

MANUAL DE ILUMINACIÓN VIAL

CARRETERAS, BOULEVARES, ENTRONQUES, VIADUCTOS,
PASOS A DESNIVEL Y TÚNELES

2015

COPYRIGHT © 2015 Secretaría de Comunicaciones y Transportes. Quedan reservados todos los derechos.

AVISO: Este manual está protegido por la legislación referente a propiedad intelectual e industrial y por tratados internacionales. Todo uso no autorizado será perseguido de acuerdo con la legislación aplicable. Se prohíbe su copia, modificación, reproducción o distribución sin permiso del titular.

Los nombres de compañías, productos marcas o servicios son marcas registradas o nombres comerciales de sus respectivos propietarios.

Primera edición 1998
Segunda edición: 2015

SECRETARÍA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES
Dirección General de Comunicación Social
Centro SCOP, Xola esq. Av. Universidad
Col.Narvarte
Delegación Benito Juárez
CP. 03028 , México, D.F.

ISBN Obra Independiente: 978-607-95879-5-6

LIC. GERARDO RUIZ ESPARZA
SECRETARIO DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES

MTRO. RAÚL MURRIETA CUMMINGS
SUBSECRETARIO DE INFRAESTRUCTURA

LIC. YURIRIA MASCOTT PÉREZ
SUBSECRETARIO DEL TRANSPORTE

MTRA. MONICA ASPE BERNAL
SUBSECRETARIO DE COMUNICACIONES

M. A. P. RODRIGO RAMÍREZ REYES
OFICIAL MAYOR

ING. CLEMENTE POON HUNG
DIRECCIÓN GENERAL DE SERVICIOS TÉCNICOS

INTRODUCCIÓN

1

1. CONCEPTOS Y DEFINICIONES GENERALES

3

1.1	La Luz	3
1.2	El color	5
	Distribución espectral	7
	Diagrama cromático CIE	8
	Temperatura de color	9
	La visión y el ojo	12
	Aberración cromática	16
	Sensibilidad espectral del ojo humano	20
1.3	Deslumbramiento (E_{glare})	21
	Deslumbramiento molesto	22
	Deslumbramiento perturbador	22
	Luminancia de Velo	25
	Contraste	25
	Sensibilidad al contraste (G)	27
	Adaptación	27
1.4	Unidades fotométricas y magnitudes luminosas	29
	Flujo Luminoso (Potencia luminosa) Φ	29
	Rendimiento luminoso (eficiencia luminosa) ϵ	30
	Cantidad de luz (Energía luminosa) Q	30
	Intensidad luminosa (I)	30
	Candela (cd)	31
	Radián (rad)	31
	Ángulo sólido (ω)	31
	Estereoradián (sr)	32
	Iluminancia (Nivel de iluminación) E	32
	Lux (lx)	32
	Luminancia (L)	33
	Otras magnitudes luminosas de interés	35
1.5	Propiedades ópticas de los materiales	38
	Generalidades	38
	Reflexión	39
	Transmisión	43
	Absorción	45
	Refracción	45

2. FÓRMULAS Y MÉTODOS DE ALUMBRADO 47

2.1	Leyes y Principios de la Luminotecnia	47
	Ley de la inversa del cuadrado de la distancia	47
	Ley del Coseno	48
	Ley del cubo del coseno	49
	Ley del seno	50
	Ley de Lambert	51
2.2	Representación Gráfica de Magnitudes	52
	Curvas de distribución fotométrica	54
	Curvas Isocandelas	56
	Curvas Isolux	56
	Curvas Isoluminancias	58
2.3	Mapas de luminancia	59
	Imagen de Alto Rango Dinámico (HDRI, High Dynamic Range Image)	60

3. TIPOS DE FUENTES LUMINOSAS 61

3.1	Termorradiación y Luminiscencia	61
	Generalidades	61
	Termorradiación	62
	Termorradiación natural	63
	Termorradiación artificial	63
	Luminiscencia	64
	Luz de descarga eléctrica en el seno de un gas	66
	Descarga eléctrica a baja tensión entre electrodos calientes	67
	En las de mercurio:	67
	En las de sodio:	67
	Fotoluminiscencia	68
	Condiciones que deben reunir las lámparas	69
	Distribución espectral de la radiación total	69
	Luminancia	70
	Distribución de la intensidad luminosa	70
	Efecto biológico de la radiación emitida	71
	Color apropiado para cada aplicación	71
	Grupos de Luz	72
	Calidad de reproducción cromática	72
	Flujo luminoso constante	72
	Rendimiento luminoso	72

Vida media y vida útil	73
Repercusiones en la red de alimentación	73
Efecto estroboscópico	73
Posición de funcionamiento	74
3.2 Lámparas para alumbrado público	75
Lámparas de aditivos metálicos	75
Partes principales	75
Lámparas de vapor de sodio	76
Lámparas de sodio a baja presión	76
Lámparas de sodio a alta presión	78
Comparativas de eficiencia de lámparas existentes en el mercado nacional	80
3.3 LED	87
Definiciones	87
Investigación y Desarrollo	88
Funcionamiento físico	89
Características de los LEDS	90
Normas Aplicables	90
Especificaciones	90
Relación del flujo luminoso total nominal	91
Temperatura de color correlacionada	91
Ángulos de medición del flujo luminosos máximo	93
Descargas atmosféricas	93
Eficiencia energética en insatallaciones de alumbrado público con LEDs	94

4. EQUIPOS DE ALUMBRADO

97

4.1 Luminarias	97
Clasificación de luminarias de acuerdo a la CIE	97
Luminarias con repartición Cut-off	97
Luminarias con repartición Semi cut-off	98
Luminarias con repartición non cut-off	99
Alcance	99
Apertura	100
Control de deslumbramiento	100
Conclusión	102
4.2 Reactor (balastro)	102
Características de los Reactores en las Diferentes Lámparas de Descarga	103
Lámparas de aditivos metálicos	103
Lámparas de vapor de sodio a alta presión	103

Contenido

Reactor Electromagnético	104
Reactor Electrónico	104
Factor de Potencia	105
Eficiencia Energética	105
Seguridad	106
Calidad	106
4.3 Elementos para el diseño eléctrico	107
4.4 Acometida Aérea	108
4.5 Acometida Subterránea	110
4.6 Conductores eléctricos	112
4.7 Cálculo de la caída de tensión	112
4.8 Conexión de los equipos de alumbrado a un alimentador trifásico	114
4.9 Transformadores y equipos de media tensión	115
4.10 Fórmulas eléctricas	116
4.11 Unidades eléctricas	117
4.12 Postes	117
4.13 Detalles de obra civil registros, bases y ductos, para baja tensión.	122
Registros	122
Bases	125
Ductos	127
4.14 Desarrollo de planos	127
Generalidades	127
Plano Maestro	127
Planos y documentos del proyecto de iluminación	128
Planos del proyecto eléctrico	128
Planos del proyecto civil	129
Incremento de Umbral (TI)	129

5. CRITERIOS PARA EL DISEÑO DE ILUMINACIÓN 133

5.1 Objetivo del alumbrado vial	133
5.2 Factores para el diseño de iluminación	134
Requerimientos para conductores	134
Campo visual del conductor	135

Visibilidad	137
Deslumbramiento y contaminación visual	138
Contaminación visual	140
Inconvenientes de los recubrimientos oscuros	142
Ventajas de los recubrimientos claros	143
Elección correcta de las lámparas	144
5.3 Contaminación lumínica	148
Definición	148
Causas	148
Efectos	149
Soluciones	150
6. ILUMINACIÓN DE CARRETERAS	151
6.1 Iluminación de carreteras	151
Uniformidad de luminancia de la carpeta en la carretera o calle	153
6.2 Pavimentos	158
6.3 Nivel de luminancia	161
6.4 Confort Visual	163
6.5 Nivel de Iluminación	164
6.6 Clasificación de carreteras según la CIE	168
Selección de clases de alumbrado	169
Clases de recubrimientos mojados	172
Tramos singulares	172
Cuadro comparativo de niveles de iluminancia y luminancia	174
6.7 Tipos de Carreteras	175
El tipo A1 clasificación CIE corresponde al tipo A4S de la SCT con cuerpos separados	175
El tipo A1 clasificación CIE corresponde al tipo SCT A 4 (un cuerpo con camellón)	177
Carretera Tipo A2 un cuerpo	179
6.8 Método de los 21 puntos	182
6.9 Ejemplo de cálculo de iluminación y sistema eléctrico	183
Tramo de carretera (1 km) tipo A 2	183
6.10 Análisis comparativo de costos	189

Contenido

6.11 Iluminación de Puentes	191
Generalidades	191
Iluminación de Puentes	191
Ejemplo de cálculo de iluminación de un tramo de Puente Carretero	192
6.12 Aplicación del método de los 21 puntos	194
Niveles de iluminación a piso en lux sobre los carriles de alta velocidad del puente	195
6.13 Entronques carreteros	198
Entronque PSV (Paso Superior Vehicular)	198
Entronque PIV (Paso Inferior Vehicular)	200
6.14 Iluminación en Boulevard	202
6.15 Iluminación en Viaducto	204
6.16 Iluminación en Zonas Urbanas	205
Ubicación de postes de alumbrado	206
6.17 Recomendaciones de poda de árboles	209
6.18 Análisis de costos de operación y mantenimiento	210
Análisis comparativo de costos de energía eléctrica mensual por Km.	211
CONCLUSIÓN DE ANÁLISIS DE COSTOS	217
6.19 NORMA APLICABLE	219
Método de cálculo	221
Consideraciones generales	221
Metodología	222

7. ILUMINACIÓN DE TÚNELES 223

7.1 Introducción	223
7.2 Clasificación de Túneles	225
Túnel Corto	226
Túnel Mediano y Largo	226
7.3 Efecto Visual	228
Efecto de inducción	228
Efecto de adaptación	229
Luminancia de velo	229
Efecto Flicker	232
Deslumbramiento (TI)	234

7.4	Factores para el diseño de alumbrado	235
	Distancia de seguridad de frenado (DSF)	235
	Características del túnel	235
	Luminancia en Túnel	236
7.5	Tipos de alumbrado	238
	Simétrico	238
	Asimétrico	239
7.6	Luminarias	240
7.7	Alumbrado Diurno de Túneles largos	240
	Iluminación de túneles largos	240
	Luminancia en las diferentes zonas del túnel	242
	Luminancia en la zona de acceso	244
	Luminancia en zona de umbral	247
	Luminancia y longitud de la zona de transición	248
	Luminancia en la zona central	250
	Luminancia en la zona de salida	251
7.8	Alumbrado Diurno de Túneles Cortos y Pasos Inferiores	253
	Alumbrado diurno	254
7.9	Alumbrado nocturno	254
7.10	Casa de máquinas	257
	Sistema Dinámico de Energía Ininterrumpida Sin Baterías	258
7.11	Sistemas Auxiliares	259
	Control de incendios	259
	Requerimientos de túneles carreteros	259
7.12	Diseño de alumbrado de túnel	261
	Términos de referencia para proyecto de túnel	261
	Ejemplo de iluminación de túneles	262
	REFERENCIAS	269
	BIBLIOGRAFÍA	270
	ANEXO	A-1

Como consecuencia del avance tecnológico en las diversas áreas de la construcción en nuestro país, el alumbrado vial y de carreteras ha tenido gran auge, por ello LA SECRETARIA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES, consideró de imperiosa necesidad publicar EL MANUAL DE ALUMBRADO VIAL, con el fin de que las obras de alumbrado tanto en vialidades urbanas como en carreteras, sean de una máxima eficiencia, calidad y economía.

Este MANUAL se elaboró para satisfacer las necesidades de nuestro país en esta especialidad, tomando en cuenta las recomendaciones, principios y técnicas de los Comités Nacionales de los países miembros de la “COMISION INTERNACIONAL DE L'E'CLAIRAGE.” (C.I.E.).

Año 1988

La SECRETARÍA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES como eje principal del gran avance tecnológico en la construcción de carreteras y vías terrestres que tiene nuestro país, investiga el desarrollo internacional en el campo de la iluminación de carreteras y vialidades exponiendo los puntos de mayor importancia en el presente manual.

El objetivo del MANUAL DE ILUMINACIÓN VIAL DE CARRETERAS, ENTRONQUES, VIADUCTOS, PASOS A DESNIVEL Y TÚNELES, es lograr que las Autoridades Gubernamentales de los Estados y Municipios, así como las empresas constructoras responsables de los proyectos y obras de alumbrado adquieran un amplio criterio y conocimiento de la especialidad; de tal manera que se logren instalar sistemas de iluminación de máxima eficiencia, seguridad y economía reflejados en los costos de operación y mantenimiento.

El presente Manual nos coloca a la altura tecnológica de los países miembros de la “Commission Internationale de l’Eclairage” (CIE) que es la que agrupa a los principales organismos de iluminación a nivel mundial.

La característica principal de este manual es mostrar objetivamente todos los aspectos que intervienen en el diseño de sistemas de alumbrado público.

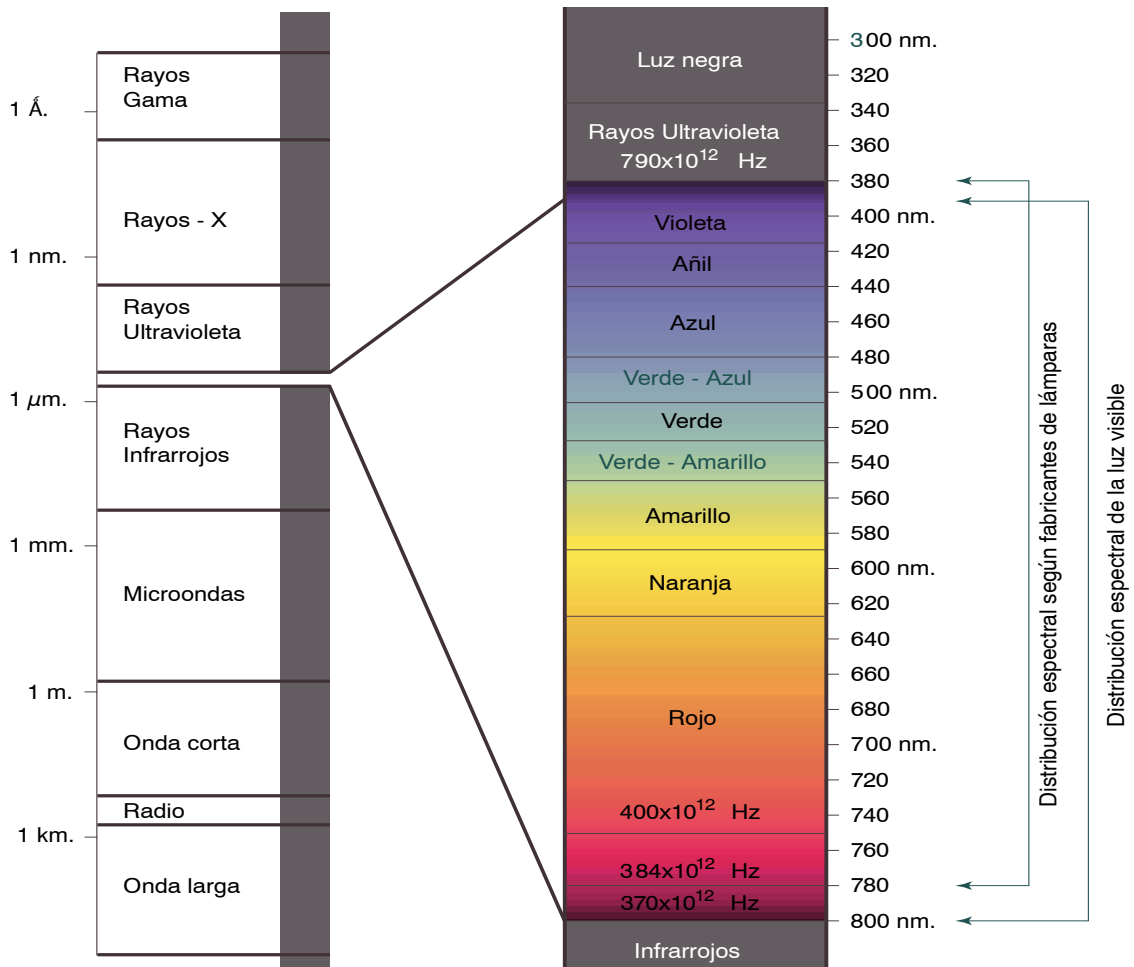
Actualmente los sistemas de iluminación con base en LEDs para alumbrado público en vialidades principales se encuentran en evolución; por lo que la S.C.T. sigue de cerca el desarrollo de ésta y otras tecnologías, estudiando y analizando sus posibilidades para que en su momento se apliquen de acuerdo a las normativas vigentes y así continuar a la vanguardia de la tecnología en Iluminación en nuestro país.

Año 2015

1.1 La luz

La luz es energía en forma de radiación electromagnética de muy alta frecuencia, que el ojo detecta en el rango de longitudes de onda entre 380 nanómetros (color violeta) hasta 770 nanómetros (color rojo), a este rango se le denomina espectro visible.

Figura 1.1 Espectro de radiaciones electromagnéticas (Dominio Público)



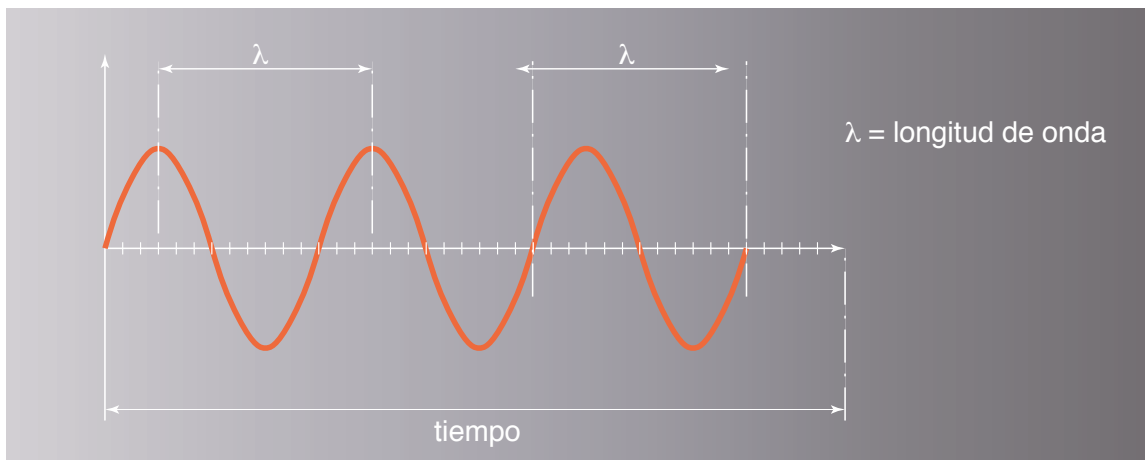
Las longitudes de onda ligeramente inferiores a la luz visible corresponden a los rayos ultravioleta y las longitudes de onda superiores a la luz visible se conocen como ondas infrarrojas. Å

Otras longitudes de onda de la radiación electromagnética, entre las cuales se incluyen los Rayos Gamma, Rayos X, Ondas de Radio, Microondas, no son detectables para el ojo humano.

La radiación electromagnética viaja a través del espacio en diminutos "haces" llamados fotones. Un fotón es energía pura y carece de masa.

La energía de un fotón produce un campo electromagnético alrededor del fotón. El campo es invisible y no puede ser detectado a menos que exista un objeto material en el mismo sobre el que pueda ejercer algún tipo de fuerza, esto quiere decir que la radiación electromagnética visible (la luz), no se ve, lo que se ve son los objetos iluminados.

