho efectivo de la carretera puede ser igual a la altura de montaje de la luminaria. Además, a diferencia de las otras disposiciones, la luminancia de la superficie de la carretera no será igual en ambos carriles de la carretera.

- En la disposición escalonada, el ancho efectivo de la carretera puede ser hasta 1,5 veces la altura de montaje de la luminaria. La uniformidad de luminancia longitudinal suele ser baja y crea un patrón alterno de secciones brillantes y oscuras, aunque en las estaciones más húmedas se cubre todo el camino mejor que con la disposición de un lateral.
- En la disposición opuesta, el ancho efectivo de la carretera puede ser de cerca de 2 a 2,5 veces la altura de montaje de la luminaria. Si la disposición se usa en una autovía con una reserva central de al menos un tercio de la calzada, o si la reserva central incluye otras obstrucciones visuales significativas (árboles o pantallas), se convierte en dos colocaciones a un solo lateral y debe tratarse como tal.
- En la disposición en el centro, las luminarias se cuelgan de los cables de luz que atraviesan la carretera, usualmente entre edificios. El ancho efectivo de la vía puede duplicar la altura de montaje de la luminaria.
- En la disposición doble en el centro, con dos luminarias instaladas una detrás de otra, el ancho efectivo de la carretera puede ser igual a la altura de montaje de las luminarias. Siempre que la reserva central no sea demasiado amplia, ambas luminarias pueden contribuir a la luminancia de la superficie de la carretera en cualquier carril, haciendo que esta disposición sea generalmente más eficiente que la disposición opuesta. Sin embargo, la opuesta puede proporcionar una iluminación ligeramente mejor en condiciones húmedas.

La decisión sobre la posición exacta de los postes y la altura de montaje de la luminaria es parte del proceso de diseño y suele realizarse con un software especializado. El objetivo no es sólo mantener un mínimo de luminancia, sino también un mínimo de uniformidad de luminancia, que depende de la distribución de la intensidad luminosa de las luminarias en la instalación de alumbrado vial. Muchos productos LED están diseñados como reemplazo de las luminarias existentes (usando los postes preexistentes). Esta medida impide sacar el máximo provecho de los diseños modernos de luminarias LED que son susceptibles de distribuciones de intensidad luminosa mucho más uniformes que las similares luminarias de vapor de sodio de alta presión o halogenuro metálico [LRT4].

3.3.3 Sistemas eléctricos

El conductor de protección debe estar conectado a las tapas de la caja metálica, los conductos metálicos, los postes de metal, así como a cualquier vara de tierra suplementaria instalada en los cimientos del poste.

La resistencia de los alambres y cables de un circuito de alumbrado vial particular hará que el voltaje baje, lo que provoca un funcionamiento ineficiente. Para garantizar que todas las luminarias de un circuito en particular reciban un nivel mínimo de suministro de tensión, la caída de tensión entre el punto de alimentación y las luminarias más lejanas no debe superar el 3%.

El gabinete de servicio debe ser un gabinete hermético a la lluvia sellado con una junta de montaje [IIEC].

3.3.4 Sistemas de control de iluminación vial

El control activo de los sistemas de iluminación vial permite un importante ahorro de energía, pero los ahorros potenciales deben sopesarse frente a la complejidad y los costes adicionales. Según el tipo de gestión, existen tres tipos de sistemas de control de iluminación: control autónomo, control centralizado y control dinámico.

3.3.4.1 *Control autónomo*

Con control autónomo de la iluminación vial, las luminarias están pre programadas, normalmente por el fabricante, con períodos de tiempo fijos para el funcionamiento. Esta es la solución más simple y barata, ya que no requiere más control ni sistemas de red. Sin embargo, como la programación suele ser limitada, a menudo no se puede ajustar el control los fines de semana y días festivos. Además, los temporizadores internos pueden no ser precisos y las actualizaciones del sistema requieren cambios en cada poste de luz. Como alternativa, los sensores pueden detectar la luz ambiental en cada poste y decidir si activar las lámparas, aunque esto supone gastos adicionales.

3.3.4.2 *Control centralizado*

En el control centralizado de la iluminación vial, un sistema central envía la señal de control a todas las luminarias dentro de un grupo, normalmente a través de una señal enviada por la línea de alimentación. En comparación, esta configuración es simple y económica, pero permite cierta flexibilidad para ajustar la iluminación a las necesidades cambiantes. Por ejemplo, un sensor de luz central puede decidir cuándo encender todas las luces de un grupo determinado, lo cual, a diferencia de la gestión estrictamente basada en la hora, permite ajustarse a las condiciones climáticas locales. Dichos sensores deben limpiarse con regularidad para garantizar un buen funcionamiento [BFE]. Otras opciones incluyen la atenuación en función de la hora, que reduce o apaga la luz de ciertas lámparas en momentos y áreas específicas, por ejemplo a altas horas de la noche cuando se espera un bajo volumen de tráfico. Si bien la reducción de los costos de energía y la contaminación lumínica puede ser significativa, puede incrementar los riesgos de los usuarios de la vía pública si su capacidad para evitar obstáculos se ve afectada. Por lo tanto, las aplicaciones específicas deben evaluarse cuidadosamente.

El flujo de información es unidireccional. Aunque el nodo central puede determinar el estado de los grupos de lámparas, no recibe información sobre su estado individual u otras condiciones locales.

Tanto los sistemas de control centralizados como los dinámicos requieren la implementación de sistemas TIC de diversos grados de complejidad. Brindan opciones adicionales para ahorrar energía, pero también requieren recursos adicionales y experiencia para la implementación y el mantenimiento. La complejidad añadida aumenta los riesgos de fallos

del sistema [HCS], razón por la que los compradores y planificadores deben considerar si disponen de experiencia y soporte después de la implementación, e incluso si es con poca antelación.

3.3.4.3 Control dinámico

Una gestión dinámica del alumbrado vial ofrece un mayor grado de control. Se pueden controlar las lámparas en grupos o de forma individual, y el servidor de control central puede recopilar información sobre su estado según las opciones instaladas (fallos, consumo de energía, temperatura ambiente o de funcionamiento, luz ambiental, tráfico y presencia de peatones). Los cambios en la programación también pueden realizarse en el servidor de control central sin cambios en el hardware físico.