Figura 1.2 El campo magnético que rodea al fotón fluctúa de su máximo positivo a su máximo negativo a medida que el fotón viaja (Dominio Público)



Las longitudes de onda son vibraciones y se expresan con el símbolo λ (lambda); a la cantidad de vibraciones que se dan en un segundo se le llama frecuencia y se expresa en Hertz (Hz).

La relación que hay entre la frecuencia y la longitud de onda se expresa con la siguiente fórmula:

$$\lambda = c / f$$

En donde "c" es la velocidad de propagación de la luz en el vacío (300,000 km/seg = 3×10^8 m/seg) y "f" es la frecuencia en Hz, en esta expresión se establece una relación inversa entre los valores de la longitud de onda y la frecuencia, ya que el valor de " λ " se incrementa cuando el de la frecuencia disminuye y viceversa.

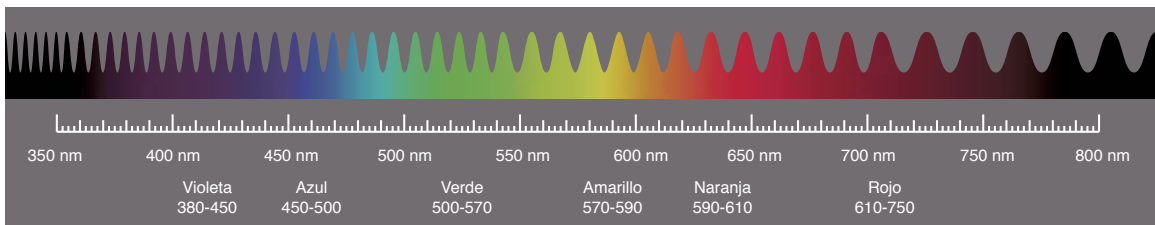
Las longitudes de onda de la luz visible se miden en nanómetros. Un nanómetro o milimicra (nm o $\mu\mu$) es la milésima parte de una micra (μ), por lo que corresponde a la millonésima parte de un milímetro.

$$1 \text{ nm} = 0.001 \mu = 0.000 \text{ 001 mm} = 0.000 \text{ 000 001 m} = 10^{-9} \text{ m.}$$

1.2 El color

Todos los fotones viajan a través del espacio a la misma velocidad (300,000 km/seg), pero el campo electromagnético de algunos fotones fluctúa más rápido que el de los otros. Cuanta más energía tiene un fotón, más rápida es su fluctuación. El ojo humano puede observar el efecto de esta diferencia en los niveles de energía del fotón, así como en el índice de fluctuación del campo. Este efecto recibe el nombre de color.

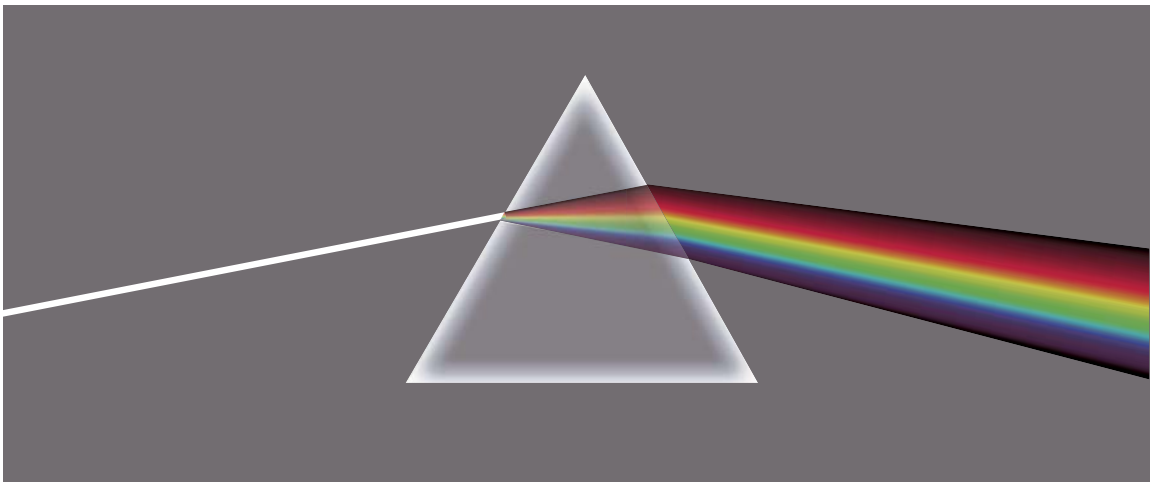
Figura 1.3 Longitud de onda de los colores (Dominio Público)



El color es la interpretación que hace nuestro sistema visual de la composición espectral de la luz que detecta el ojo. Todo cuerpo iluminado absorbe todas o parte de las ondas electromagnéticas y refleja las restantes. Por ejemplo la luz a 450 nm no es azul por ninguna propiedad, sino porque ese es el efecto que provoca en nuestro sistema visual.

La luz blanca puede ser descompuesta en todos los colores del espectro por medio de un prisma. En la naturaleza esta descomposición da lugar al arcoiris cuando las gotas de lluvia funcionan como pequeños prismas al recibir la luz del sol.

Figura 1.4 Descomposición de la luz (Dominio Público)

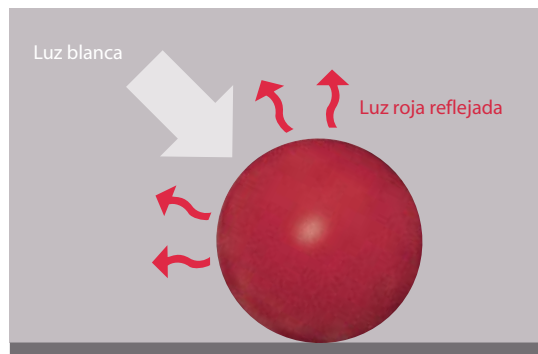


El color blanco resulta de la superposición de todos los colores, mientras que el negro es la ausencia de luz, el color sólo existe en la mente y no es una propiedad intrínseca de la luz.

El color con el que se percibe un cuerpo depende de la cantidad de luz que emite, refleja, transmite y absorbe para cada longitud de onda del espectro visible. Se puede asociar un color a cada rango de longitud de onda del espectro visible. El ojo humano sólo percibe el color cuando la iluminación es abundante. Con poca luz vemos en blanco y negro.

Un objeto parece rojo porque a los ojos sólo llega la luz roja que refleja, el resto de colores del espectro son absorbidos por el objeto. Si se ilumina con una fuente de luz carente del componente rojo no se reflejaría nada y se vería negro (o no se vería).

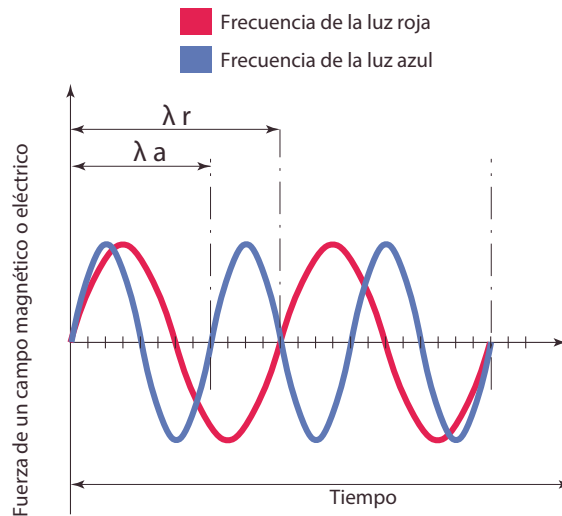
Figura 1.5 Un objeto con superficie roja absorbe todos los colores del espectro a excepción del rojo, el cual es reflejado de vuelta (Dominio Público)



La luz roja, por ejemplo, tiene menos energía que la luz azul, de manera que el índice de fluctuación de su campo electromagnético es un tercio más lenta.

Por tanto, la luz se puede entender como la suma de luces de distintas longitudes de onda.

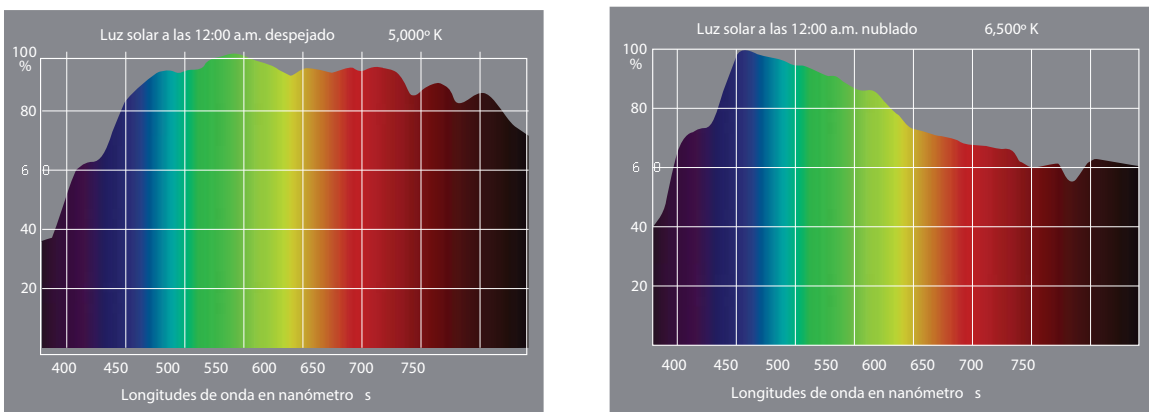
Figura 1.6 Índice de fluctuación de un campo electromagnético (Dominio Público)



Distribución espectral

Una emisión luminosa está compuesta por ondas de distintas longitudes de onda (una mezcla). La distribución espectral, indica las diferentes longitudes de onda en nanómetros (nm) y sus valores relativos de energía respecto a la máxima radiada que se toma como el 100%.

Figura 1.7 Ejemplos de distribución espectral visible (Fuente: CIE)



El sentido de la vista es integrador; percibe la luz como un todo, y no puede distinguir el color puro dentro de una mezcla. Al contrario que el sentido del oído, con el cual podemos distinguir entre varias longitudes de ondas de sonidos que se emitan a la vez.

La vista suma todas las longitudes de onda del espectro visible, haciéndolas indistinguibles, el color resultante de una mezcla de luces es más parecido al color de la luz con mayor luminancia en una relación como la indicada en la figura 1.7.

La descripción más completa de las características de color de una lámpara sólo puede ofrecerse mediante una gráfica detallada de la potencia relativa emitida en las distintas regiones del espectro. Esta gráfica, con barras de color para indicar los colores correspondientes a las distintas longitudes de onda, resulta muy útil para obtener una impresión visual del equilibrio cromático en una lámpara.

Figura 1.8 Distribución espectral (Dominio Público)

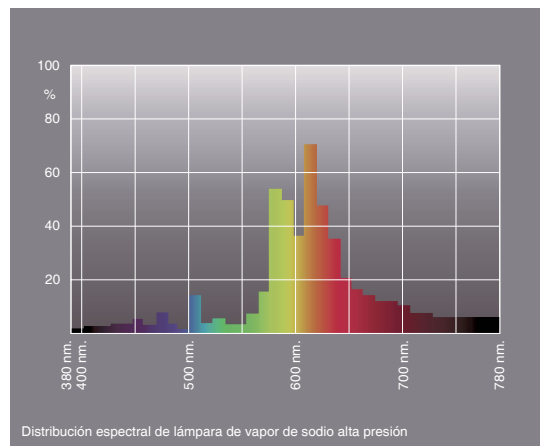
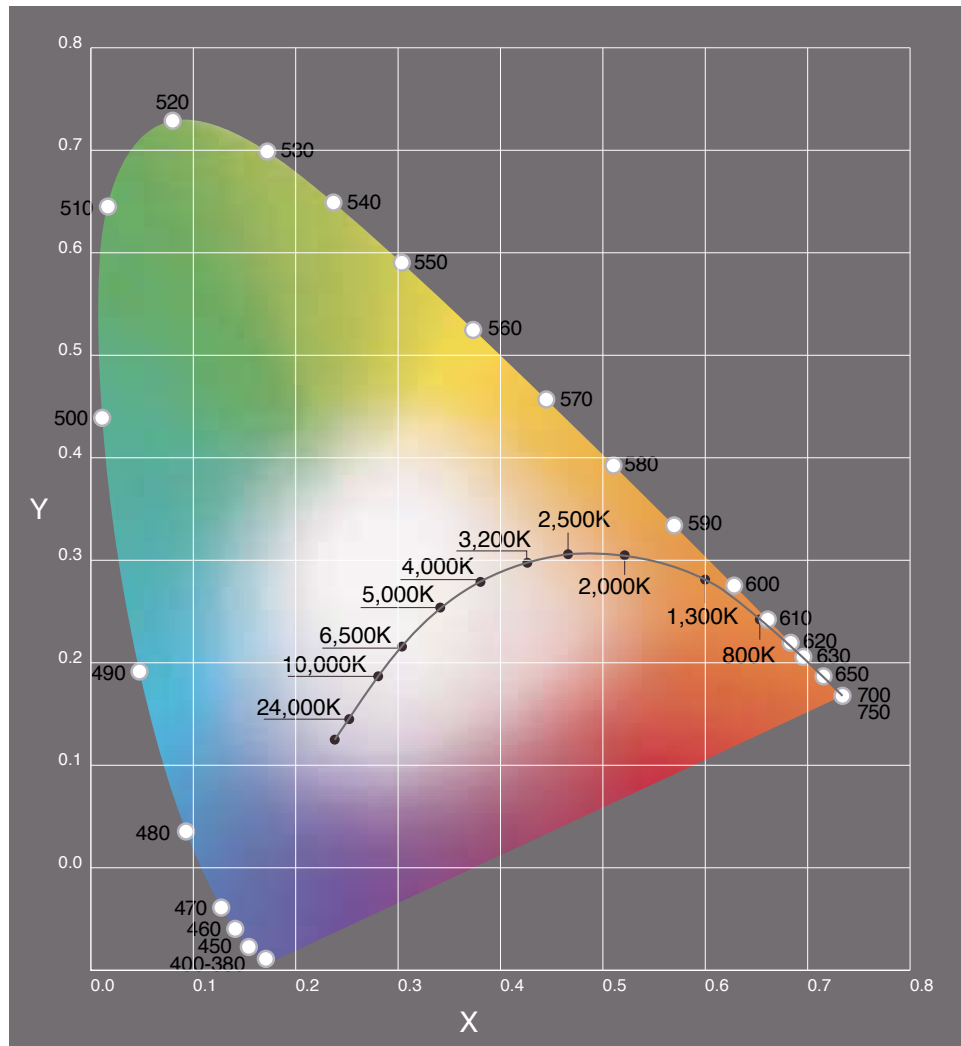


Diagrama cromático CIE

La Comisión Internationale de l'Éclairage (CIE) ha definido como estándar para la identificación de colores el Diagrama Cromático CIE, donde cada color está representado por las coordenadas X, Y, Z, cuya suma es siempre la unidad ($X + Y + Z = 1$) y cuando cada una de ellas vale 0.333 corresponde al color blanco. Estas coordenadas se obtienen a partir de las potencias específicas para cada longitud de onda, (valor triestímulo X, Y, Z).

En este diagrama se representan todos los colores que el ojo humano es capaz de ver. (Los colores mostrados en el diagrama sólo son ilustrativos y no representan el color real).

Figura 1.9 Diagrama cromático de la CIE (Dominio Público)



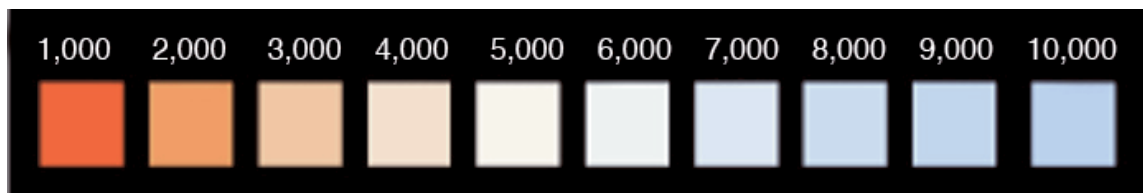
Temperatura de color

En la figura 1.9 (Diagrama Cromático CIE), la curva interna representa el color que emite el cuerpo negro en función de su temperatura. Un cuerpo negro es un objeto teórico o ideal que absorbe toda la luz y toda la energía radiante que incide sobre él. La curva de temperatura de color del cuerpo negro se ubica en la región central blanca (5,000 - 6,000). Ver Figura 1.10.

La temperatura de color correlacionada TCC (medida en grados Kelvin) o temperatura de color, es una medida científica para describir el nivel de “calidez” o “frialdez” de una fuente lumínica. Se basa en el color de la luz emitida por una fuente incandescente.

Al calentar una pieza de metal (un radiador de cuerpo negro teórico), cambia de color rojizo a naranja, amarillo blanco, blanco azulado. El color de la luz emitida por un objeto incandescente depende sólo de la temperatura. Se puede utilizar esta medida para describir el color de una fuente de luz por su “temperatura de color”.

Figura 1.10 Temperaturas de color en grados Kelvin (Dominio Público)



Cuando se dice que una lámpara tiene una temperatura de color de 3,000 grados Kelvin, significa que un metal ardiente a 3,000 grados Kelvin producirá una luz del mismo color que la lámpara. Si el metal se calienta hasta 4,100 grados Kelvin, generará una luz mucho más blanca.

La luz solar directa corresponde a unos 5,300 grados Kelvin, mientras que la luz diurna, mezclada con la luz del cielo es de unos 6,000 grados Kelvin o más. Una lámpara incandescente convencional tiene un filamento a 2,700 grados Kelvin, y por definición una temperatura de color de 2,700 grados Kelvin.

Tabla 1.1 Apariencia de color (Fuente: CIE)

Grupo de apariencia de color	Apariencia de color	Temperatura de color (K)
1	Cálido	Por debajo de 3,300
2	Intermedio	De 3,300 a 5,300
3	Frío	Por encima de 5,300

Los parámetros de temperatura de color se refieren específicamente al color de la luz, más no a su composición espectral que es decisiva para la reproducción de colores. De esta manera dos fuentes de luz pueden tener un color similar y tener a su vez unas propiedades de reproducción cromática muy distintas.

Tabla 1.2 Índice de Reproducción Cromática (IRC) (Fuente: CIE)

Fuentes Luminosas	T _c (°K)	IRC
Cielo azul	10,000 a 30,000	85 a 100
Cielo nublado	7,000	85 a 100
Luz solar día	6,000	85 a 100
Lámparas de descarga (excepto Na)		
Luz día (halogenuros)	6,000	96 a 100
Blanco neutral	3,000 a 5,000	70 a 84
Blanco cálido	Menos de 3,000	40 a 69
Lámparas de descarga (Na)	2,900	Menos de 40
Lámpara incandescente	2,100 a 3,200	85 a 100
Lámpara fotográfica	3,400	85 a 100
Llama de vela	1,800	40 a 65

Índice de reproducción cromática (IRC) es una medida de la capacidad que una fuente luminosa tiene para reproducir fielmente los colores de varios objetos en comparación con una fuente de luz natural o ideal. El (IRC) fue creado por la CIE.

Con la finalidad de simplificar las especificaciones de los índices de rendimiento en color de las lámparas utilizadas en iluminación, se clasifican en grupos de rendimiento en color como se estable en la siguiente tabla.