Sin embargo, esta flexibilidad adicional conlleva una complejidad añadida y costes adicionales. El software de control debe implementarse y mantenerse, y los operadores locales deben estar capacitados en su uso. Además, aumenta el riesgo de fallos de programación. Las lámparas se deben instalar con sistemas a prueba de fallas que garanticen la seguridad básica del tránsito durante la noche, incluso cuando no se reciben comandos erróneos del sistema de control [BFE].

Los sistemas de gestión inteligente de vanguardia suelen estar controlados por un mando central, por lo general un servidor en las oficinas de las autoridades locales, que controla un alto número de lámparas y envía órdenes que determinan el estado de las lámparas individuales. Los sistemas de control de la lámpara no reciben estas órdenes directamente, sino que pasan primero a través de concentradores que luego transmiten los mensajes a las redes de área local que consisten en un número limitado de lámparas y los accionadores de control [PE].

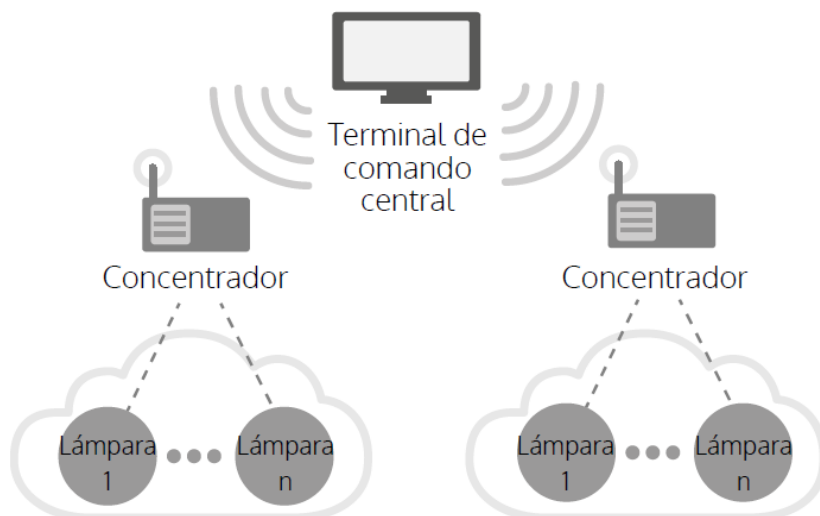


Figura 3.15 Arquitectura del sistema de control de iluminación vial. (Fuente Iluminación LED exterior en el sector de servicios públicos y privados).

Dos conceptos influyen en la arquitectura del sistema de control: la tecnología de comunicación, sobre cómo se transmite la información, y el protocolo de comunicación, sobre cómo se codifica la información.

En un sistema de alumbrado vial hay dos capas de comunicación que se deben unir con tecnología de comunicación: el centro de comando a concentradores y los concentradores a lámparas individuales. Pueden transmitir información por cable o como señales inalámbricas.

La comunicación por cable entre el centro de mando y los concentradores suele usar protocolos de comunicación Ethernet estándar [PE]. Aunque los cables de Ethernet son teóricamente viables, implican costes adicionales. En cambio, las redes locales para el alumbrado vial utilizan cables eléctricos (PLC), que modulan las señales de su línea de alimentación para intercambiar información.

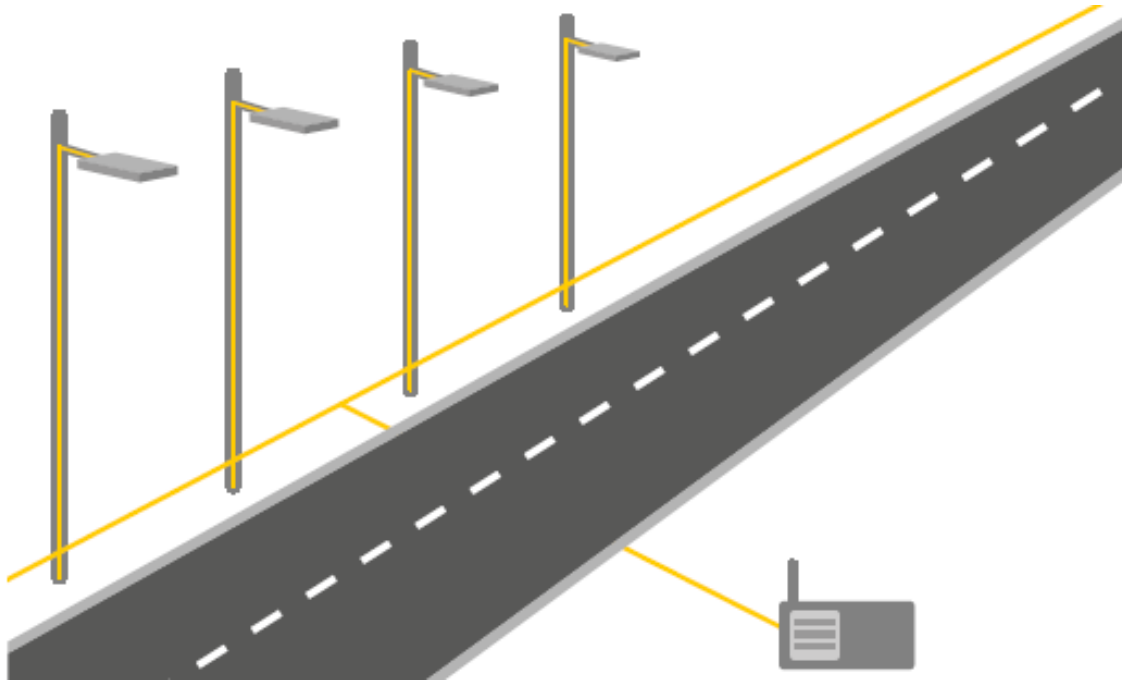


Figura 3.16 Comunicación mediante cable eléctrico. (Fuente Iluminación LED exterior en el sector de servicios públicos y privados).

La comunicación inalámbrica entre el centro de mando y los concentradores requiere que se puedan unir grandes distancias a través de señales inalámbricas. Los protocolos adecuados incluyen Wi-Fi (802.11), GPRS (Servicios generales de radio por paquetes) o WiMax.

Las señales inalámbricas entre los concentradores y las lámparas individuales pueden implementarse como una red, con lo cual la falta de visibilidad directa no interrumpe la conexión entre nodos individuales. La intensidad de la señal puede aumentarse a través de repetidores. Los protocolos adecuados para esta capa incluyen:

- DALI (por sus siglas en inglés: interfaz de iluminación direccionable digitalmente): un estándar adoptado por la IEC diseñado para controlar los circuitos de balasto utilizados para la supervisión del equipo de iluminación. Sólo puede controlar un máximo de 64 nodos.
- ZigBee, una alternativa de bajo coste, baja potencia y baja velocidad de datos para redes inalámbricas. Tiene deficiencias en términos de retrasos en los paquetes y puede ralentizar el rendimiento de la red.
- 6LoWPAN (IPv6 sobre redes inalámbricas de área personal de baja potencia). Este estándar no define un protocolo de enrutamiento específico para un sistema en particular, lo que permite más flexibilidad pero requiere un esfuerzo adicional para definir los protocolos [SEN].



Figura 3.17 Comunicación inalámbrica. (Fuente Iluminación LED exterior en el sector de servicios públicos y privados).

3.3.4 Estrategias de control de iluminación vial

A lo largo de los años se han desarrollado diversas estrategias con diferentes niveles de complejidad para el control de la iluminación vial, cada una con sus propias ventajas y desventajas. Algunos incluso pueden combinarse para estrategias más complejas.

3.3.4.1 Temporizador astronómico

Los temporizadores astronómicos tienen información precisa sobre los horarios de salida y puesta del sol para cualquier posición geográfica. Se pueden calcular de antemano con un gran nivel de precisión para períodos de tiempo prolongados. Sin embargo, las estrategias de control de iluminación basadas en temporizadores astronómicos podrían no tener en cuenta aspectos geográficos específicos, como grandes colinas o montañas que bloquean el sol al amanecer o al atardecer. Además, los temporizadores astronómicos no pueden hacer predicciones sobre las condiciones meteorológicas, como las tormentas, que podrían requerir iluminación artificial incluso durante el día.

Los temporizadores astronómicos podrían establecer un esquema simple de encendido/apagado para la iluminación que especifique el momento de activación en la noche y la desactivación en la mañana. Alternativamente, podría especificar períodos más tarde en

la noche durante los momentos en los que se espera menos tráfico durante el cual la iluminación permanece activa pero a una intensidad operativa reducida.

Una de las principales ventajas de los temporizadores astronómicos es que no requieren ningún sistema de TIC complejo para funcionar.

3.3.4.2 Aprovechamiento de luz natural

En contraste con el uso de temporizadores astronómicos, las estrategias de aprovechamiento de luz natural utilizan fotosensores para detectar la luz ambiental y ajustar la iluminación artificial si los niveles de luz ambiental disminuyen o aumentan más allá de ciertos valores de umbral. Este enfoque funciona especialmente bien con la atenuación, como veremos a continuación, y puede ajustarse a períodos prolongados de crepúsculo, así como a las inclemencias del tiempo. Sin embargo, los fotosensores requieren una limpieza regular para garantizar su correcto funcionamiento. Además, debe decidirse si un único fotosensor controlará la iluminación de un área grande o si se instalará un sensor para cada grupo de lámparas, o incluso para cada lámpara. La primera opción reduce la complejidad del sistema y representa un único punto de error para el sistema, aunque no puede reflejar todas las condiciones localizadas, como las áreas especialmente oscuras o los sistemas meteorológicos más pequeños. La segunda opción permite más flexibilidad, pero también requiere comprar una gran cantidad de sensores adicionales y un mayor mantenimiento para mantener los sensores limpios.

Los fotosensores pueden integrarse en una infraestructura de TIC más grande, que según su configuración permitirá la supervisión en tiempo real de la iluminación de la carretera. De este modo, cualquier problema de iluminación insuficiente se puede identificar rápidamente para abordarlo.

3.3.4.3 Detección de tráfico

En muchas carreteras el tráfico es bajo, especialmente a altas horas de la noche. Por lo tanto, se pueden obtener ahorros de grandes energía reduciendo su nivel de iluminación de acuerdo con los requisitos estipulados en EN 13201. Con el fin de garantizar que los usuarios de la vía puedan circular por ella de forma segura, se pueden instalar sistemas de detección de tráfico que aumentan el nivel de iluminación cuando es necesario. La tecnología más común para detectar tráfico, ya sean vehículos motorizados, ciclistas o peatones, son sensores de movimiento. Los tipos de detectores de movimiento incluyen los siguientes:

Los detectores de movimiento ultrasónicos detectan el cambio en las ondas sonoras que se recuperan de un objeto en movimiento. Este tipo de sensor no requiere un campo visual. Es económico, puede detectar objetos independientemente de sus materiales y se ve poco afectado por flujos de aire de hasta 10 m/s (36 km/h). Sin embargo, tienen un rango de detección bajo y pueden verse afectados por la humedad y las altas temperaturas.

Los detectores de movimiento por radar detectan cambios en las microondas que se recuperan de un objeto en movimiento, similar a las pistolas de radar. Son capaces de detectar incluso pequeños movimientos y no se ven afectados por la temperatura ambiente de los objetos. Sin embargo, son caros y pueden causar una detección falsa debido a movimientos fuera de la zona especificada.

Los sensores infrarrojos detectan el calor de un objeto o una persona en relación con su entorno. Son sensores puramente pasivos y, por lo tanto, no emiten sonido o radiación para recopilar información, aunque podrían provocar una falsa detección por aire caliente, lluvia u objetos calientes.

Los sistemas de detección de movimiento también se pueden combinar para que las desventajas de un tipo sean compensadas por las capacidades de otro.