Tabla 1.3 Grupos de rendimiento de color de las lámparas (Fuente: CIE)

Grupo rendimiento en color	Rango de rendimiento en color (IRC)	Apariencia de color	Ejemplos para uso preferible	Ejemplos para uso aceptable
1	IRC	Cálido Intermedio Frío	Igualaciones de color, exploraciones clínicas, galerías de arte	Exposiciones
1B	90 ≥ IRC	Cálido Intermedio	Casas, hoteles, restaurantes, tiendas, oficinas, escuelas	Telares
		Intermedio Cálido	Imprentas, industria de pintura y textiles	
2	80 > IRC ≥ 60	Cálido Intermedio Frío	Trabajo Industrial	Oficinas, escuelas
3	60 > IRC ≥ 40	Cálido	Industrias grandes	Automotriz
4	40 > IRC ≥ 20	Cálido	Vialidades	Carreteras

La visión y el ojo

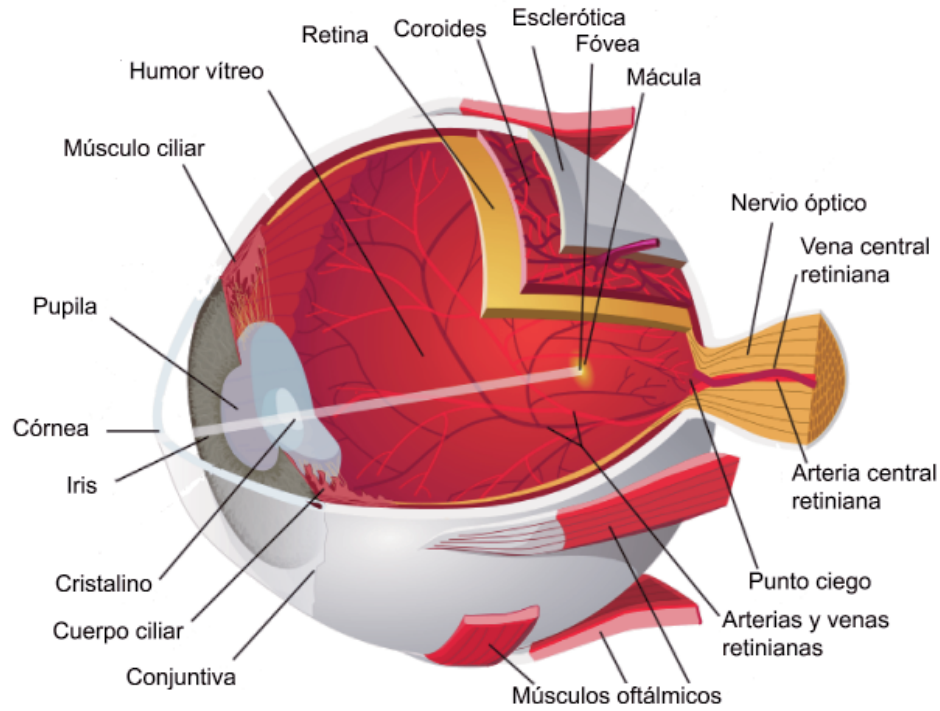
El ojo es el órgano del cuerpo humano capaz de percibir las radiaciones electromagnéticas que denominamos "colores". Es el órgano fisiológico del sentido de la vista.

Para que se realice el proceso de la iluminación, como acción y efecto de iluminar y ver, se requieren tres agentes:

- Fuente productora de luz o radiación luminosa.
- Objeto a iluminar que se necesita que sea visible.
- El ojo, quien recibe la energía luminosa y la transforma en imágenes, mismas que son enviadas al cerebro para que éste las interprete.

La neurofisiología, es la rama que estudia los componentes del ojo, así como el proceso que se realiza desde que la luz le llega y pasa por las vías y centros visuales hasta que es interpretada por el cerebro.

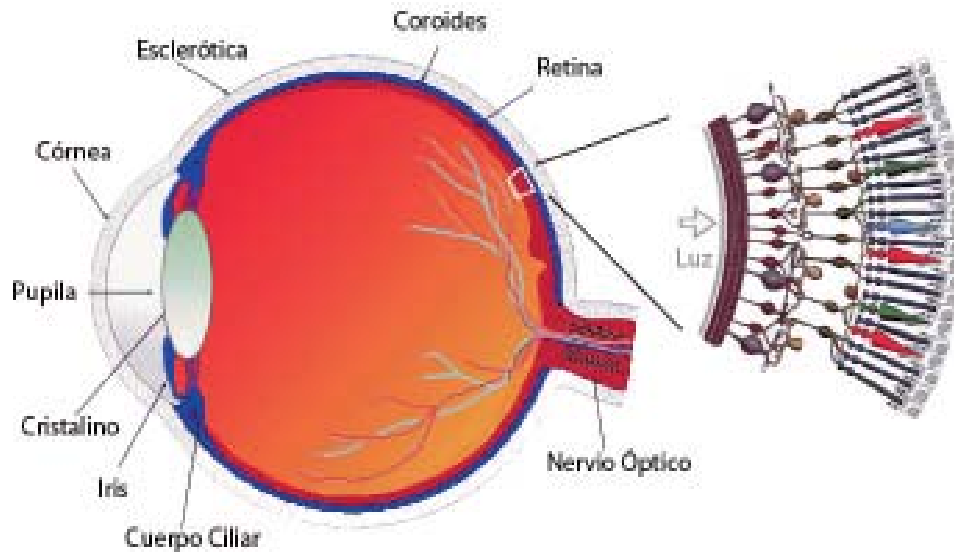
Figura 1.11 Corte longitudinal esquemático de la constitución anatómica del ojo humano (Dominio Público)



La parte posterior del globo ocular está recubierta casi totalmente por una capa de células sensibles a la luz. Esta capa fotosensible se denomina retina, y es en ella donde se perciben los estímulos visuales.

La luz entra en el ojo a través de la córnea y es enfocada por el cristalino (una lente adaptable) en la retina. El iris de la pupila puede adaptar su tamaño para dejar pasar más o menos luz, según su intensidad; esta capacidad disminuye con la edad.

Figura 1.12 Corte transversal del ojo (Dominio Público)



La luz que llega a la retina se convierte en señales eléctricas que son transmitidas al cerebro a través del nervio óptico. Esto se realiza gracias a las células fotosensibles denominadas conos y bastones, situadas en la capa más profunda de la retina.

En cada ojo humano existen cerca de siete millones de conos y 120 millones de bastones. Dependiendo de las proporciones entre estas distintas células fotosensibles se tiene una mayor sensibilidad a una gama de colores o a otra.

Los conos y los bastones contienen unos fotopigmentos que absorben la luz de una determinada longitud de onda de ésta. Cuando un fotopigmento absorbe un fotón luminoso cambia su estructura molecular y libera energía, ésta es transmitida en forma de un impulso eléctrico que contiene información sobre el estímulo.

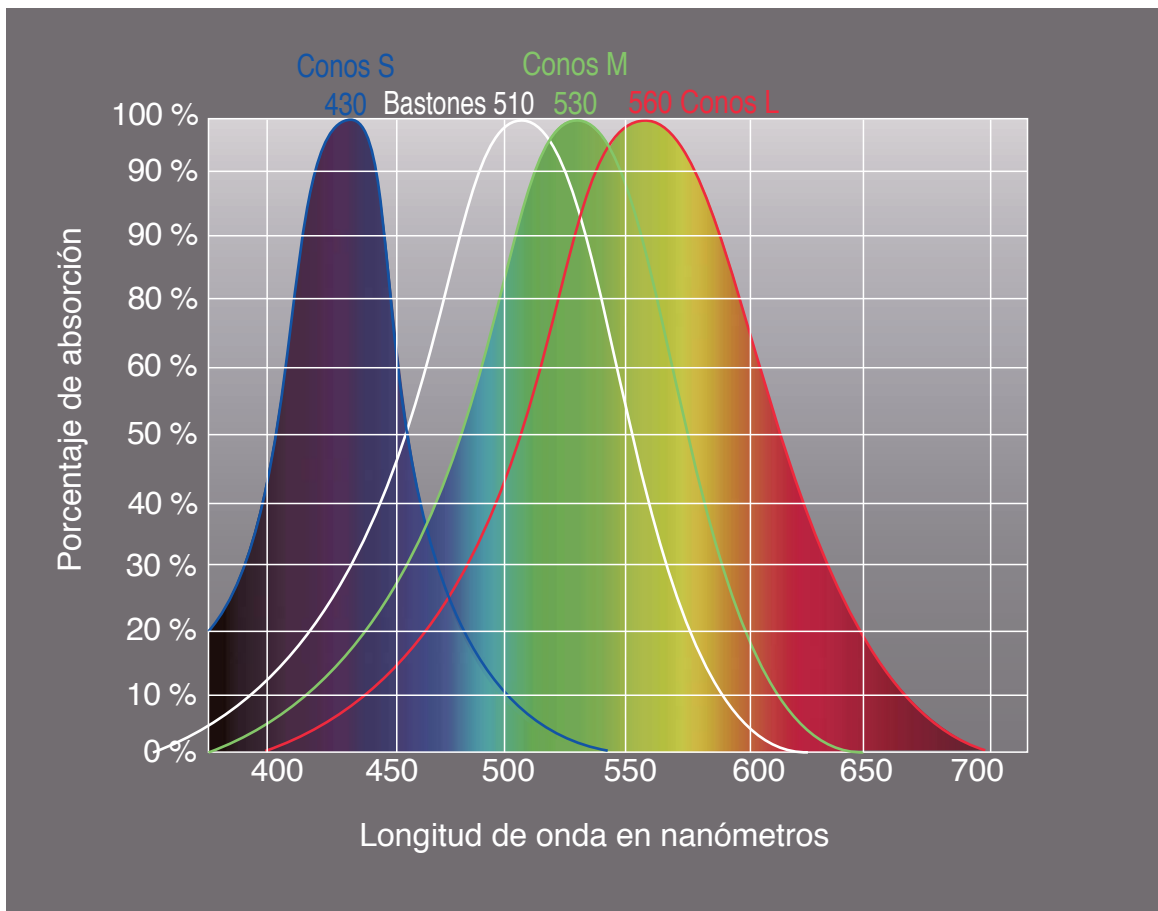
Los conos y bastones actúan de un modo bien diferenciado. Los bastones son muy sensibles y se activan cuando existen niveles muy bajos de iluminación (por debajo de los 10 luxes). Su máximo de sensibilidad se halla en la zona de los 510 nm (en la zona de los verdes).

Este tipo de visión, denominada escotópica, sólo utiliza un tipo de sensor, por lo que es monocromática. Durante el día los bastones son los encargados de mandar las señales para ajustar el diámetro de la pupila según la cantidad de luz exterior.

Para ver el color es necesario el uso de los conos, responsables de la llamada visión fotópica. Existen tres clases de conos, cada una de ellos con un pigmento fotosensible distinto. Los tres fotopigmentos tienen su capacidad máxima de absorción hacia los 430, 530 y 560 nm de longitud de onda y por eso se los suele llamar "azules", "verdes" y "rojos", por el supuesto "color de la luz" al que tienen una sensibilidad óptima.

En realidad las luces monocromáticas a 430, 530 y 560 nm no causan realmente la percepción de azul, verde y rojo, sino la de violeta, azul verdoso y amarillo verdoso. Por eso es más lógico denominarlos conos cortos "S", conos medios "M" y conos largos "L", por el tipo de longitud de onda a la que son sensibles comparativamente.

Figura 1.13 Absorción óptima de conos y bastones por la longitud de onda (Fuente: CIE)



La visión en color o fotópica está basada en la existencia de tres tipos de conos distintos, pues cada longitud de onda provoca una respuesta proporcional única en cada tipo de cono, dependiendo de su sensibilidad a longitudes de onda cortas, medias o largas.

Gracias a los conos es posible distinguir con precisión pequeñas diferencias en la composición de longitudes de onda de la luz.

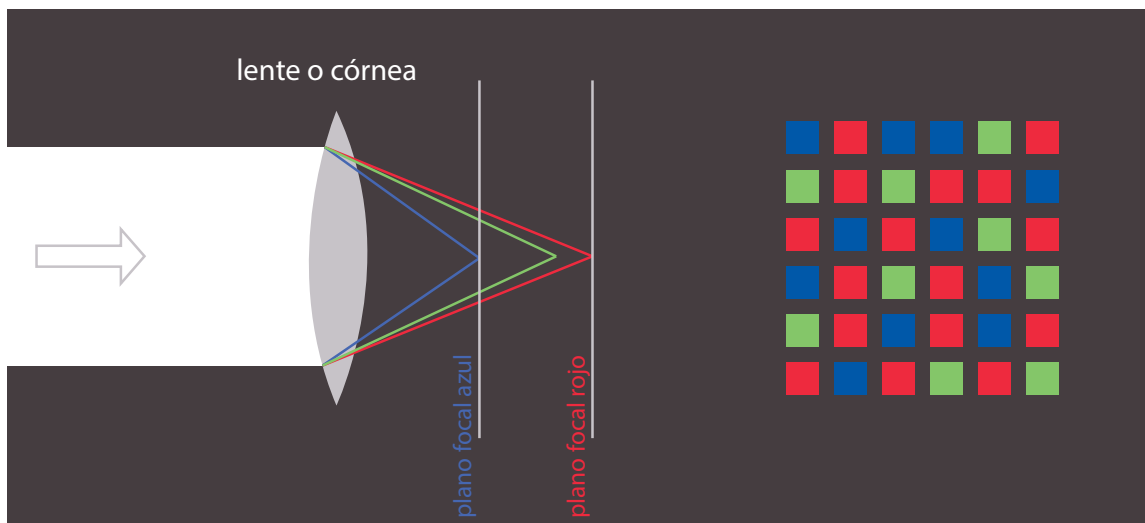
Aberración cromática

El ojo humano no es capaz de enfocar al mismo tiempo en las tres zonas del espectro en las que se hallan los picos de absorción óptima de los pigmentos fotosensibles de los tres tipos de conos, ya que la refracción en la córnea y el cristalino es mayor para las longitudes de onda corta que para las largas.

A diferencia de otros sistemas ópticos como las cámaras fotográficas, en donde la aberración cromática se reduce colocando dos lentes juntas; el ojo humano no tiene capacidad para la corrección de las aberraciones cromáticas. Las longitudes de onda de los picos óptimos de sensibilidad de los conos medios y largos están muy próximas, por lo que el enfoque óptimo del cristalino sobre la retina se halla en los 560 nm de longitud de onda.

Las longitudes de onda más cortas (colores azules) se reciben por la retina como imágenes levemente borrosas. En la siguiente figura se muestra cómo el ojo no puede enfocar el color rojo y el color azul al mismo tiempo, o el color verde y azul al mismo tiempo, pero sí el color verde y el color rojo.

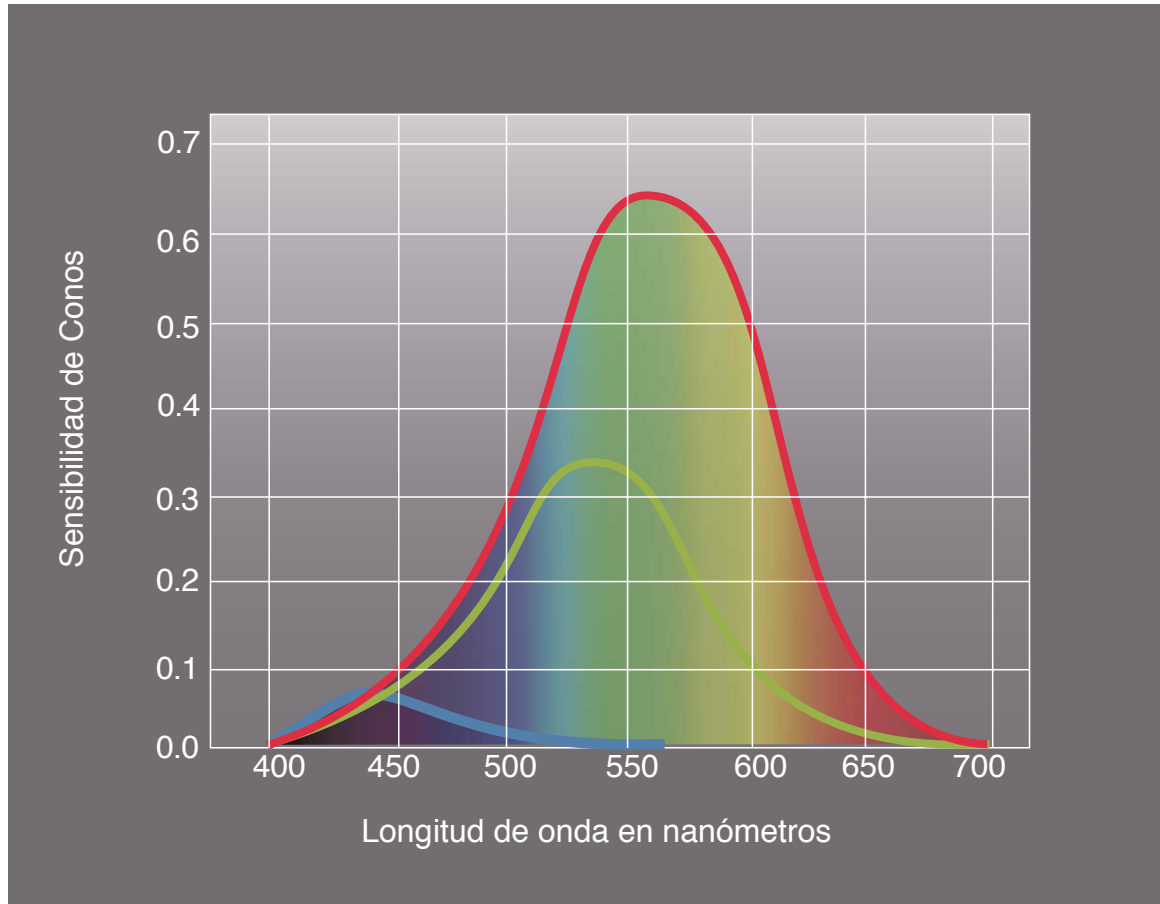
Figura 1.14 Aberración cromática (Dominio Público)



En una carretera este fenómeno es importante para un conductor, ya que el contraste y la rápida percepción de los objetos o personas es fundamental para la seguridad de todos; si se pretende iluminar las vialidades con "luz blanca" proveniente de leds o aditivos metálicos, se debe tomar en cuenta que su desgaste natural "corre" el espectro de color hacia el azul, ocasionando pérdida del contraste al no poder enfocar los objetos con precisión y bajar así la capacidad óptica del conductor.

Debido a esto, la retina tiene 40 veces más conos sensibles a las longitudes largas (rojos) que conos sensibles a longitudes cortas (azules). Por otro lado, los conos y bastones no están distribuidos de manera uniforme en la retina, la fovea (parte central de la retina), únicamente contiene conos, pues en la fovea es donde se tiene la mayor resolución visual.

Figura 1.15 Cantidad de los diferentes conos en la retina (Fuente: CIE)



Al mirar un espacio iluminado con poca luz, por ejemplo, en la penumbra por la noche, la agudeza visual es baja, debido a que no actúan los conos y no se distinguen los colores ni los detalles.

A esta visión nocturna se le conoce como visión escotópica, en ella intervienen esencialmente los bastones que captan con gran sensibilidad la mayor o menor cantidad de luz, así como el movimiento de los objetos.

En esta condición de visión escotópica la luz blanca intensa fuerza a la vista a requerir de varios minutos para volver a adaptarse a los niveles bajos de iluminación (deslumbramiento). En los bastones existe una sustancia llamada rodopsina, que permite la alta sensibilidad de estas células, pero que es destruida por la fuerte luz y tarda más de 15 minutos en volverse a regenerar, esta rodopsina no es sensible al rojo, razón por la cual, esta luz se utiliza en prácticas de astronomía para iluminar objetos durante la noche sin molestar la sensibilidad de la vista en la oscuridad.

La sensibilidad de los conos y bastones decrece conforme la cantidad de luz aumenta.

Ello justifica que en alumbrados públicos de avenidas, carreteras y grandes superficies se efectúe el alumbrado con lámparas de vapor de sodio que no reproducen fielmente los colores pero aportan gran cantidad de luz. Lo cual es importante para la seguridad del conductor y del peatón, pues el cerebro reacciona más rápido al movimiento de los objetos aunque no se aprecien con detalle los colores.

Por el contrario, con la luz diurna o cuando el nivel de iluminación se eleva lo suficiente, los objetos se ven con precisión y detalle porque actúan los bastones y principalmente los conos, con lo cual se pueden distinguir los colores. A la visión con luz diurna se le llama visión fotópica.

El campo de visión binocular del hombre es de aproximadamente unos 180° en el plano horizontal y de unos 130° en el plano vertical.

La persistencia de las imágenes en la retina es del orden de 0.15 segundos, esto permite tener la visión de los objetos en movimiento.

De los objetos iluminados o con luz propia parten los rayos luminosos, que atraviesan la córnea y el humor acuoso, hasta llegar al cristalino, donde se refractan y van a la retina, en la cual se forma la imagen de los objetos, invertida y de tamaño más pequeño que el natural.

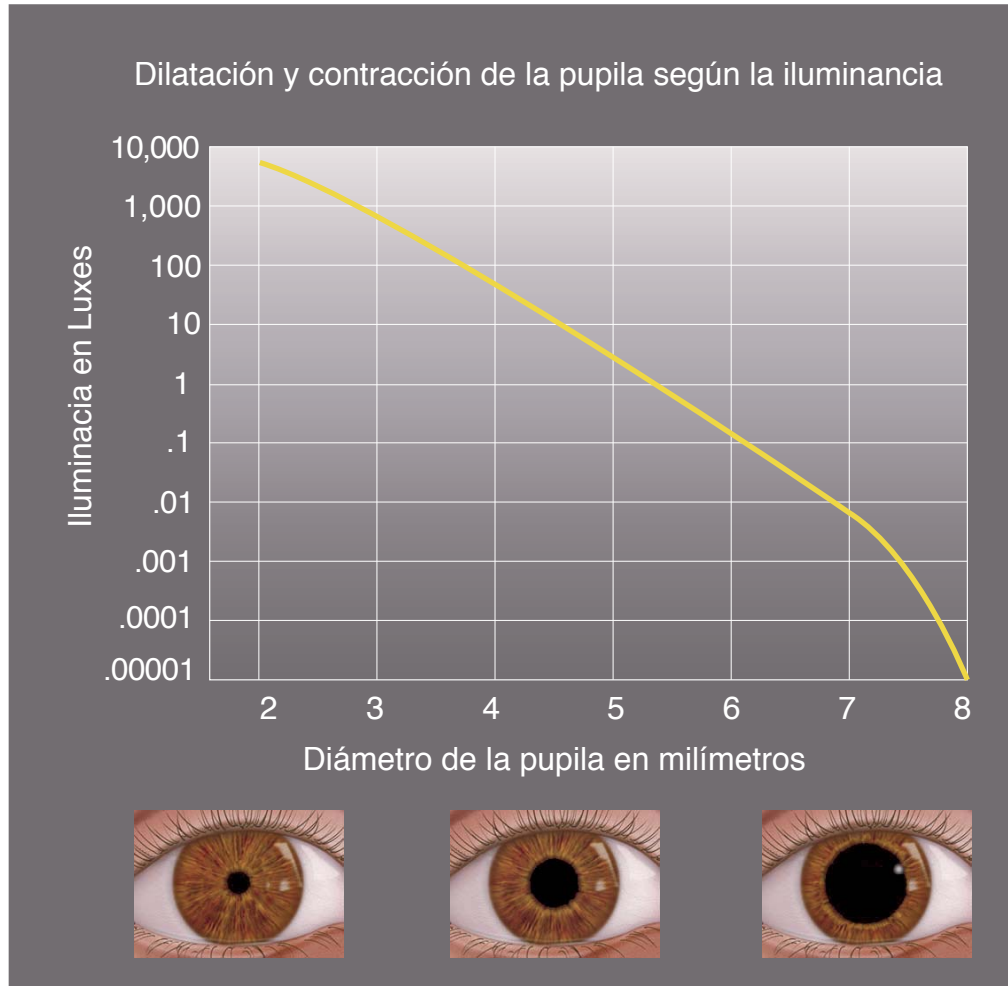
El mismo efecto ocurre con una cámara fotográfica. En la córnea, actúan las células fotorreceptoras, transformando la energía en impulso eléctrico enviándola a través del nervio óptico al cerebro, donde se recompone la imagen y se ve en posición correcta y con los colores que tiene. Al captar cada uno de los ojos la imagen del objeto desde ángulos diferentes, el cerebro interpreta la percepción de la profundidad obteniendo el relieve, lo que se denomina visión estereoscópica, que es el uso coordinado de los dos ojos para producir la visión de una sola imagen.

Tabla 1.4 Similitud entre el ojo humano y una cámara fotográfica (Fuente: Philips)

Ojo humano	Cámara fotográfica
Cristalino (controla acomodación)	Objeto (ajusta distancia entre objeto y película)
Pupila (controla adaptación)	Diafragma - Obturador (adapta exposición y cantidad de luz)
Pigmento de los fotorreceptores	Sensor de imagen ó CCD (en cámaras digitales)
Retina (crea las imágenes))	Pantalla LCD (crea las imágenes)

El ojo es capaz de adaptarse a distintos niveles de iluminación gracias a los bastones que envían la información para que el diafragma (formado por el iris) pueda cambiar de diámetro, proporcionando un agujero central (la pupila) que varía entre 2 mm (para iluminación intensa) y 8 mm (para situaciones de poca iluminación).

Figura 1.16 El Iris controla el nivel de luz que llega a la Retina (Dominio Público)



Aquellas radiaciones de longitud de onda que están comprendidas entre 380 nm (ultravioleta) y 780 nm (infrarrojos), son transformadas por el ojo en luz. Fuera de esta gama el ojo no percibe nada. La luz blanca del medio día soleado es la suma de todas las longitudes de onda del espectro visible.

Si dichas radiaciones se hacen llegar al ojo y con la misma energía, se obtiene una curva de sensibilidad del ojo humano (Curva elaborada por la CIE).

En este sentido se deduce que las fuentes de luz artificial (lámparas) que emitan su radiación en las zonas centrales del espectro, tendrán mayor eficacia que las que la emitan en los bordes del mismo, aunque su reproducción cromática no sea apropiada para el ojo, el cual está acostumbrado a la luz blanca del sol, con todas las radiaciones completas.

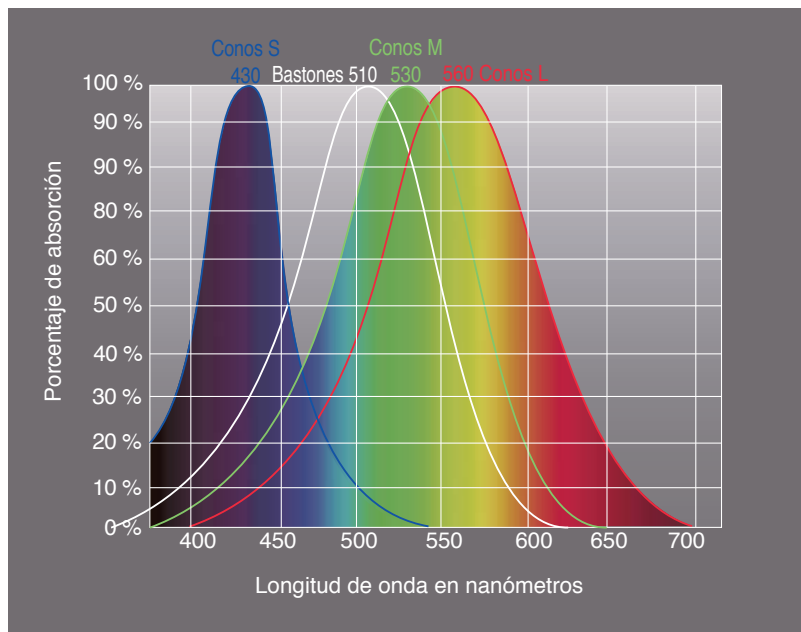
Por eso las lámparas de vapor de sodio alta presión son mucho más eficientes y seguras para las carreteras y vialidades rápidas, porque facilitan al ojo la captación de mayor cantidad de luz y contraste, al contrario de las de vapor de mercurio o de aditivos metálicos, en las que con el tiempo el espectro se corre hacia el extremo azul, ocasionando la pérdida de contraste.

Sensibilidad espectral del ojo humano

La sensibilidad del ojo humano a la luz de ciertas intensidades varía notoriamente entre los rangos de longitudes de onda comprendidos entre los 380 nm y los 800 nm.

En condiciones con luz de día, el ojo humano es más sensible en promedio a la longitud de onda de 555 nm, resultando como hecho que la luz verde en esta longitud da la sensación de mayor brillantez comparada con la luz de otras longitudes de onda.

Figura 1.17 Curva de sensibilidad del ojo a las radiaciones monocromáticas (Fuente: CIE)



En esta gráfica se observa lo que se denomina visión fotópica que es la visión de día, en la cual los conos son los responsables de la visión, determinando gran distinción de los colores, y en donde se tiene por lo menos varias candelas por m^2 ; cuando las luminancias son muy bajas, con niveles de centésimos de candela por m^2 , los que actúan son los bastones, que tienen mayor sensibilidad pero no dan respuesta a los colores, a esta visión nocturna se le denomina visión escotópica.

Sin luz no puede haber visión, y en la más completa oscuridad, el ojo no tiene actividad, por lo tanto no puede mandar al cerebro ninguna señal que se pueda detectar como visión, careciendo por tanto de información del medio que lo rodea. Por ello el primer elemento indispensable para la percepción visual es la existencia de “luz”, pero esta luz, que llega al ojo como luminancia, emitida por las fuentes de luz primaria o bien por la reflexión en los objetos de esa luz (fuente secundaria), proporciona “diferencias” de luminancias en todo el escenario visual, que el ojo percibe en forma de “brillo” si ve la sensación que mejor entendemos.

Este brillo es directamente proporcional a la intensidad luminosa e inversamente proporcional a la superficie luminosa que la emite; por ello una fuente luminosa de poca intensidad, y de poca superficie emisora, puede resultar más brillante que otra de alta intensidad luminosa, pero de gran superficie. Como ejemplo tenemos la diferencia entre dos lámparas incandescentes, del mismo flujo luminoso y potencia eléctrica; una con cristal transparente y la otra con cristal mate; la primera será mucho más brillante porque la superficie emisora es el filamento y en la segunda es todo el bulbo.

1.3 Deslumbramiento (E_{glare})

El deslumbramiento es un fenómeno de la visión que produce molestia a la vista y disminución en la capacidad para distinguir objetos, debido a una inadecuada distribución de luminancias, o como consecuencia de contrastes excesivos.

Este fenómeno se produce en el ojo al momento de penetrar en su interior un exceso de luz (o una gran intensidad de luz), la cual produce una enérgica reacción fotoquímica en las células de la retina que impiden el paso del impulso al nervio óptico, que no transmite nada al cerebro y se pierde la visión.

Figura 1.18 Ejemplo de deslumbramiento perturbador (Dominio Público)



El deslumbramiento en los conductores se debe principalmente a los siguientes factores:

- 1) Los faros de los vehículos que circulan en el sentido opuesto.
- 2) Los anuncios publicitarios excesivamente iluminados y que se encuentran dentro del campo visual del conductor.
- 3) Las luminarias con refractor y non-cut off.

Existen dos tipos de deslumbramiento; el psicológico y el fisiológico.

Deslumbramiento molesto

El deslumbramiento de tipo psicológico o molesto, produce una sensación desagradable y aunque no se pierda la visión de los objetos, produce fatiga en el conductor, debido a que la pupila se ve forzada a estar ajustándose continuamente a los cambios de luminosidad.

Deslumbramiento perturbador

En el deslumbramiento de tipo fisiológico o perturbador, es donde se llega a perder la visión. Todos los deslumbramientos deben ser evitados, puesto que representan una agresión para el ojo del conductor y son causa de accidentes viales.

La medición de la pérdida de visibilidad^{REF1} producida por el deslumbramiento^{REF2} perturbador, ocasionado por las luminarias, se efectúa mediante el incremento de umbral de contraste. Su símbolo TI , carece de unidades y su expresión, en función de la luminancia de velo L_v y la luminancia media de la calzada L_m (entre 0.05 y 5 cd/m^2), es la siguiente:

$$TI = 65 \frac{L_v}{(L_m)^{0.8}} \text{ (en \%)}$$

Donde:

TI = Incremento de umbral correspondiente al deslumbramiento perturbador

L_v = Luminancia de velo total en cd/m^2 .

L_m = Luminancia media de la calzada en cd/m^2 .

Cuando los niveles de luminancia media de la calzada son superiores a $5 \text{ cd}/\text{m}^2$, el incremento de umbral de contraste^{REF3} es el siguiente:

$$TI = 95 \frac{L_v}{(L_m)^{1.05}} \text{ (en \%)}$$

Figura 1.19 Ejemplo de deslumbramiento molesto, al utilizar luminarias con refractores (Dominio Público)

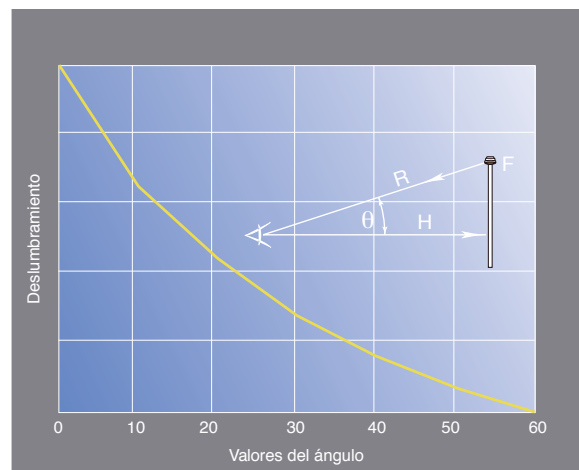


Figura 1.20 Deslumbramiento de fuente luminosa (Dominio Público)



Generalmente las fuentes luminosas producen un deslumbramiento perturbador. Éste es proporcional a la iluminación producida por la fuente de luz sobre la pupila del ojo, así como un factor dependiente del ángulo " θ " que forman la línea recta "R" que une el ojo con el foco "F" y el plano horizontal "H" que pasa por el ojo en la posición del conductor.

En la siguiente gráfica se indican los distintos deslumbramientos en función de este ángulo, habiéndose tomado como admisible un valor mínimo de 30° .

Figura 1.21 Deslumbramiento en función del ángulo θ (Fuente: INDAL)

El deslumbramiento se puede calcular con la siguiente fórmula:

$$E_{\text{glare}} = \frac{I_{\text{glare}}}{d^2} \cos \theta$$

I_{glare} = Intensidad de flujo luminoso en candelas (cd)

Luminancia de velo^{REF4}

La luminancia de velo es la luminancia uniforme equivalente resultante de la luz que incide sobre el ojo de un observador y que produce el velado de la imagen en la retina, disminuyendo de este modo la capacidad que posee el ojo para apreciar los contrastes.

La luminancia de velo se debe a la incidencia de la luz emitida por una luminaria sobre el ojo de un observador en el plano perpendicular a la línea de visión, dependiendo así mismo del ángulo comprendido entre el centro de la fuente deslumbrante y la línea de visión, así como del estado fisiológico del ojo del observador.

Teniendo el deslumbramiento se puede calcular la luminancia de Velo L_v (cd/m²), que es la luz parásita presente sobre el ojo de los conductores, y se calcula con la siguiente fórmula:

$$L_v = \frac{K \cdot E_{\text{gl}}}{\theta^2}$$

Donde:

L_v = Luminancia de velo (cd/m²)

K = Constante

K = 10 cuando θ es expresada en grados

K = 0.003 cuando θ es expresada en radianes.

el valor de K también depende de la edad del observador

E_{gl} = Es la iluminancia en lux en el ojo del observador, en el plano perpendicular a la línea de vista, producida por la fuente de deslumbramiento.

θ = Al ángulo (grados o radianes) entre la línea que atraviesa al ojo y el centro de la fuente de deslumbramiento y la línea de vista.

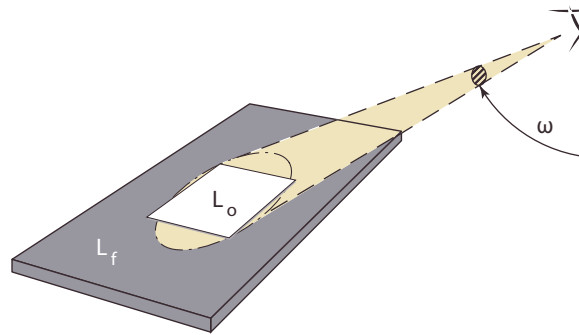
Contraste

Todos los objetos son percibidos por los contrastes de color y de luminancia que presentan las distintas partes de su superficie entre sí y en relación al fondo en que aparece el objeto.

El ojo normal es sensible a los colores en niveles de iluminación suficientemente elevados, , mientras que para bajos niveles de iluminación los objetos son percibidos fundamentalmente por el contraste de luminancias que presentan con relación al fondo.

La diferencia de luminancia entre el objeto que se observa y su espacio inmediato, se conoce como contraste.

Figura 1.22 Contraste (Fuente: INDAL)



En la Figura 1.22 la superficie de objeto tiene una luminancia “ L_o ” y la superficie de fondo una luminancia “ L_f ”, por tanto se llama contraste “ K ” a la diferencia de estas dos luminancias, divididas por la de fondo, es decir:

$$K = \frac{L_o - L_f}{L_f}$$

“ K ” es, por tanto, un valor relativo entre luminancias.

La visibilidad de un objeto situado sobre un fondo, depende de la diferencia de luminancias entre el objeto y el fondo. Un objeto claro sobre fondo oscuro tiene un contraste positivo (valores entre “0” e infinito), mientras que un objeto más oscuro que su fondo se verá en silueta y su contraste es negativo, variando entre “0” y (-1).

El contraste K puede ser negativo o positivo:

Si $L_o > L_f$ $K > 0$ contraste positivo (objeto más claro que el fondo).

Si $L_o < L_f$ $K < 0$ contraste negativo (objeto más oscuro que el fondo).

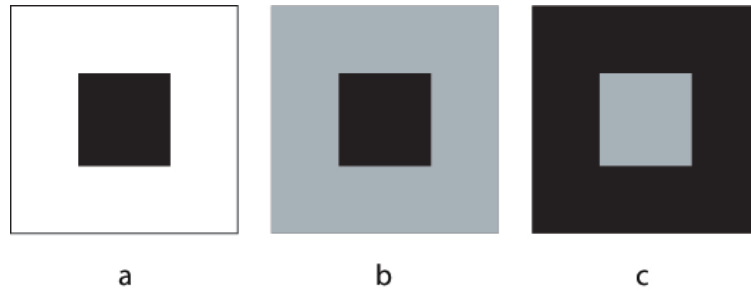
El contraste K puede adquirir los siguientes valores:

Contraste positivo (objeto claro) $0 < K < \infty$

Contraste negativo (objeto oscuro) $-1 < K < 0$

En los ejemplos de la siguiente figura: a) presenta un contraste fácil de distinguir, mientras que b) y c) se distinguen con mayor dificultad.