Una vez que los sensores detecten la necesidad de una iluminación adicional, el sistema debe garantizar que se cumplan los requisitos habituales para la clase de alumbrado vial en cuestión, lo cual significa que un sensor de movimiento acoplado a un poste de luz concreto no debe usarse sólo para activar esa lámpara, sino también una o más lámparas adyacentes para que los individuos que conforman el tráfico no se vean afectados por condiciones de iluminación rápidamente cambiantes.

Cualquier sistema basado en detector de movimiento que abarque áreas no exclusivamente peatonales requiere casi siempre de integración en una configuración ICT más grande. No obstante, esto conlleva el beneficio adicional de recopilar datos informáticos sobre el tráfico que pueden ser útiles para los controladores de tráfico, planificadores urbanos, servicios de emergencia y otras agencias.

3.3.4.4 Atenuación

Dependiendo del tráfico, el clima y las condiciones de iluminación ambiental, puede que no sea necesario hacer las lámparas funcionen a plena potencia durante toda la noche. Al combinar el temporizador astronómico adecuado, el aprovechamiento de luz natural y los esquemas de detección de tráfico con atenuación, se puede lograr un gran ahorro de energía; en algunos proyectos se lograron ahorros de hasta el 85 %. Además, el aumento y disminución gradual de la iluminación reduce el deslumbramiento de la incomodidad para los residentes cercanos. Los LED son especialmente adecuados para estrategias basadas en atenuación, ya que se atenúan con suavidad y casi sin complicaciones técnicas, mientras que otros tipos de lámparas utilizadas en iluminación vial no pueden atenuarse, producir cambios de color drásticos cuando lo hacen, como las lámparas de mercurio a alta presión o las lámparas de halogenuros metálicos, o tienen atenuación limitada.

3.3.4.5 Consideraciones

El control dinámico del alumbrado vial y las estrategias avanzadas de control, como por ejemplo el aprovechamiento de luz natural y la detección del tráfico, están cambiando

rápida mente ciertas áreas de la tecnología y, por consiguiente, requieren una consideración especial y atenta en cuanto a los posibles obstáculos y limitaciones para su buena implementación.

Las leyes, regulaciones y estándares nacionales y locales para el alumbrado vial suelen desestimar los últimos desarrollos tecnológicos. Por lo tanto, se debe cuidar que los sistemas de control de iluminación propuestos cumplan con todos los requisitos legales. Una preocupación adicional es la responsabilidad: si el sistema falla debido a algunos defectos técnicos, debe quedar claro qué parte es responsable de los fallos.

Dado que el control dinámico del alumbrado vial puede resultar de una complejidad considerable, el licitador encargado de implementarlo debería estar a cargo del soporte y mantenimiento, lo que probablemente requerirá contratos de servicio extendido y es especialmente importante si la solución implementada incluye sistemas y componentes de múltiples licitadores que necesitan integración y actualización ocasionales. Se recomienda como criterio para la selección del licitador que tenga experiencia probada con sistemas dinámicos de alumbrado vial.

Las luminarias deben estar programadas con un estado «predeterminado» al que se puede revertir en caso de que reciba o no señales de control erróneas. Este estado predeterminado debería representar un control básico de iluminación basado en el tiempo que cumpla con los estándares legales sin ninguna característica dinámica. Además, en caso de fallo total del sistema, los operadores designados deberían poder poner el sistema de iluminación completo o algunas secciones en estado predeterminado, con poca antelación y sin la intervención de expertos externos.

3.4 Criterios de adquisición para alumbrado público LED

3.4.1 Elementos generales para las especificaciones técnicas de los sistemas de alumbrado público

A.1	Especificación de calles, caminos y especificaciones técnicas relacionadas (iluminancia, uniformidad, factor de mantenimiento).	El comprador deberá especificar las calles y caminos para los cuales se diseñará el sistema de iluminación vial o se adquirirán los componentes de iluminación. El sistema se debe especificar según la norma EN13201 y las normas nacionales relacionadas. Para las especificaciones se deben tener en cuenta las situaciones variables que ofrecen espacio para el control y la atenuación de la iluminación. El comprador deberá especificar, entre otros: Niveles de iluminancia, Niveles de uniformidad, Factores de mantenimiento del sistema de iluminación según la EN 13201 o las necesidades específicas.	
A.2	Funciones del control de iluminación	El comprador deberá especificar una de las siguientes tres opciones: No tiene en consideración las características del control de iluminación porque no considera oportuno controlar o atenuar el sistema de iluminación específico. Es plenamente consciente de las opciones adecuadas para el control y atenuación de la iluminación en el sistema de iluminación específico e indica los requisitos detallados para un sistema de control de iluminación. No se ve en condiciones de especificar características óptimas de control de iluminación para el sistema de iluminación, pero solicita al licitador una oferta para un sistema regulable acompañado de un cálculo transparente de CCV.	Las características de control de iluminación se evaluarán en función a cada proyecto y, cuando corresponda, los requisitos especificados.
A.3	Medición del consumo de energía	El comprador deberá especificar una de las siguientes tres opciones: No tiene en consideración ninguna medida de consumo eléctrico por que no considera apropiado cuantificarlo en el sistema de iluminación específico. Es plenamente consciente de las opciones de medición adecuadas para el sistema de iluminación específico e indica los requisitos detallados para el concepto de medición. No se ve en condiciones de determinar una medición óptima del consumo del sistema, pero solicita al licitador una oferta para medirlo adecuadamente y un cálculo transparente de CCV.	La adecuación de las características de medición se debe comprobar en cada licitación.

3.4.2 Criterios de selección

	Criterio	Requisito	Requisito obligatorio	Comentario
B.1	Conocimientos y experiencia del equipo de diseño y el equipo de instalación	Un mínimo de cinco proyectos de iluminación relevantes en los últimos tres años, de envergadura similar a la licitación.	✓	La experiencia puede incluir proyectos previos en otras compañías.
B.2	Capacidad del licitador para completar el proyecto dentro del periodo de tiempo especificado	La capacidad del licitador debe ser satisfactoria para la envergadura y el calendario del proyecto.	✓	Debe especificarse según la envergadura y el calendario del proyecto.
B.3	Cumplimiento de las normas EN u otras normas relevantes	El licitador debe cumplir con las normas relevantes. Por ejemplo, debe cumplir con la norma EN 13201.	✓	Puede que los requisitos incluyan diferentes estándares nacionales.

3.4.3 Criterios técnicos

Criterios de calidad y diseño																										
	Criterio	Requisito	Requisito obligatorio	Criterio de adjudicación	Comentario																					
C.7	Temperatura cromática	Áreas domésticas, principalmente peatonales: ≤ 3000 K Carreteras principales, autopistas y áreas con tráfico mixto: ≤ 4000 K	✓		La temperatura de color recomendada se indicará en función a la clase de vía.																					
C.8	Reproducción cromática	Carreteras con tráfico mixto, con ciclistas y peatones: $R_a \geq 80$ Vías principales y autopistas: $R_a \geq 70$	✓		El nivel de reproducción de color recomendado debe indicarse en función a la clase de vía.																					
C.9	Consistencia cromática	La consistencia cromática debe ser de un máximo de 5 elipses de MacAdam al ponerse en funcionamiento.	✓																							
C.10	Luminancia e iluminancia	De acuerdo con EN13201	✓		De acuerdo con los requisitos del estándar.																					
C.11	Distribución luminosa (uniformidad de la distribución de luz)	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Tipo de vía</th> <th>U_o</th> <th>U_l</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>M1</td> <td>0.4</td> <td>0.7</td> </tr> <tr> <td>M2</td> <td>0.4</td> <td>0.7</td> </tr> <tr> <td>M3</td> <td>0.4</td> <td>0.6</td> </tr> <tr> <td>M4</td> <td>0.4</td> <td>0.6</td> </tr> <tr> <td>M5</td> <td>0.35</td> <td>0.4</td> </tr> <tr> <td>M6</td> <td>0.35</td> <td>0.4</td> </tr> </tbody> </table>	Tipo de vía	U _o	U _l	M1	0.4	0.7	M2	0.4	0.7	M3	0.4	0.6	M4	0.4	0.6	M5	0.35	0.4	M6	0.35	0.4	✓		De acuerdo con la norma EN 13201. La U _l (uniformidad longitudinal) sólo es relevante en tramos de carretera largos e ininterrumpidos.
Tipo de vía	U _o	U _l																								
M1	0.4	0.7																								
M2	0.4	0.7																								
M3	0.4	0.6																								
M4	0.4	0.6																								
M5	0.35	0.4																								
M6	0.35	0.4																								
C.12	Contaminación lumínica	FHS = 0 %. FHS = flujo hemisférico superior	✓		Un FHS distinto puede ser apropiado en casos específicos, pero debe estar justificado.																					
C.13	Protección contra el deslumbramiento (discapacidad e incomodidad por deslumbramiento)	Discapacidad por deslumbramiento: G4 o superior Incomodidad por deslumbramiento: G6 o G5	✓		Véanse, por ejemplo, las directrices para el alumbrado público en DK, Vejregler 2015.																					
C.14	Protección contra el ingreso (clasificación IP)	Requisito mínimo: IP 65 para todas las clases de vía	✓		Una categoría inferior puede ser aceptable si está justificada.																					
C.15	Protección contra impactos (clasificación IK)	Requisito mínimo: IK 07 para todos los tipos de vía	✓		El nivel puede ajustarse para determinadas aplicaciones.																					
C.16	Protección IEC	Clase II	✓																							
C.17	Protección contra sobretensión	10 kV	✓																							
C.18	Marca de conformidad para todos los componentes	ENEC y reglamentos nacionales	✓																							
C.19	Durabilidad	Vida útil del sistema $L_{80}B_{10} \geq 100000$ h	✓	✓																						

Criterio energético

	Criterio	Requisito	Requisito obligatorio	Criterio de adjudicación	Comentario
C.1	Indicador de densidad de potencia (PDI) e indicador del consumo de energía anual (AECI)	<p>Indicador de densidad de potencia (PDI):</p> $D_p = \frac{P}{\sum_{i=1}^n (\bar{E}_i \cdot A_i)}$ <p>Indicador de consumo de energía anual (AECI):</p> $D_e = \frac{\sum_{j=1}^m (P_j \times t_j)}{A}$ <p>DP (PDI): indicador de densidad de potencia DE (AECI): indicador de consumo de energía anual P: potencia (W) E_i: iluminancia horizontal promedio mantenida (lx) A: zona iluminada (m2)</p>	(✓)	✓	<p>El PDI y el AECI se basan en la norma EN 13201-5: 2016 y en el borrador CPE de la UE sobre iluminación vial. Se utilizarán como un criterio de adjudicación que el licitador debe calcular de forma transparente y verificar con mediciones en determinados segmentos de carretera. El comprador que desee calcular los niveles de referencia aproximados, que los licitadores no deberían exceder, pueden utilizar fórmulas simplificadas para el cálculo de referencia como propone la CPE de la UE (Borrador 2017).</p> <p>PDI < M/(η × Fm × 0,07 × RW) AECI < M × PDI × Fdim × Em × T × 1 kW/1000 W</p> <p>Fm: Factor de mantenimiento del sistema de iluminación RW: Ancho de la vía Fdim: Factor de atenuación Em: Iluminancia T: Tiempo (h) η: Eficacia de la luminaria M: Factor de ajuste: M = 1,3 para los sistemas de iluminación existentes cuyos puntos de luz y postes ya existentes no se pueden cambiar de posición M = 1,2 para sistemas de iluminación nuevos</p>
C.2	Eficiencia energética de la luminaria	<p>Eficacia mínima (2017-2018):</p> <ul style="list-style-type: none"> •Temperatura cromática ≥ 4000 K: ≥ 120 lm/W •Temperatura cromática 2700-3000 K: ≥ 105 lm/W •Temperatura cromática ≤ 2000 K: ≥ 80 lm/W 	✓	✓	<p>Valores objetivo revisados una vez al año. En casos excepcionales donde se requiere una temperatura cromática especialmente baja por razones ecológicas, es aceptable una eficacia menor > 75 lm/W. Por ejemplo, actualmente los LED especiales de baja temperatura se ofrecen alrededor de 2000 K o menos para aplicaciones donde la preservación del medio ambiente es importante.</p>
C.3	Eficiencia energética del módulo LED	Eficacia mínima: 160 lm/W	✓	✓	Los valores objetivos se revisan una vez por año.
C.4	Factor de potencia	<p>Carga completa: cos phi ≥ 0.9 50 % carga (atenuación): cos phi ≥ 0.8</p>			
C.5	Funciones de control de iluminación	Opcional: de igual manera que si se indicara como especificación técnica.			Las opciones para las características de control de iluminación se evaluarán para cada proyecto y se indicarán los requisitos si se considera oportuno.
C.6	Medición del consumo de energía	Opcional: de igual manera que si se indicara como especificación técnica.			Se comprobará la adecuación de las características de medición a cada licitación.