Figura 1.23 Contraste (Fuente: AFE. Recomendations relatives à l' éclairage des voies publiques)



Sensibilidad al contraste (G)

Equivale al mínimo contraste de luminancias que puede ser percibido por el ojo humano. Matemáticamente sería el inverso del contraste.

$$G = \frac{L_f}{L_o - L_f}; G = \frac{1}{K}$$

Por lo tanto, la mayor sensibilidad a los contrastes que puede lograrse es aproximadamente:

$$G = \frac{1}{0.01}, \text{ es decir, } G = 100$$

En las condiciones que suelen encontrarse en la práctica, la sensibilidad a los contrastes es menor por las causas antes descritas.

Adaptación

La capacidad que tiene el ojo para ajustarse automáticamente a las diferentes luminancias de los objetos se le llama "adaptación". Consiste en el ajuste del tamaño de la pupila para que la luminancia proyectada en la retina sea de un valor tolerable por las células sensibles.

Comparada con una cámara fotográfica, sería la mayor o menor apertura del diafragma.

Si la iluminación es muy intensa, la pupila se contrae reduciendo la luz que llega al cristalino, en cambio si la iluminación es escasa, la pupila se dilata para captarla en mayor cantidad.

En los casos de iluminaciones de valores muy altos, la pupila se reduce a un diámetro de aproximadamente 2 mm., y en iluminaciones muy bajas, se abre hasta aproximadamente 8 mm. El tamaño de la pupila se va reduciendo conforme va aumentando la edad de las personas.

En un cambio de un espacio con mucha iluminación a otro completamente oscuro, el ojo se ve sometido a un proceso de adaptación para cuyo ajuste total necesita aproximadamente 30 minutos; mientras que por el contrario, cuando se cambia de un espacio oscuro a otro con mucha iluminación, este periodo tarda unos segundos.

Esto es sumamente importante en el alumbrado de túneles, ya que en la entrada del túnel de día, la adaptación el ojo pasa de una iluminación exterior muy alta a una muy baja dentro del túnel y al salir pasa de una baja a una muy alta.

Figura 1.24 Curva de fotosensibilidad relativa del ojo respecto al tiempo de adaptación, en espacio iluminado (Fuente: INDAL)

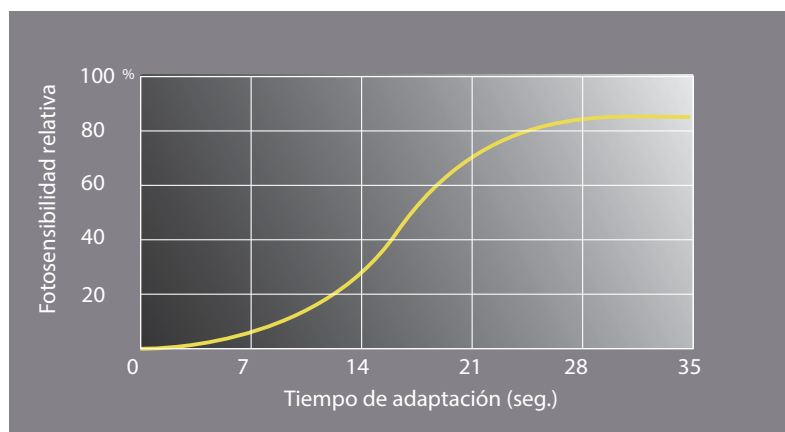
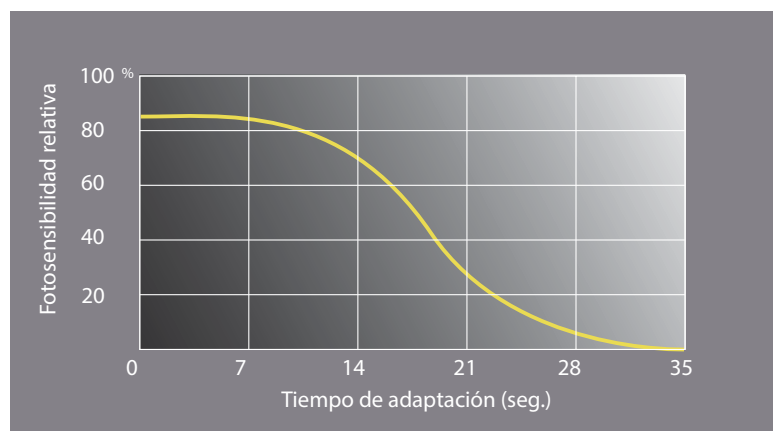


Figura 1.25 Curva de fotosensibilidad relativa del ojo respecto al tiempo de adaptación, en espacio oscuro. (Fuente: INDAL)



1.4 Unidades fotométricas y magnitudes luminosas

Las unidades fotométricas se refieren a la sensibilidad del ojo humano a la luz. En la técnica de la iluminación intervienen dos elementos básicos: la fuente productora de luz y el objeto que se va a iluminar. En este capítulo se ven las magnitudes y unidades de medida fundamentales, empleadas para valorar y comparar las cualidades y los efectos de las fuentes de luz.

Flujo luminoso (Potencia luminosa) Φ

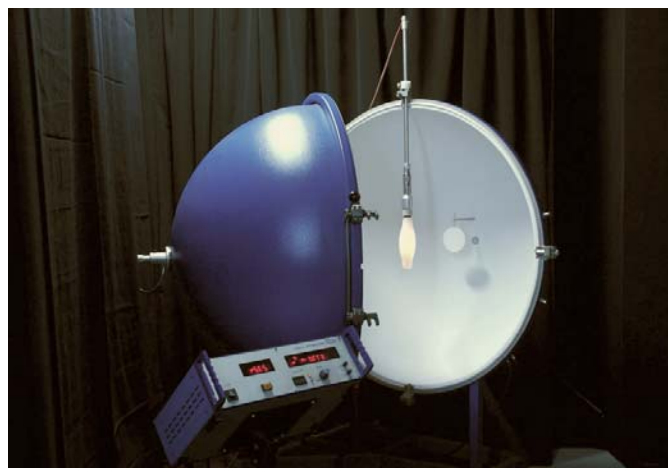
Se llama flujo luminoso de una fuente a la energía radiada que recibe el ojo humano según su curva de sensibilidad y que transforma en luz durante un segundo.

La energía transformada por las fuentes luminosas no se puede aprovechar totalmente para la producción de luz. Un ejemplo es una lámpara incandescente que consume una determinada energía eléctrica que transforma en energía radiante, y sólo alrededor del 10% es percibida por el ojo humano en forma de luz. El resto se pierde en calor.

En este sentido el flujo luminoso que produce una fuente de luz es la cantidad total de luz emitida o radiada en un segundo, en todas las direcciones.

La representación del flujo luminoso es con la letra griega Φ y su unidad es el lumen (lm). El lumen (lm) es el flujo luminoso de la radiación monocromática que se caracteriza por una frecuencia de valor 540×10^{12} Hz y por un flujo de energía radiante de $1/683$ W. Un Watt de energía radiante de longitud de onda de 555 nm en el aire equivale aproximadamente a 683 lm.

Figura 1.26 Esfera de Ulbricht (Dominio Público)



El flujo luminoso (Φ) se mide en un laboratorio a través de un fotoelemento calibrado según la curva de sensibilidad fotópica del ojo a las radiaciones monocromáticas, y que va incorporado a una esfera hueca. A esta esfera se le conoce como Esfera de Ulbricht (Figura 1.16) y en cuyo interior se coloca la fuente a medir. Los fabricantes dan el flujo de las lámparas en lúmenes (lm) para medir la potencia nominal.

Rendimiento luminoso (eficiencia luminosa) ϵ

El rendimiento luminoso de una fuente de luz, indica el flujo que emite dicha fuente por cada unidad de potencia eléctrica consumida para su obtención.

Expresa la eficiencia luminosa y se representa por la letra griega " ϵ ", siendo su unidad el lumen/watt (lm/W) y su fórmula es la siguiente:

$$\epsilon = \frac{\Phi}{W} \text{ (lm/W)}$$

Cantidad de luz (energía luminosa) Q

La cantidad de luz o energía luminosa se representa por la letra "Q" y se determina por la potencia luminosa o flujo luminoso emitido en la unidad de tiempo.

Su unidad es el lumen por segundo (lm * seg) y su fórmula es:

$$Q = \Phi * t \text{ (lm * seg)}$$

Intensidad luminosa (I)

La intensidad luminosa de una fuente de luz se simboliza con una "I" y es igual al flujo emitido en una dirección por unidad de ángulo sólido en esa dirección. Su unidad es la candela (cd),

Su fórmula que la expresa es:

$$I = \frac{\Phi}{\omega} \text{ (lm/sr)}$$

Candela (cd)

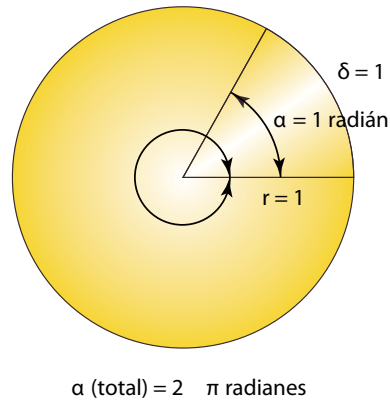
La candela se representa con las letras "cd" y es la intensidad luminosa de una fuente puntual que emite un flujo luminoso de un lumen en un ángulo sólido de un estereorradián (sr).

El Sistema Internacional (S.I.), define candela como: la intensidad luminosa, en una dirección dada, de una fuente que emite una radiación monocromática de frecuencia 540×10^{12} Hz y cuya intensidad energética en dicha dirección es 1/683 watts por estereorradián.

Radián (rad)

El radián es el ángulo plano que corresponde a un arco de circunferencia de longitud igual al radio (Figura 1.27).

Figura 1.27 Ángulo plano (Fuente: INDAL)

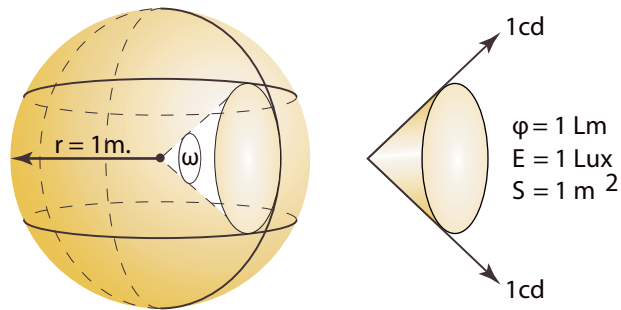


Así como a una magnitud de superficie corresponde un ángulo plano que se mide en radianes, a una magnitud de volumen le corresponde un ángulo sólido o estéreo que se mide en estereorradianes.

Ángulo sólido (ω)

El ángulo sólido de un cono es el cociente resultado de dividir el área cortada sobre una superficie esférica (cuyo centro coincide con el vértice del cono) entre el cuadrado del radio de dicha esfera.

Figura 1.28 Ángulo sólido (Fuente: INDAL)



$$\omega(\text{total}) = 4 \pi \text{ estereorradianes}$$

Estereorradián (sr)

El estereorradián se representa con las letras (sr) y es el ángulo sólido que corresponde a un casquete esférico cuya superficie es igual al cuadrado del radio. Figura 1.28.

Iluminancia (nivel de iluminación) E

La iluminancia o nivel de iluminación de una superficie se representa por la letra (E) y es la relación entre el flujo luminoso que recibe la superficie y su área. Su unidad es el lux (lx).

La fórmula de la iluminancia es:

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

Cuanto mayor sea el flujo luminoso incidente sobre una superficie, mayor será su iluminancia, y para un mismo flujo luminoso incidente, la iluminancia será mayor en la medida en que disminuya la superficie.

Lux (lx)

El lux es la iluminancia de una superficie que recibe un flujo luminoso de un lumen, repartido sobre un metro cuadrado de superficie.

La medida del nivel de iluminación se realiza por medio de un aparato especial denominado luxómetro, que consiste en una célula fotoeléctrica que, al incidir la luz sobre su superficie, genera una débil corriente eléctrica que aumenta en función de la luz incidente. Dicha corriente se mide con un miliamperímetro, de forma analógica o digital, calibrado directamente en luxes.

Figura 1.29 Luxómetro



Luminancia (L)

La luminancia se representa por la letra "L" y es el efecto de luminosidad que produce una superficie en la retina del ojo, ya sea procedente de una fuente primaria que produce luz, o procedente de una fuente secundaria o superficie que refleja luz.

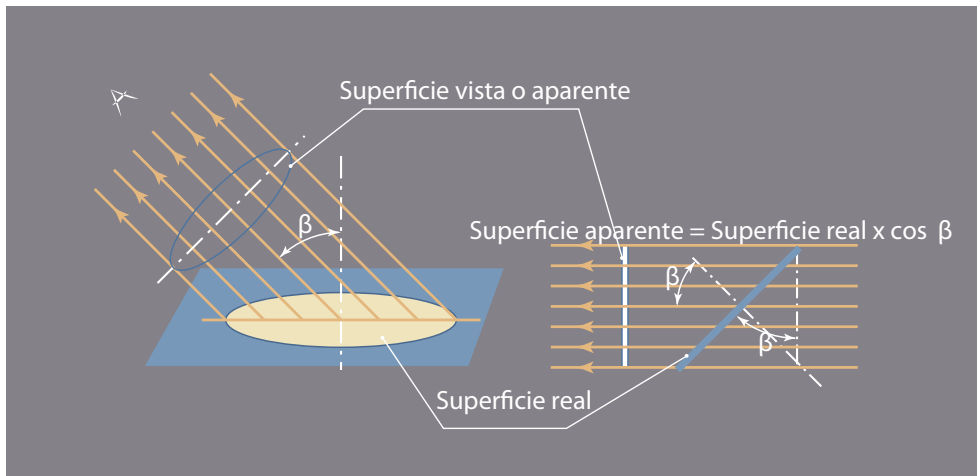
Mide el brillo de las fuentes luminosas primarias y de las fuentes que constituyen los objetos iluminados.

La luminancia ha desplazado a los conceptos de brillo y densidad de iluminación. Cabe recordar que el ojo no ve colores sino brillo, como atributo del color. La percepción de la luz es realmente la percepción de diferencias de luminancias. Por lo tanto se puede decir, que el ojo ve diferencias de luminancias y no de iluminación, es decir, a igual iluminación, diferentes objetos tienen luminancia distinta porque tienen distinto poder de reflexión.

La luminancia de una superficie iluminada es el resultado de dividir la intensidad luminosa de una fuente de luz en una dirección, entre la superficie de la fuente proyectada según dicha dirección.

El área proyectada es la que ve el observador en la dirección de observación. Esta se calcula multiplicando la superficie real iluminada por el coseno del ángulo que forma su normal con la dirección de la intensidad luminosa (Figura 1.30).

Figura 1.30 Luminancia de una superficie (Fuente: INDAL)



La unidad de la luminancia es la candela/metro cuadrado llamada “nit” (nt), con un submúltiplo, la candela/centímetro cuadrado o “stilb”, empleada para fuentes con elevadas luminancias.

$$1\text{nt} = \frac{1\text{cd}}{1\text{m}^2} ; 1\text{stilb} = \frac{1\text{cd}}{1\text{cm}^2}$$

La fórmula que la expresa es la siguiente:

$$L = \frac{I}{S \cdot \cos\beta}$$

donde:

$S \cdot \cos\beta$ = Superficie aparente.

Cabe señalar que la luminancia no tiene relación con la distancia de observación.

La medida de la luminancia se realiza por medio de luminancímetro o luminómetro basado en dos sistemas ópticos, uno de dirección y otro de medición (Figura 1.31).

En el sistema óptico de dirección, el luminancímetro se orienta de forma que la imagen coincida con el punto a medir y la luz que llega una vez orientado se ve convertida en corriente eléctrica y sea leída en lectura analógica o digital. Los valores medidos son en cd/m^2 .

Figura 1.31 Luminómetro o luminancímetro



Otras magnitudes luminosas de interés

Coefficiente de utilización (CU)

Es la relación entre el flujo luminoso recibido por un cuerpo y el flujo emitido por una fuente luminosa.

Unidad	=	%
Símbolo	=	CU
Relación	=	$CU = \frac{\Phi}{\Phi_e}$

Reflectancia (ρ)

Es la relación entre el flujo reflejado por un cuerpo (con o sin difusión) y el flujo recibido.

Unidad	=	%
Símbolo	=	ρ
Relación	=	$\rho = \frac{\Phi_r}{\Phi}$

Coefficiente de absorción (α)

Es la relación entre el flujo luminoso absorbido por un cuerpo y el flujo recibido.

Unidad	=	%
Símbolo	=	α
Relación	=	$\alpha = \frac{\Phi_{\alpha}}{\Phi}$

Coefficiente de transmisión (τ)

Es la relación entre el flujo luminoso transmitido por un cuerpo y el flujo recibido.

Unidad	=	%
Símbolo	=	τ
Relación	=	$\tau = \frac{\Phi_{\tau}}{\Phi}$

Coefficiente de uniformidad media (U_m)

Es la relación entre la iluminación mínima y la media, de una instalación de alumbrado.

Unidad	=	%
Símbolo	=	U_m
Relación	=	$U_m = \frac{E_{\min}}{E_{\text{med}}}$

Coefficiente de uniformidad extrema (U_{θ})

Es la relación entre la iluminación mínima y máxima, de una instalación de alumbrado.

Unidad	=	%
Símbolo	=	U_{θ}
Relación	=	$U_{\theta} = \frac{E_{\min}}{E_{\max}}$

Coefficiente de uniformidad longitudinal (U_L)

Es la relación entre la luminancia mínima y máxima longitudinal, de una instalación de alumbrado.

Unidad	=	%
Símbolo	=	U_L
Relación	=	$U_L = \frac{L_{\text{min longitudinal}}}{L_{\text{max longitudinal}}}$

Coefficiente de uniformidad general (U_o)

Es la relación entre la luminancia mínima y media, de una instalación de alumbrado.

Unidad	=	%
Símbolo	=	U_o
Relación	=	$U_o = \frac{L_{\text{min}}}{L_{\text{med}}}$

Factor de mantenimiento (Fm)

Es un factor que indica el grado de conservación de una instalación.