Criterios de calidad y diseño

	Criterio	Requisito	Requisito obligatorio	Criterio de adjudicación	Comentario
C.20	Garantía	El período de garantía o contrato de servicio debe cubrir un mínimo de diez años	✓	✓	<p>a) Todas las fuentes de luz, los equipos de control o las luminarias defectuosas deben reemplazarse sin ningún coste. Si la luminaria proporciona menos salida lumínica que la especificada inicialmente, se considerará como defectuosa.</p> <p>b) Cada lote de lámparas o luminarias se reemplazará por completo en caso de que el número de unidades defectuosas en el lote sea superior al 10%. Condiciones no previstas:</p> <p>c) Luminarias defectuosas debido a vandalismo, accidentes, rayos o tormentas</p> <p>d) Lámparas y luminarias que han estado en funcionamiento durante mucho tiempo bajo condiciones anormales (por ejemplo, con un voltaje de línea incorrecto) en la medida en que el fabricante lo pueda demostrar.</p>
C.21	Disponibilidad de repuestos de las partes del sistema	Las piezas de repuesto para los componentes del sistema de iluminación estarán disponibles por un mínimo de 15 años.	✓	✓	
C.22	Facilidad de reparación y reciclaje	La fuente de luz (lámpara o módulo LED) y los elementos auxiliares de la luminaria son de fácil acceso, reemplazables y de sustitución realizable in situ, es decir, a la altura de montaje de la luminaria.	✓	✓	Deben especificarse los criterios y niveles de evaluación.
C.22	Diseño	Los criterios de diseño deben especificarse individualmente y ser evaluados por un jurado.		✓	Debe evaluarse por un jurado.

Criterios para proyectos que sólo necesitan reemplazar componentes del sistema

	Criterio	Requisito	Requisito obligatorio	Criterio de adjudicación	Comentario
C.24	Tiempo de vida de la luminaria	$L_{80}B_{10} \geq 100.000 \text{ h}$	✓	✓	
C.25	Vida útil del módulo LED	$L_{80}B_{10} \geq 100.000 \text{ h}$	✓	✓	
C.26	Vida útil del controlador y tasa de fallo	Tasa de fallo del 0,1% por 1000 h	✓	✓	

Criterios de coste

	Criterio	Requisito	RO	CC	Comentario
C.27	Costes del ciclo de vida (CCV) (opción 1: preferida)	El cálculo de los costes del ciclo de vida es obligatorio para todos los proyectos donde proceda.		✓	El licitador proporcionará un cálculo transparente de los costes del ciclo de vida respecto al cálculo del costo total de propiedad (CTP). Si las ofertas se basan en cálculos de CTP, el criterio de adjudicación AECI se incluirá en la evaluación de los costes de CTP.
C.28	Costes de inversión (opción 2: alternativa)	Criterio de adjudicación para proyectos en los que no pueden evaluarse los costes del ciclo de vida respecto al CTP.		✓	Si las ofertas no pueden basarse en cálculos de CTP, se evaluarán los criterios de adjudicación «AECI» y los «costes de inversión» de forma paralela.

3.4.4 Problemas contractuales (instalación, puesta en servicio)

D.1	Instalación correcta	<p><i>El contratista debe asegurarse de que:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • <i>El sistema de iluminación se ha instalado tal y como se ha solicitado o indicado</i> • <i>Se entrega un cronograma de equipos de iluminación instalados con facturas adjuntas de fabricantes o notas de entrega</i> • <i>Se constata que el equipo se ha instalado como se especificó originalmente.</i> <p><i>Para un segmento de carretera seleccionado al azar por el facilitador, el contratista seleccionará dos postes para los cuales se debe suministrar un certificado de medición que certifique que el sistema de iluminación para este segmento de carretera cumple con los requisitos especificados en EN 13201-2.</i></p> <p><i>Para este segmento de carretera, también se medirán o calcularán la potencia máxima (W) y el consumo de energía (kWh) durante un período de una semana. En base a estos datos y a las mediciones de iluminancia EN 13201-2 previas, se calcularán el PDI y el AECI y se verificará con el diseño (máximo +/- 10% de tolerancia).</i></p> <p><i>Para limitar la contaminación lumínica, se medirá el ángulo de la pluma de un conjunto de luminarias en el segmento de carretera seleccionado y se comparará con las especificaciones de diseño (máximo +/- 2° de tolerancia).</i></p>	Adaptado de acuerdo con Contratación Pública Ecológica
D.2	Puesta en funcionamiento de los sistemas y controles de iluminación	<p><i>El contratista debe asegurarse de que:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • <i>sistemas y controles de iluminación nuevos o renovados funcionan correctamente y no utilizan más energía de la solicitada o indicada.</i> • <i>Se calibran los controles vinculados a la luz solar para garantizar que apaguen la iluminación cuando la luz solar sea la adecuada.</i> • <i>Se verifica que los sensores de tráfico detectan vehículos, bicicletas y peatones según su aplicación.</i> • <i>Los temporizadores o las escenas de control en el software se deben configurar con tiempos de desconexión adecuados para satisfacer las necesidades visuales sin un aumento excesivo en el consumo de energía.</i> <p><i>Si después de la puesta en marcha, hay partes del sistema de iluminación que no parecen cumplir con todos los requisitos y especificaciones anteriores, el contratista deberá ajustar y/o recalibrar los sistemas.</i></p>	Adaptado de acuerdo con Contratación Pública Ecológica
D.3	Reducción y recuperación de desechos		<p>El licitador debe implementar las medidas adecuadas para reducir y recuperar los desechos que se producen en la instalación del nuevo sistema de iluminación o el reacondicionamiento del sistema de iluminación. Todas las lámparas, luminarias y componentes electrónicos sustituidos deberán separarse y recuperarse de acuerdo con la directiva RAEE.</p>

Ponderación de los criterios de adjudicación

Para la evaluación de los criterios de adjudicación, se requiere un enfoque de ponderación. La siguiente sección proporciona dos opciones para un posible concepto de ponderación, uno de los cuales implica un enfoque de CTP.

En los proyectos donde se puede aplicar un enfoque de CTP sólido, ya se incluyen aspectos principales como el funcionamiento y el mantenimiento, y sólo se deben añadir algunos parámetros adicionales como la calidad, el diseño, la garantía y el fin de la vida útil (primera tabla).

Los aspectos de consumo y mantenimiento de energía, por ejemplo, ya se incluyen en los costes de electricidad y mantenimiento y debe evitarse contabilizarlos por duplicado, por lo que el CTP tiene una gran parte del peso total. La ponderación de los criterios generalmente debe adaptarse a las necesidades y a los requisitos locales. Por lo tanto, el enfoque recomendado aquí es sólo una opción posible.

Ponderación de los criterios de adjudicación para proyectos con información CTP

Criterio de adjudicación		Ponderación (%)
Criterios de coste basados en el coste total de propiedad (CTP)		50
CTP	Costes de inversión	15
	Costes de electricidad	20
	Costes de mantenimiento	15
Criterios de calidad y diseño		30
Calidad de iluminación		20
Diseño		10
Garantía, diseño para reciclaje		20
Garantía		10
Disponibilidad de repuestos y diseño para reciclaje		10

Criterio de adjudicación	Ponderación (%)
--------------------------	-----------------

Total	100
-------	-----

Ponderación de los criterios de adjudicación para proyectos sin información CTP

Criterio de adjudicación	Ponderación (%)
Criterios de coste	25
Costes de inversión	25
Criterios de calidad y diseño	35
Calidad de iluminación	25
Diseño	10
Criterios de energía	20
AECI o PDI o eficiencia de los componentes. Según el tipo de proyecto, se utilizará el indicador más apropiado; algunos tipos de proyectos sólo permiten utilizar la PDI o la eficiencia de los componentes.	20
Criterio de funcionamiento, mantenimiento y fin de la vida útil	20
Facilidad de mantenimiento, reparación	10
Garantía y disponibilidad de repuestos	10
Total	100

CONCLUSIONES

Los LED constituyen una tecnología novedosa, cuyas ventajas o pros se encuentran en su destacable eficiencia luminosa, eficiencia energética, ausencia de radiaciones ultravioletas e infrarrojas, débil generación de calor, encendido instantáneo, buen rendimiento de color, elevada economía en el consumo de energía eléctrica y en el mantenimiento, con una vida media bastante mayor a las tecnologías convencionales y temperatura de color relativamente cercano a las lámparas incandescentes, tiempo de respuesta inmediato, regulación de luz en su totalidad de 0-100% con sistemas electrónicos, carentes de mercurio, y resistentes a perturbaciones mecánicas, funciona adecuadamente a bajas temperaturas y más.

No obstante, los LED también tienen sus inconvenientes, pues no siempre cumplen con lo ofrecido en su publicidad dando cavidad a la desconfianza, por dar un acercamiento, en el alumbrado exterior, la aparición en el mercado de luminarias deficientes, además de ocultar cuestiones esenciales como la caída de flujo luminoso y de la calidad de la luz en el transcurso del tiempo de funcionamiento, incumpliendo en muchos supuestos la uniformidad de la iluminancia y/o luminancia así como el control del resplandor luminoso nocturno, etc. Pudiendo ocasionar no solamente una competencia desleal, sino incluso un rechazo de los mismos que se sienten defraudados, predisponiéndolos a no adquirir dichos productos.

En alumbrado interior, las características típicas de los LED, tal como su luz direccional, pequeño tamaño y elevado brillo, pueden ser muy ventajosas en ocasiones específicas como el alumbrado de acento; en cambio, en el caso de alumbrado general para oficinas, edificios públicos, centros de educación o comercios al por menor, estas características pueden ocasionar problemas en lo que concierne en los aspectos cualitativos de la iluminación.

Ocurre también que los usuarios y consumidores de algunos productos LED observan que la duración de la vida de los mismos es en realidad más corta que la que se anuncia en los embalajes.

En consecuencia, la calidad de los LED, sus módulos, luminarias y equipos auxiliares deben garantizarse mediante especificaciones técnicas, tanto en lo que afecta a las definiciones, métodos de medición, como a los valores límites exigibles, ajustándose tanto al diseño ecológico propiciado y requerido por la unión europea.

Es importante entender las diferentes características y usos de las lámparas, sus ventajas y desventajas. Las lámparas de aditivos metálicos con un alto rendimiento de color son buena opción para iluminar sitios en donde hay poco movimiento vehicular, como parques, jardines y estacionamientos, pero no para vialidades en donde la percepción del movimiento y el contraste es lo más importante para la seguridad del conductor y del peatón. Las lámparas de LEDs hasta el día de hoy, aún no alcanzan por mucho los requerimientos en luminancia para vías urbanas y carreteras.