Unidad	=	%
Símbolo	=	Fm
Relación	=	$Fm = F_{pl} * F_{dl} * F_t * F_e * F_c$

donde:

F_{pl}	=	factor posición lámpara
F_{dl}	=	factor depreciación lámpara
F_t	=	factor temperatura
F_e	=	factor equipo de encendido
F_c	=	factor conservación de la instalación

1.5 Propiedades ópticas de los materiales

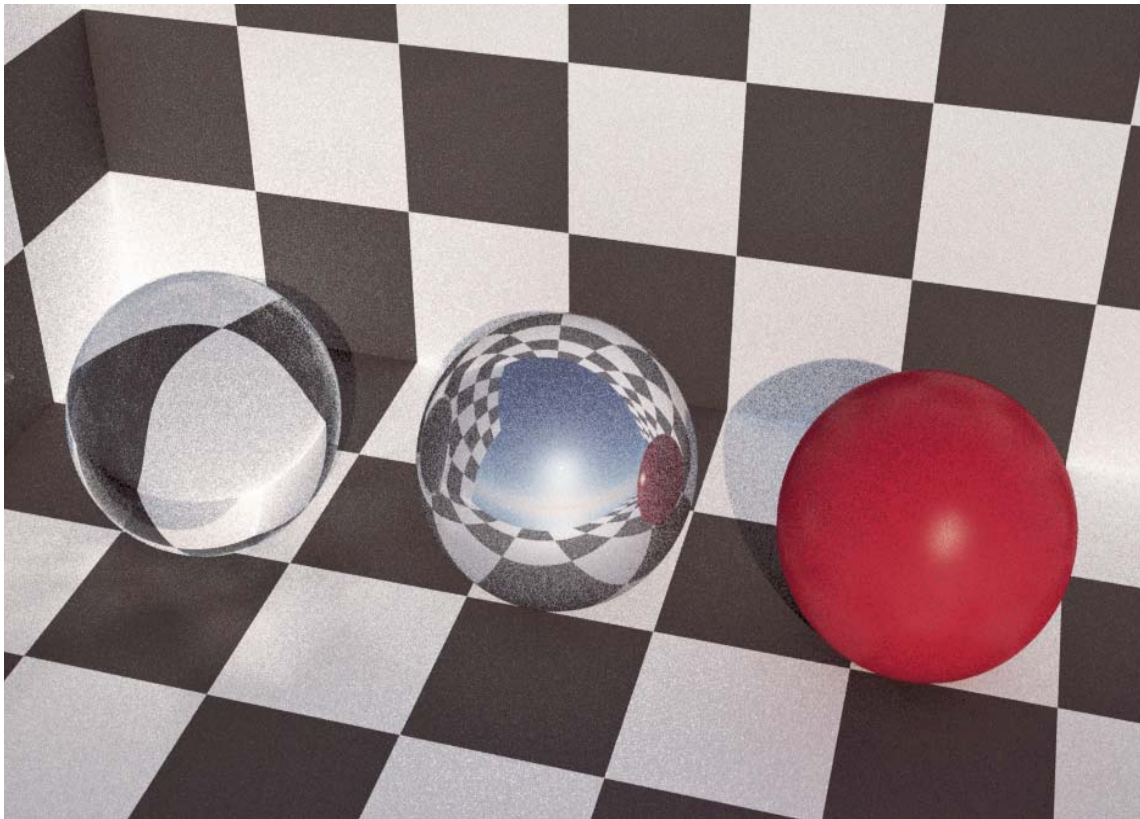
Generalidades

Cuando la luz encuentra un obstáculo en su camino choca contra la superficie de éste y una parte es reflejada. Si el cuerpo es opaco el resto de la luz será absorbida.

Si es transparente una parte será absorbida como en el caso anterior y el resto atravesará el cuerpo transmitiéndose. Así pues, tenemos tres posibilidades:

- Reflexión
- Transmisión / refracción
- Absorción

Figura 1.32 Ejemplo de reflexión, refracción y absorción (Dominio Público)



Reflexión

Al fenómeno que se da cuando las ondas de cualquier tipo chocan sobre una barrera plana como un espejo provocando así que se generen nuevas ondas que se mueven alejándose de la barrera, se denomina reflexión.

De la luz que se refleja en una superficie, un porcentaje de dicha luz se pierde debido al fenómeno de absorción. La relación entre la luz reflejada y la luz incidente se denomina reflectancia de la superficie.

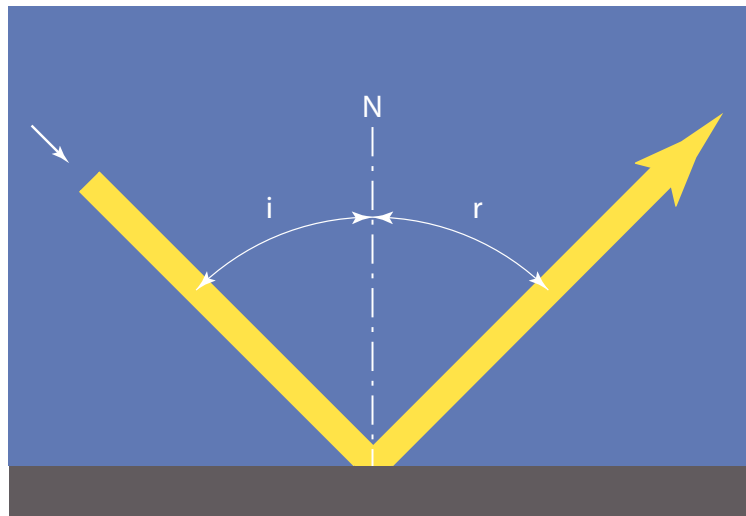
Toda aquella superficie que no sea completamente negra puede reflejar luz. La cantidad de luz que refleja y la forma en que dicha luz es reflejada se determina por las propiedades de reflexión de la superficie.

La reflexión se clasifica en cuatro tipos: reflexión especular, reflexión compuesta, reflexión difusa y reflexión mixta. En estas propiedades de reflexión se fundamentan los sistemas reflectores.

Reflexión especular: Ocurre cuando los rayos luminosos que caen en una superficie reflectora muy plana son reflejados de modo que el ángulo incidente es igual al ángulo reflejado. Dicha reflexión obedece a dos leyes:

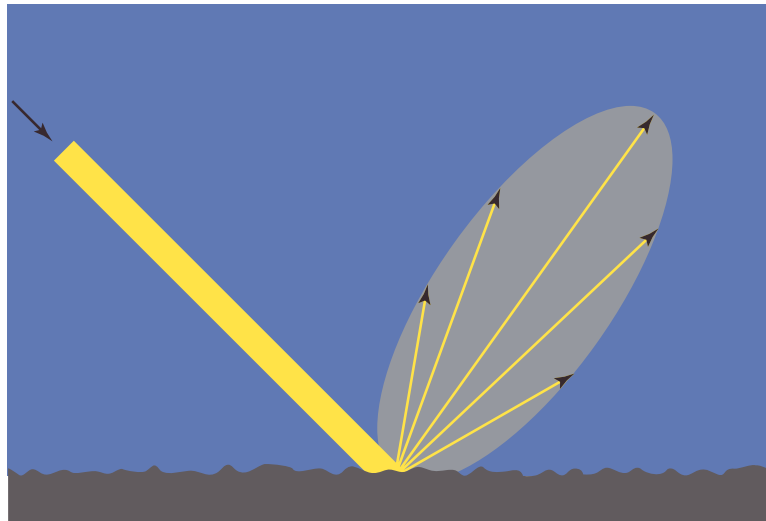
- 1) El rayo incidente, el rayo reflejado y la normal, se encuentran en un mismo plano.
- 2) El ángulo de incidencia "i" es igual al ángulo de reflexión "r".

Figura 1.33 Reflexión especular (Fuente: INDAL)



Reflexión compuesta: En este caso no hay imagen de espejo de la fuente de luz, pero el ángulo de intensidad máxima reflejada es igual al ángulo de incidencia. La reflexión compuesta ocurre cuando la superficie es irregular o rugosa.

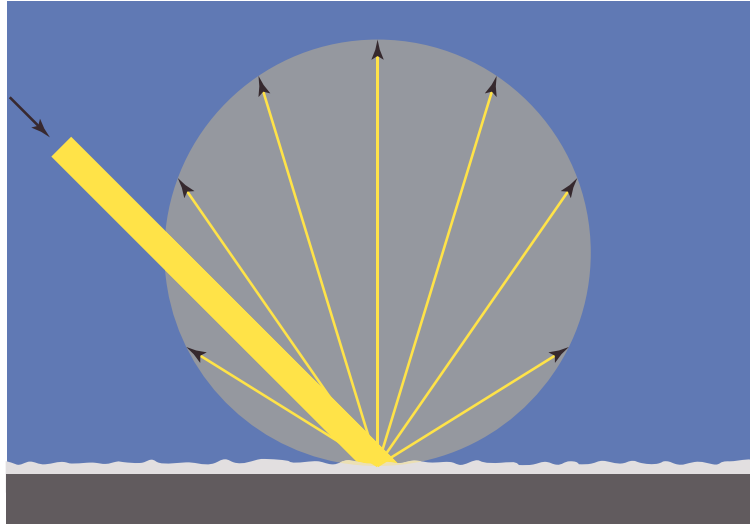
Figura 1.34 Reflexión compuesta (Fuente: INDAL)



Reflexión difusa: Se produce cuando la luz que choca o incide sobre una superficie ordinaria y es desviado en todas las direcciones.

La reflexión difusa se produce en superficies como las paredes y cielos rasos de yeso, la nieve, el papel blanco mate, etc.

Figura 1.35 Reflexión difusa (Fuente: INDAL)



Reflexión mixta: Reflexión intermedia entre la especular y la difusa, en la que parte del haz de luz incidente se refleja y parte de éste se difunde.

La reflexión mixta se presenta en el papel brillante, los metales no pulidos, las superficies barnizadas y pavimento mojado entre otros..

Figura 1.36 Reflexión mixta (Fuente: INDAL)

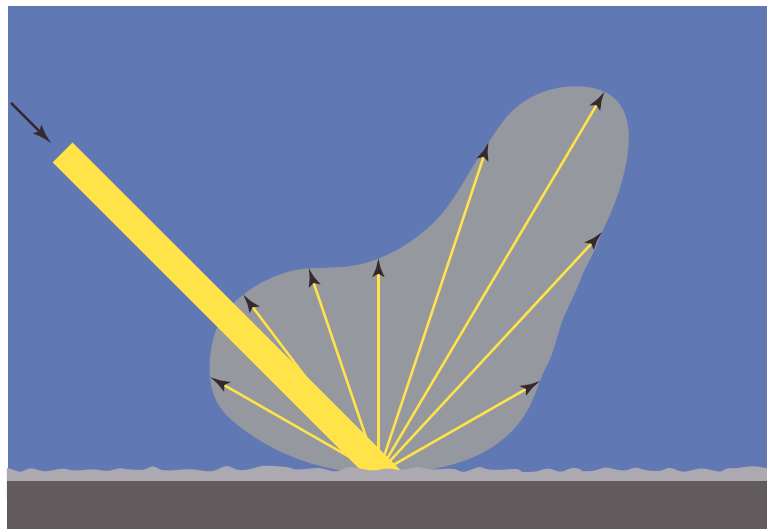


Figura 1.37 El pavimento mojado tiene reflexión mixta (Dominio Público)

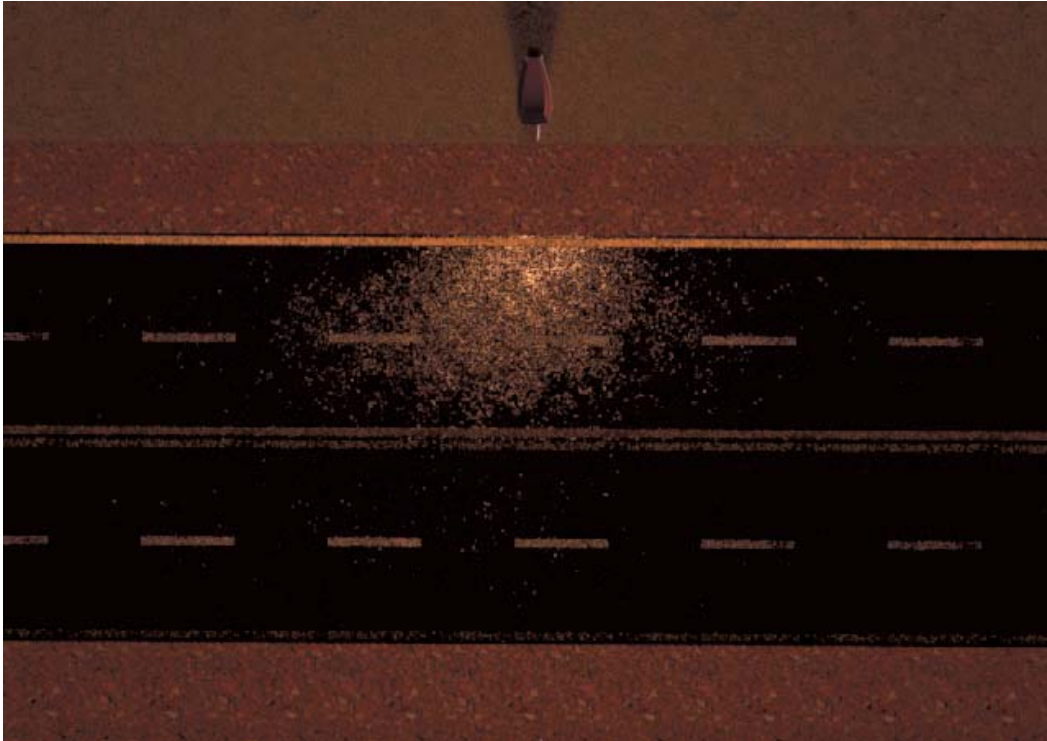


Tabla 1.5 Factor de reflexión para luz blanca de día (Fuente: INDAL)

Superficie reflectora	% factor de reflexión
Plasta brillante	92 - 97
Oro	60 - 92
Plata blanca (mate)	85 - 92
Niquel pulido	60 - 65
Cromo pulido	60 - 65
Aluminio pulido	67 - 72
Aluminio electrobrillantado	86 - 90
Aluminio vaporizado	90 - 95
Cobre	35 - 80
Hierro	50 - 55
Porcelana esmaltada	60 - 80
Espejos	80 - 85
Pintura blanca mate	70 - 80
Beige claro	70 - 80
Amarillo y crema claro	60 - 75
Techos acústicos	60 - 75
Verde muy claro	70 - 80
Verde claro y rosa	45 - 65
Azul claro	45 - 55
Gris claro	40 - 50
Rojo claro	30 - 50
Café claro	30 - 40
Beige oscuro	25 - 35
Marrón, verde y azul oscuros	5 - 20
Negro	3 - 4

Transmisión

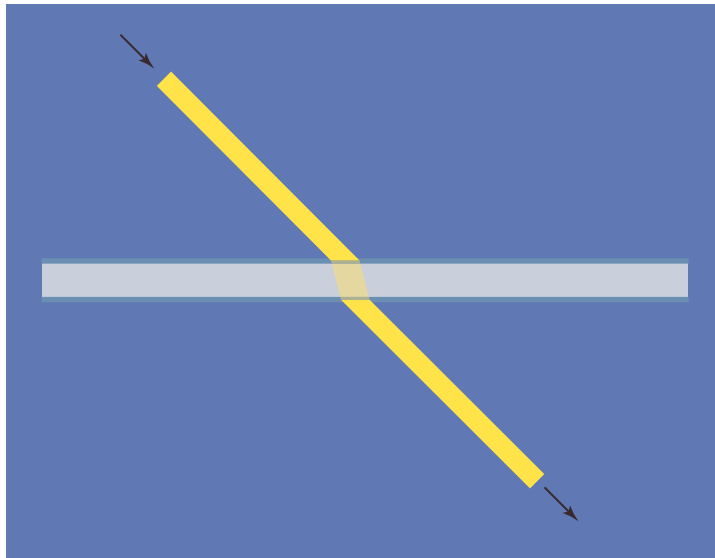
La transmisión de la luz es su propagación a través de los cuerpos transparentes o translúcidos. En este fenómeno, la dirección de los rayos luminosos queda modificada o se desplaza por refracción.

Cuando la luz atraviesa un cuerpo translúcido o transparente, parte de ésta se pierde debido a la reflexión en la superficie del medio, y parte de ella es absorbida. La relación entre la luz incidente y la luz transmitida se denomina transmitancia del material.

Se distinguen tres tipos de transmisión: regular, difusa y mixta.

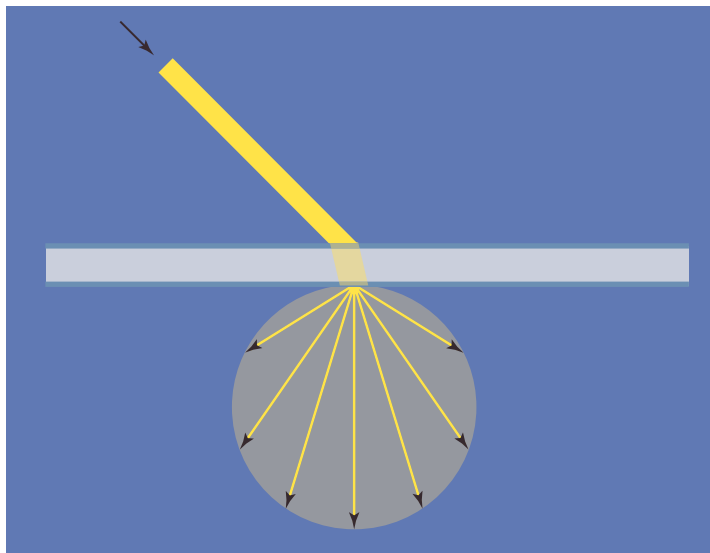
Transmisión regular: En este tipo de transmisión, el haz que incide sobre un material, lo atraviesa y sale de él sin desviarse. Los medios que cumplen esta propiedad, se les denomina cuerpos “transparentes” y permiten ver con nitidez los objetos colocados detrás de ellos.

Figura 1.38 Transmisión regular (Fuente: INDAL)



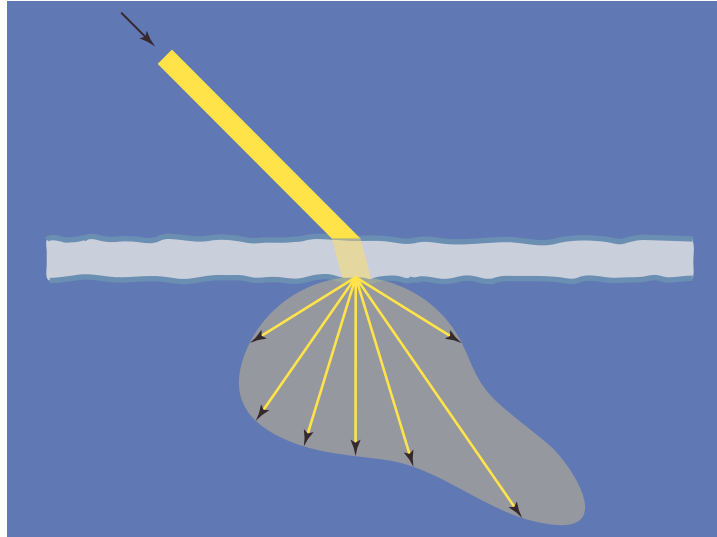
Transmisión difusa: En la transmisión difusa el haz de luz que choca sobre el material, saliendo de éste en múltiples direcciones. A estos materiales se les llama cuerpos “traslúcidos”, siendo los más conocidos los cristales esmerilados así como los vidrios orgánicos opalizados. Los objetos colocados detrás de ellos no son distinguidos con precisión.

Figura 1.39 Transmisión difusa (Fuente: INDAL)



Transmisión mixta: Es una forma transición intermedia entre la transmisión regular y la transmisión difusa. Esta se presenta en vidrios soplados y cristales de superficie labrada. A pesar de que la difusión del haz de luz no es completa, los objetos no son claramente visibles detrás del mismo, pero sí su posición.

Figura 1.40 Transmisión mixta (Fuente: INDAL)



Absorción

Absorción es la transformación de la energía radiante en otra forma de energía, generalmente en forma de calor. La absorción es una característica de todas las superficies que no son completamente reflectoras, y de aquellos cuerpos o materiales que no son totalmente transparentes. La relación entre la luz incidente y la luz absorbida se denomina absorción del material.

La absorción de algunas longitudes de onda de luz se denomina absorción selectiva. En general, el color de los objetos le deben dicho color a la absorción selectiva.

Refracción

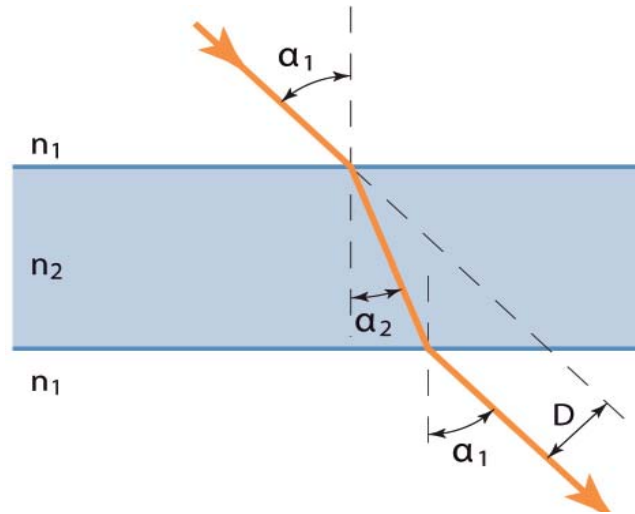
La refracción se produce cuando un rayo de luz es desviado de su trayectoria al atravesar una superficie de separación entre medios diferentes según las leyes de la refracción. Esto se debe a que la velocidad de propagación de la luz en cada uno de ellos es diferente.