Recordemos que la luminancia y la Iluminancia son diferentes maneras de cuantificar la distribución de la luz en el espacio, pero la mayoría de los diseños y cálculos de alumbrado

se basan en la iluminancia porque en el pasado era la forma más fácil de hacer los cálculos para un proyecto. Ahora softwares de cálculo de iluminación completos que permiten integrar todos los parámetros en cálculos altamente precisos, incluso se desarrollan nuevas planeaciones de iluminación que no solo van desde los niveles requeridos para distintas tareas si no que hay tan confiables que asemejan los niveles de iluminación de acuerdo a las horas del día para hacerlo empático con nuestro reloj biológico.

En nuestro país, hace falta el establecimiento de normas que se adapten a nuestras condiciones, las cuales se desarrollen para nuestras regiones y no sean solo una básica interpretación de las normas europeas, ya que estas no satisfacen del todo nuestras condiciones atmosféricas, geomorfológicas, sociales, económicas, y de más. Es un fenómeno de la investigación, pues para este trabajo no se encontraron contenidos de calidad en México, como fue avanzando este estudio, se acercaba más a contenido europeo, manuales alemanes, españoles, de la unión europea los cuales se “adaptan” para su aplicación en nuestro país. En adición es poca la accesibilidad a contenido nacional o la falta de el y/o de investigación en esta área, es necesario y se requiere la investigación y el establecimiento de normas confiables para México.

ACRÓNIMOS Y ABREVIATURAS

AECI	<i>Indicador del Consumo de Energía Anual</i>
AFV	<i>Abrupt Failure Value (tasa de fallo)</i>
ANSI	<i>Instituto Nacional Estadounidense de Estándares</i>
CCT	<i>Temperatura de color correlacionada</i>
CCV	<i>Coste del Ciclo de Vida</i>
Cd	<i>Candela, unidad del sistema internacional de intensidad luminosa</i>
CE	<i>Comisión Europea</i>
CEI	<i>Comisión Electrotécnica Internacional</i>
CIE	<i>Comisión Internacional de la Iluminación</i>
CPE	<i>Contratación Pública Ecológica</i>
CTP	<i>Coste total de propiedad</i>
DALI	<i>Interfaz de Iluminación direccionable digitalmente</i>
Duv	<i>Distancia cromática al lugar planckiano</i>
ECEEE	<i>Consejo Europeo para una Economía de Energía Eficiente</i>
EPA	<i>Agencia de Protección Ambiental Danesa</i>
EPBD	<i>Directiva de eficiencia energética en edificios</i>
ESE	<i>Empresa de Servicios Energéticos</i>
GLS	<i>Lámpara incandescente no direccional</i>
HCL	<i>Human Centric Lighting (luz centrada en el ser humano)</i>
IEA SSL	<i>International Energy Agency 4E Solid State Lighting Annex</i>
IRC	<i>Índice de reproducción cromática</i>
K	<i>Kelvin, unidad de temperatura de color correlacionada</i>
LED	<i>Diodo emisor de luz</i>
LEF	<i>Factor de potencia en las luminarias</i>
LFC	<i>Lámpara Fluorescente Compacta</i>
LFL	<i>Tubos Fluorescentes Lineares</i>

LiFi Comunicación inalámbrica de alta velocidad basada en modulación de luz LED de alta frecuencia

LLMF Factor de mantenimiento del flujo de la lámpara

LMF Factor de mantenimiento de la luminaria

lm Unidad del Sistema Internacional para el flujo luminoso: lumen

LOR Light Output Ratio

LSF Factor de supervivencia de la lámpara

lux Unidad del Sistema Internacional para la iluminancia. $1 \text{ lux} = 1 \text{ lm/m}^2$

PDI Indicador de Densidad de Potencia

PIR Sensor infrarrojo pasivo

PVD Pantalla de Visualización de Datos

Ra Medida del índice de reproducción cromática

RVA Red Green Blue (mezcla de colores en las lámparas LED)

SDCM Standard Deviation Colour Matching (desviación estándar de correspondencia de colores)

ta Temperatura ambiente nominal: temperatura máxima sostenida para la operación normal de la luminaria

tq Temperatura ambiente de calidad nominal: temperatura más alta sostenida para un nivel de rendimiento definido

W Watt: un julio por segundo (tasa de conversión o transferencia de energía)

REFERENCIAS

REF 1 Título Manual - Cómo planificar con luz

REF 2 MANUAL DE ILUMINACIÓN VIAL CARRETERAS, BOULEVARES, ENTRONQUES, VIADUCTOS, PASOS A DESNIVEL Y TÚNELES 2015

REF 3 CIE - (1977) Pub 12.2.

REF 4 CIE - (1977) Pub 12.2.

REF 5 CIE - (1977) Pub 12.2.

REF 6 CIE - (1977) Pub 12.2.

REF 7 (1989) SCT Manual de Alumbrado Vial, pág. 30.

REF 8 (1989) SCT Manual de Alumbrado Vial, pág. 45.

REF 9 CIE (1977) Pub 12.2.

REF 10 (1989) SCT Manual de Alumbrado Vial.

REF 11 CIE No. 47 (1997)

REF 12 CIE 30.2:1982.

BIBLIOGRAFÍA

- Austrian Energy Agency. (2018). *Iluminación LED exterior*. Barcelona, España: Asociación Ecoserveis. Obtenido de http://www.premiumlightpro.es/fileadmin/es/Guia_de_Iluminacion_Exterior_web.pdf
- Consejería de Economía y Hacienda Comunidad de Madrid, ANFALUM, FENERCOM. (2015). *Guía sobre tecnología LED en el alumbrado*. Madrid, España: BOCM. Obtenido de <https://www.fenercom.com/pages/publicaciones/libros-y-guias-tecnicas.php>
- Ganslandt, R., & Hofmann, H. (s.f.). *Cómo planificar con luz*. Berlin, España: ERCO Iluminación, S. A. Obtenido de https://www.academia.edu/24312943/C%C3%B3mo_planificar_con_luz
- Secretaría de Comunicaciones y Transportes. (2015). *Manual de iluminación vial carreteras, boulevares, entronques, viaductos, pasos a desnivel y túneles 2015*. México. Obtenido de www.sct.gob.mx/fileadmin/.../DGST/.../Manual_de_Iluminacion_Vial_2015.pdf