Existen dos leyes de refracción:

- 1) El rayo incidente, la normal y el rayo refractado se encuentran en el mismo plano.

2) Los senos de los ángulos de incidencia i y de refracción r son directamente proporcionales a las velocidades de propagación v_1 y v_2 de la luz en los respectivos medios (ley de Snell).

Figura 1.41 Refracción en el límite entre dos medios (Fuente: INDAL)



$$n_1 (\text{sen } \alpha_1) = n_2 (\text{sen } \alpha_2) ; \frac{\text{sen } \alpha_1}{\text{sen } \alpha_2} = \frac{n_2}{n_1}$$

n_1 = índice de refracción del primer medio.

n_2 = índice de refracción del segundo medio.

α_1 = ángulo de incidencia.

α_2 = ángulo de refracción.

Cuando el primer medio es el aire. $n_1 = 1$ y la fórmula es:

$$\text{sen } \alpha_1 = n_2 (\text{sen } \alpha_2)$$

La distancia D en la figura 1.41 se conoce como desplazamiento. Este desplazamiento depende del ángulo de incidencia y del índice de refracción. Cuando el rayo de incidencia es perpendicular a la superficie, la refracción y el desplazamiento equivalen a cero.

La refracción cambia según la longitud de onda. Las ondas cortas (como la azul y la violeta) se transmiten más que las ondas largas (como por ejemplo las rojas). Este fenómeno se utiliza para separar la luz blanca en sus colores componentes atravesando un prisma de refracción. El grado de la separación del color que depende del ángulo de incidencia así como de las propiedades refractivas del material del prisma, se denomina dispersión.

2.1 Leyes y principios de la luminotecnia

Ley de la inversa del cuadrado de la distancia

Desde una misma fuente de luz, los niveles de iluminación de distintas superficies colocadas normalmente a la dirección de la luz, son directamente proporcionales a la intensidad luminosa en esa dirección e inversamente proporcionales al cuadrado de las distancias entre dicha fuente y cada una de las superficies.

Su fórmula es la siguiente:

$$E = \frac{I (lx)}{d^2}$$

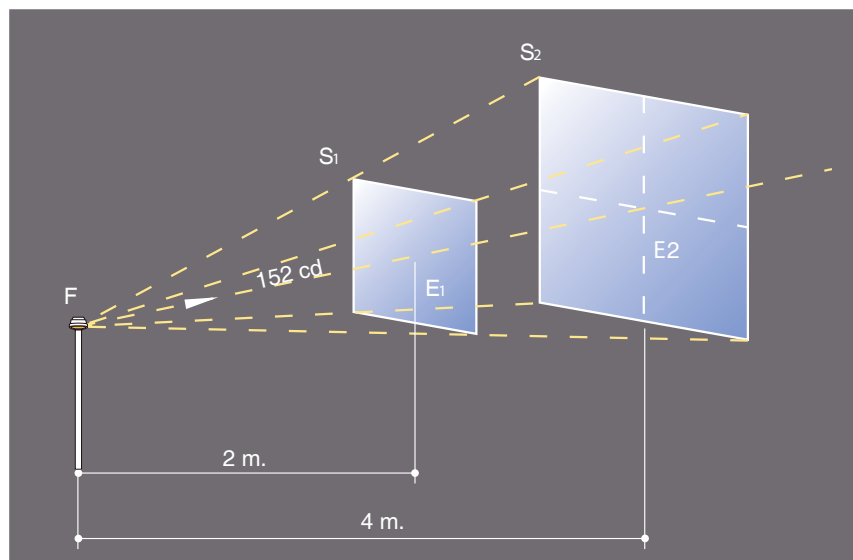
donde "E", representa el nivel de iluminación en luxes (lx) "I", representa la intensidad de la fuente en candelas (cd) y "d", (m) es la distancia de la fuente de luz al plano receptor perpendicular.

De esta manera se determina la relación de iluminancias E_1 y E_2 que hay entre dos planos separados por distancia d y D , de la fuente de luz respectivamente:

$$E_1 * d^2 = E_2 * D^2$$

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{D^2}{d^2}$$

Figura 2.1 Ejemplo de la ley inversa del cuadrado de la distancia (Fuente: IN-DAL)



Para la superficie que está a 2 m de distancia de la fuente luminosa, tenemos:

$$E_1 = \frac{I}{d_1^2} ; E_1 = \frac{152}{2^2} = 38 \text{ lux}$$

Para la superficie que está a 4 m de distancia de la fuente luminosa:

$$E_2 = \frac{I}{d_2^2} ; E_2 = \frac{152}{4^2} = 9.5 \text{ lux}$$

Ley del coseno

La iluminación de un punto cualquiera de una superficie, es directamente proporcional al coseno del ángulo de incidencia de los rayos luminosos en el punto iluminado.

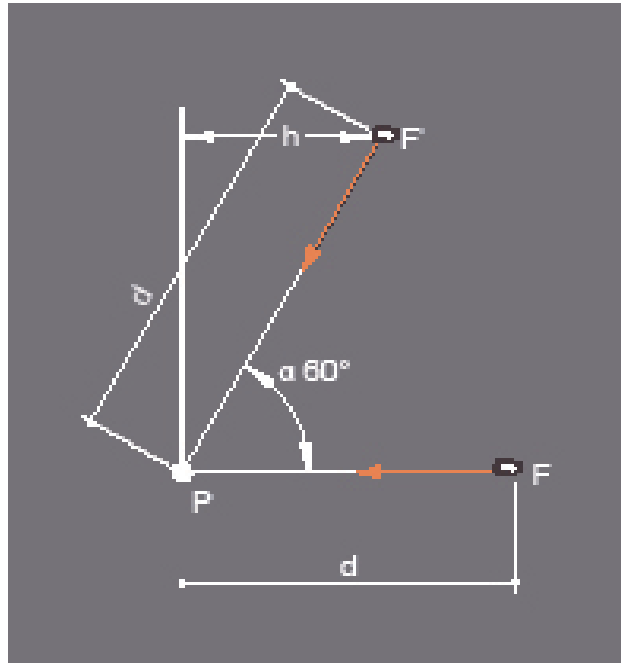
Cuando la dirección del flujo luminoso no es perpendicular a la superficie, se utiliza esta ley en la cual, la ley de la inversa del cuadrado de la distancia se multiplicará por el coseno del ángulo correspondiente, cuya expresión constituye la llamada ley del coseno y se expresa como:

$$E = \frac{I}{d^2} \cdot \cos \alpha \text{ (lx)}$$

En el siguiente ejemplo (Figura 2.3) se representan dos fuentes de luz F y F' con igual intensidad luminosa "I" y a la misma distancia "d" del punto P. A la fuente F, con un ángulo de incidencia igual a cero, corresponde un $\cos(0) = 1$ y produce una iluminación en el punto P de valor:

$$E_p = \frac{I}{d^2} \cdot \cos \alpha = \frac{I}{d^2} \cdot 1 ; E_p = \frac{I}{d^2} \text{ (lx)}$$

Figura 2.2 Luminancia en un punto desde dos fuentes de luz con diferente ángulo de incidencia (Fuente: CIE)



De igual forma F' con un ángulo $\alpha = 60^\circ$ al que corresponde el $\cos 60^\circ = 0.5$ producirá en el mismo punto una luminancia de valor:

$$E'_p = \frac{I}{d^2} \cdot \cos 60^\circ = \frac{I}{d^2} \cdot 0.5 ; E'_p = \frac{1}{2} \cdot \frac{I}{d^2} \text{ (lx)}$$

En este sentido $E'_p = 0.5 \cdot E_p$, es decir, para obtener la misma iluminación en el punto P, la intensidad luminosa de la fuente F' debe ser el doble de la fuente F.

Ley del cubo del coseno

La iluminación de un punto de un plano horizontal iluminado oblicuamente, es directamente proporcional a la intensidad luminosa emitida por el foco luminoso en esa dirección y al cubo del coseno del ángulo de incidencia e inversamente proporcional a la altura entre el plano horizontal donde se encuentra situado el foco y el plano horizontal que contiene el punto.

En la práctica, generalmente no se conoce la distancia "d" del foco al punto considerado, sino su altura "h" a la horizontal del punto.

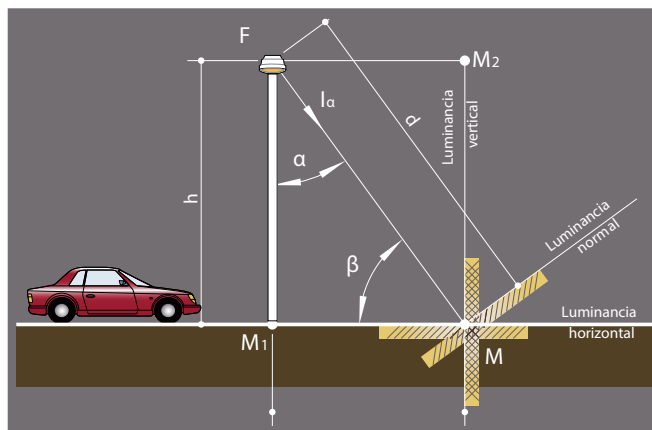
Empleando una sencilla relación trigonométrica y sustituyendo ésta en la ecuación inicial, se obtiene una nueva relación en la cual interviene la altura h , a esta ley se le llama ley del cubo del coseno.

$$\cos \alpha = \frac{h}{d} ; d = \frac{h}{\cos \alpha}$$

$$E_h = \frac{I_\alpha}{d^2} \cdot \cos \alpha = \frac{I_\alpha}{\left(\frac{h}{\cos \alpha}\right)^2} \cdot \cos \alpha = \frac{I_\alpha}{h^2} \cdot \cos^2 \alpha \cdot \cos \alpha$$

$$E_h = \frac{I_\alpha}{h^2} \cdot \cos^3 \alpha \quad (lx)$$

Figura 2.3 Luminancia horizontal = E_h (Fuente: Philips)



Esta ley nos permite calcular la luminancia horizontal en cada punto de un plano iluminado, si contamos con la distribución polar de la intensidad luminosa de la fuente, la cual deben proporcionar los fabricantes de luminarias.

Ley del seno

La luminancia de un punto situado en un plano vertical iluminado por un foco luminoso bajo un determinado ángulo de incidencia, es proporcional al seno del citado ángulo de incidencia.

Se relaciona trigonométricamente con la ley del coseno de la siguiente manera:

Al ser los ángulos α y β , parte del mismo triángulo rectángulo.

$$\alpha + \beta + 90^\circ = 180^\circ \text{ tenemos que: } \beta = 90^\circ - \alpha$$

$$\cos\beta = \text{sen } \alpha$$

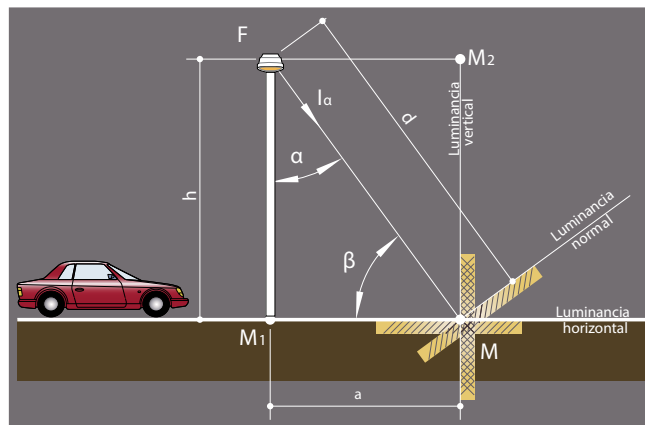
Si sustituimos este valor en la ley del coseno tenemos:

$$E_v = \frac{I_\alpha}{d^2} \cdot \text{sen } \alpha \quad (lx)$$

La misma ecuación en función de la altura tenemos:

$$E_v = \frac{I_\alpha}{h^2} \cdot \cos^2 \alpha \cdot \text{sen } \alpha$$

Figura 2.4 Luminancia vertical = E_v (Fuente: Philips)



Ley de Lambert

La luminancia de una superficie luminosa considerada como un punto, es constante en cualquier dirección que se considere.

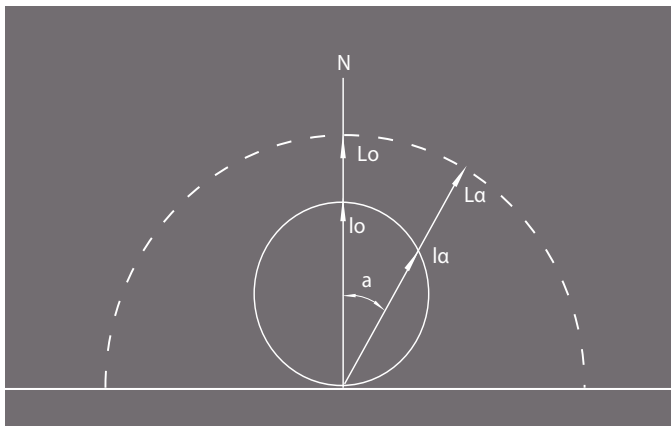
Existen superficies emisoras o difusas, que al observarlas desde distintos ángulos se tiene la misma sensación de claridad. A estas superficies se les denomina emisores o difusores perfectos.

Si L_o es la luminancia según la normal y L_α la luminancia según el ángulo de observación α , se verifica que $L_\alpha = L_o \cdot \cos \alpha$ para cualquier ángulo α .

Como $L_o = \frac{I_o}{S}$; $L_\alpha = \frac{I_\alpha}{S \cdot \cos \alpha}$ se cumple la siguiente ecuación: $I_\alpha = I_o \cdot \cos \alpha$

Esta relación se conoce como Ley de Lambert y sólo la cumplen los emisores o difusores perfectos.

Figura 2.5 Invariabilidad de la luminancia con el ángulo de incidencia (Fuente: Philips)



Esta Ley de Lambert, se puede aplicar para considerar algunas superficies luminosas como si fueran puntos. Un ejemplo es lo que ocurre con las lámparas incandescentes, donde en lugar de considerar la superficie del filamento, se puede considerar dicha lámpara como un punto situado en el centro de gravedad de dicho filamento.

2.2 Representación gráfica de magnitudes

Todas las magnitudes luminosas producidas por fuentes de luz, se representan mediante gráficas determinadas por los fabricantes de las lámparas y luminarias.

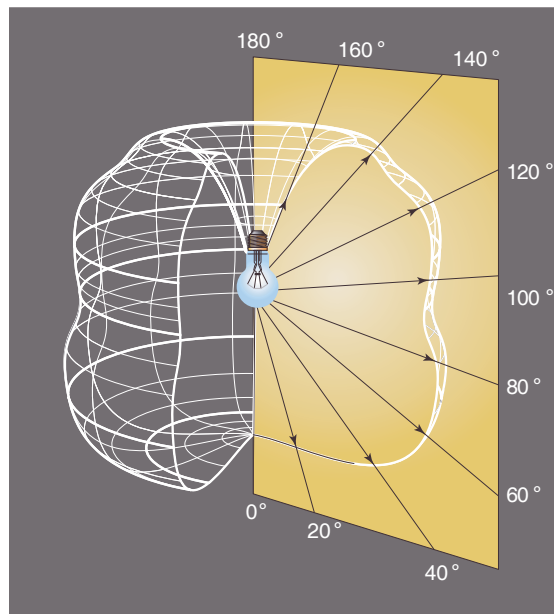
Se le denomina distribución luminosa al conjunto de la intensidad luminosa de una fuente de luz en todas las direcciones. Las fuentes de luz utilizadas en la práctica tienen una superficie luminosa más o menos grande, cuya intensidad de radiación se ve afectada por la propia construcción de la fuente, presentando valores diversos en distintas direcciones.

Hay equipos como el Goniómetro con el que se puede determinar la intensidad luminosa de una fuente de luz en todas las direcciones del espacio con relación a un eje vertical. Si se representa por medio de vectores (I) la intensidad luminosa de una fuente de luz en las infinitas direcciones del espacio, se crea un volumen que representa el valor del flujo total emitido por la fuente, el cual se define con la siguiente fórmula:

$$\Phi = \int_V \vec{I} \cdot d\Phi$$

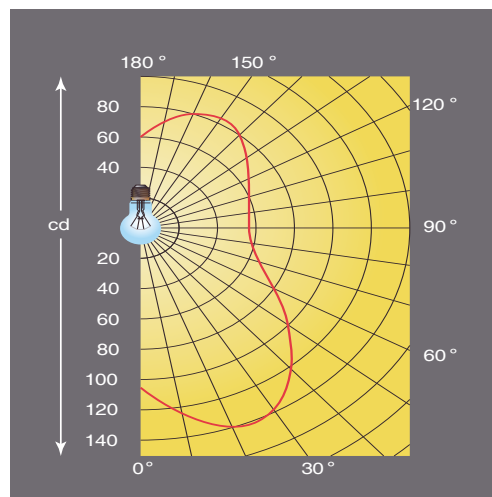
El sólido que se obtiene, es llamado sólido fotométrico. En la figura 2.6 se aprecia el sólido fotométrico de una lámpara incandescente.

Figura 2.6 Sólido fotométrico de una lámpara incandescente (Fuente: OSRAM)



Si se pasa un plano por el eje de simetría de la fuente luminosa, por ejemplo un plano meridional, se obtiene una sección limitada por una curva denominada curva fotométrica o curva de distribución luminosa, como se observa en la siguiente figura.

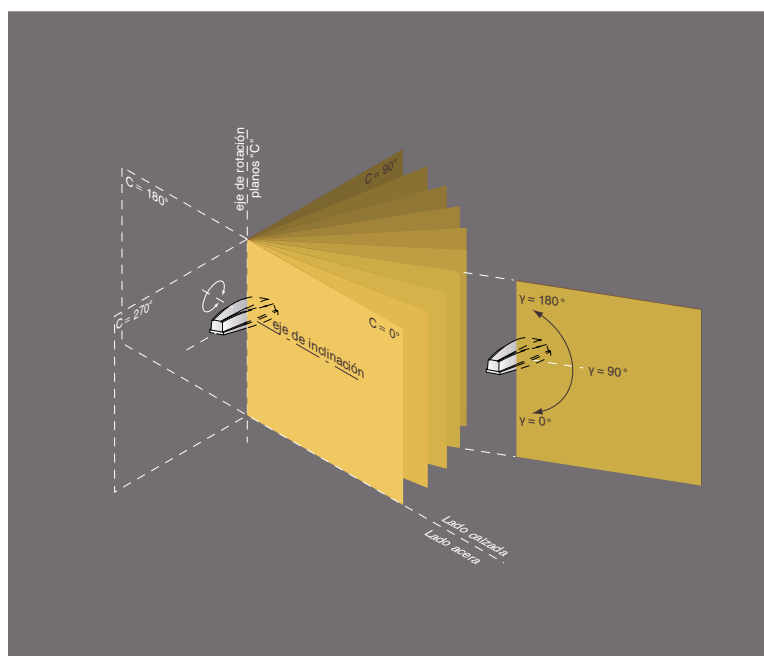
Figura 2.7 Curva fotométrica de una lámpara incandescente (Fuente: OSRAM)



A través de la curva fotométrica de una fuente de luz, se puede determinar con exactitud la intensidad luminosa en cualquier dirección, aunque este dato necesario para algunos cálculos de iluminación.

Las direcciones del espacio por las cuales se irradia una intensidad luminosa, se pueden determinar por dos coordenadas. Uno de los sistemas de coordenadas más usado para la obtención de curvas fotométricas es: "C- γ " que se puede ver en la siguiente figura.

Figura 2.8 Sistema de coordenadas C - γ (Fuente: AFE)



Curvas de distribución fotométrica

Las curvas fotométricas se dan relacionadas a un flujo luminoso emitido de 1,000 lm y ya que el caso más general es que la fuente de luz emita un flujo superior, los valores de la intensidad luminosa correspondientes se obtienen mediante una regla de tres simple.

Cuando una lámpara se aloja en un reflector se distorsiona su flujo proporcionando un volumen cuya forma es distinta, ya que depende de las características propias del reflector. Por lo tanto, las curvas de distribución según los distintos planos son diferentes.

Las siguientes figuras, muestran dos ejemplos en los que se han representado las curvas de distribución de dos reflectores.

Figura 2.9

Curva de distribución fotométrica simétrica con curvas simétricas para cualquiera de los planos meridionales, por lo que una sola curva es suficiente para su identificación fotométrica (Fuente: CIE 132-1999)

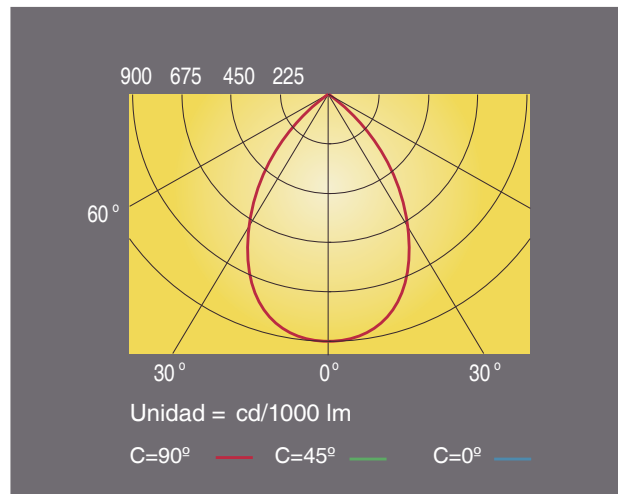
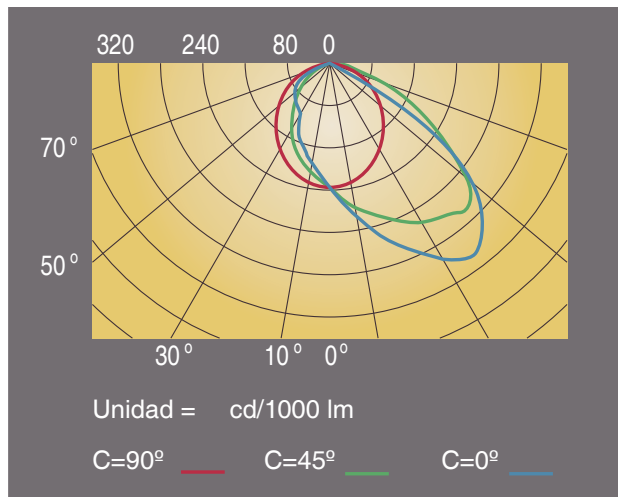


Figura 2.10

Curva de distribución fotométrica asimétrica, cada plano tiene una curva diferente, por lo que es necesario conocer todos los planos (Fuente: CIE 132-1999)

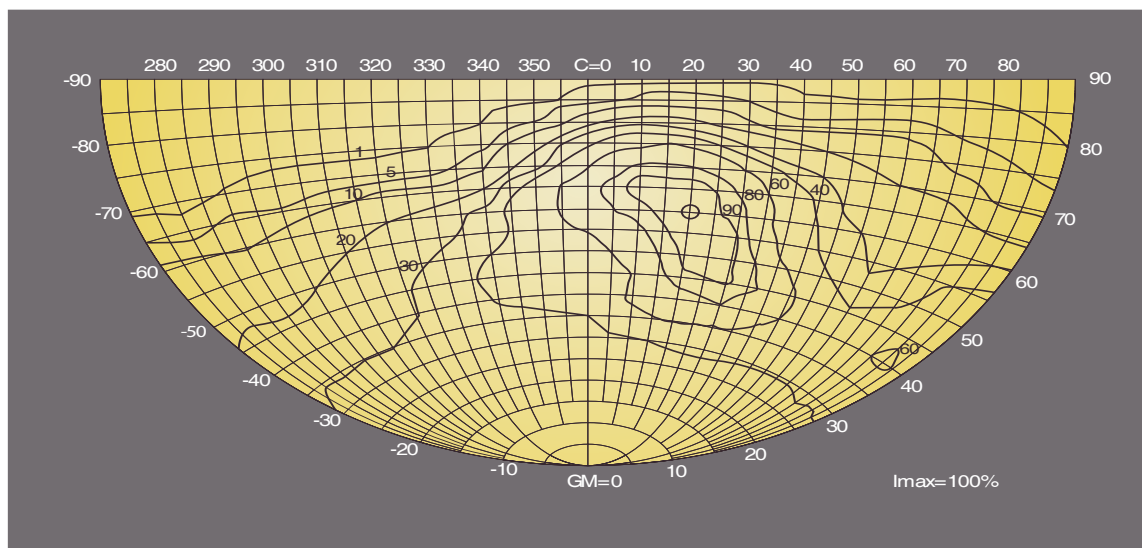


Curvas Isocandelas

El diagrama de curvas isocandelas (Fig.2.11), es otro método para representar la distribución del flujo luminoso, el cual consiste en imaginar la luminaria en el centro de una esfera, en cuya superficie exterior se unen por una línea los puntos de igual intensidad.

Generalmente las luminarias tienen un plano de simetría como mínimo, por lo que se desarrolla solamente una semiesfera.

Tabla 1.1. Curvas Isocandelas (Fuente: CIE 132-1999)



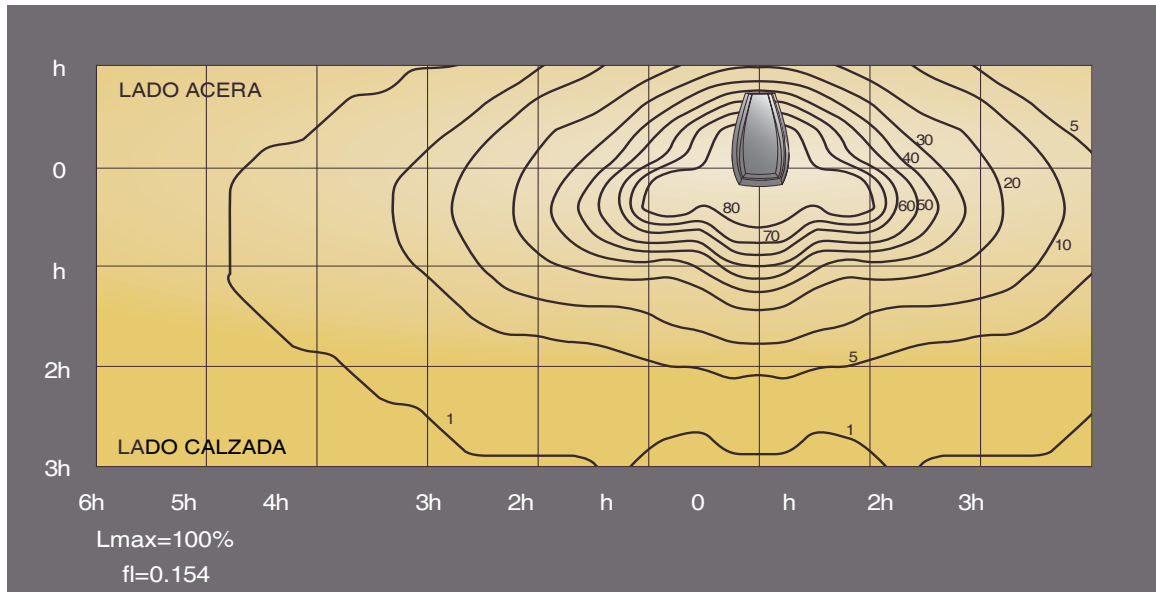
Esta representación es más completa, pero con el inconveniente que se necesita una mayor experiencia para ser interpretada.

Curvas Isolux

El flujo emitido por una fuente luminosa, ofrece un nivel de iluminación (luminancia), en una superficie cuyos valores son medidos en lux.

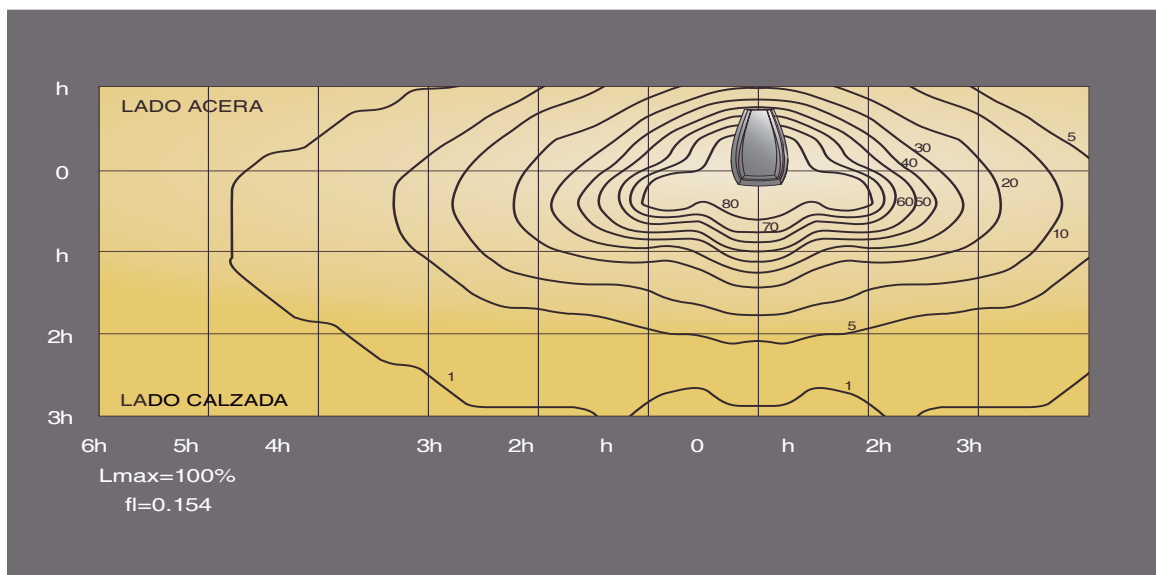
Al ser proyectados estos valores sobre un mismo plano y se unen por medio de una línea los de igual valor, da lugar a las Curvas Isolux.

Figura 2.11 Curvas Isolux (Fuente: Luminotecnia, iluminación de interiores y exteriores)



En este tipo de curvas también se pueden representar varias luminarias. Ejemplo: tramos de calzadas en donde las curvas se interpolarían para dar diferentes lecturas en luxes. ^{REF4}

Figura 2.12 Curvas Isolux con varias luminarias (Fuente: Luminotecnia, iluminación de interiores y exteriores)

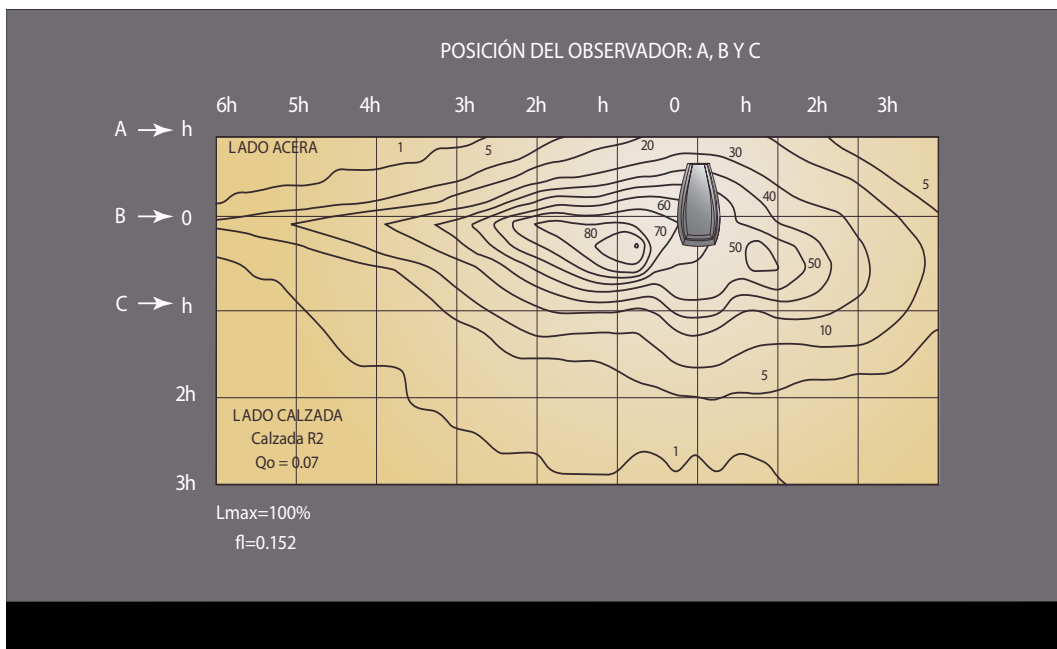


Curvas Isoluminancias

Por último, las luminancias que dependen del flujo luminoso reflejado por una superficie en la dirección del observador.

Los valores se miden en candelas por metro cuadrado (cd/m^2) y representa a través de las Curvas Isoluminancias.

Figura 2.13 Curvas isoluminancias (Fuente: Luminotecnia, iluminación de interiores y exteriores)



Esta curva se obtiene mediante las lecturas que da el Luminancímetro o Luminómetro.

2.3 Mapas de luminancia

El uso de mapas de luminancia para medir la calidad de la luz reflejada en el pavimento y los objetos dentro del campo visual del conductor, permiten comprobar de manera práctica un proyecto de alumbrado.

A manera de recordatorio: 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 despiden 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 especializados, 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, confort visual, el nivel de iluminación, la uniformidad de la luminancia y contaminación visual entre otros.

Figura 2.14 Mapa de luminancia

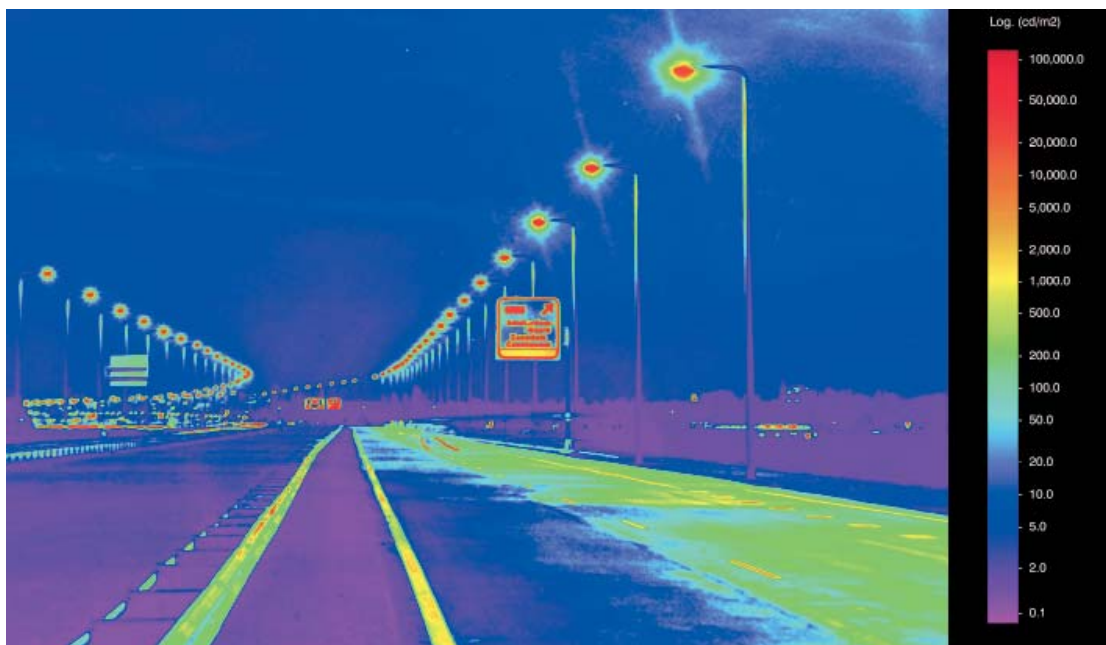


Imagen de Alto Rango Dinámico (HDRI. High Dynamic Range Image)

EL ojo humano es capaz de ver al mismo tiempo una extensa gama de niveles de luminancias, desde las más oscuras sombras alrededor de 0.001 cd/m^2 , hasta la escena más brillante iluminada por el sol, alrededor de $100,000 \text{ cd/m}^2$, a esto se le conoce como "Rango Dinámico", que es la proporción que hay entre la máxima oscuridad y la máxima brillantez de una imagen o escena. En este caso sería de 100,000:1.

Este Rango Dinámico representa la proporción que hay entre dos valores de luminancia expresados en candelas por metro cuadrado (cd/m^2).

Al realizar mapas de luminancias, es importante tener en cuenta que la imagen o fotografía que se utilice debe ser HDRI (High Dynamic Range Image) Imagen de Alto Rango Dinámico, por ser lo que más se acerca a la imagen que crea el ojo humano.

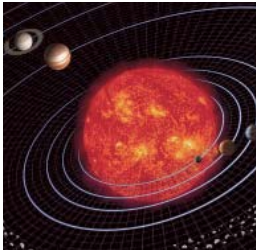


3.1 Termorradiación y luminiscencia

Generalidades

La luz se compone de radiaciones electromagnéticas en forma de ondas que pueden producirse de manera diversa, según las causas que la provoquen. Cuando la causa se debe exclusivamente a la temperatura del cuerpo radiante, el fenómeno se llama termorradiación, en todos los demás casos se llama luminiscencia.

En la Fig. 3.1, se indican los principales agentes físicos que intervienen en la producción de luz y sus respectivas fuentes.

Figura 3.1 Cuadro de los agentes físicos que intervienen en la producción de luz (Fuente: Philips)

PRODUCCIÓN DE LUZ			
Termorradiación		Luminiscencia	
Natural	Combustión Incandescencia  Sol	Descarga en el cielo de un gas  Rayo	Radiación de un cuerpo sólido  Luciérnaga
	Artificial	Llama Luz de gas Arco eléctrico Lámpara incandescente	Lámpara de vapor metálico Lámpara de gas noble Lámpara de efluvios Lámpara Xenón

Termorradiación

Termorradiación es la radiación (calor y luz) emitida por un cuerpo caliente. La energía de esta radiación depende de la capacidad calorífica del cuerpo radiante.

El fenómeno de termorradiación se basa en la radiación de luz y calor por parte de un cuerpo caliente. A este sistema pertenece el alumbrado incandescente, y por tanto todas las lámparas de incandescencia generan luz a partir del fenómeno de termorradiación.

La luz que se obtiene va siempre acompañada de una cuantiosa radiación térmica, que por lo general constituye una fuente de pérdida de energía, cuando de lo que se trata es de producir luz.

Al calentar un trozo de metal, se obtiene una radiación visible que se aprecia por el color de incandescencia que adquiere el cuerpo y que varía según la temperatura, tal como se muestra en la siguiente tabla. (Tabla 3.1)

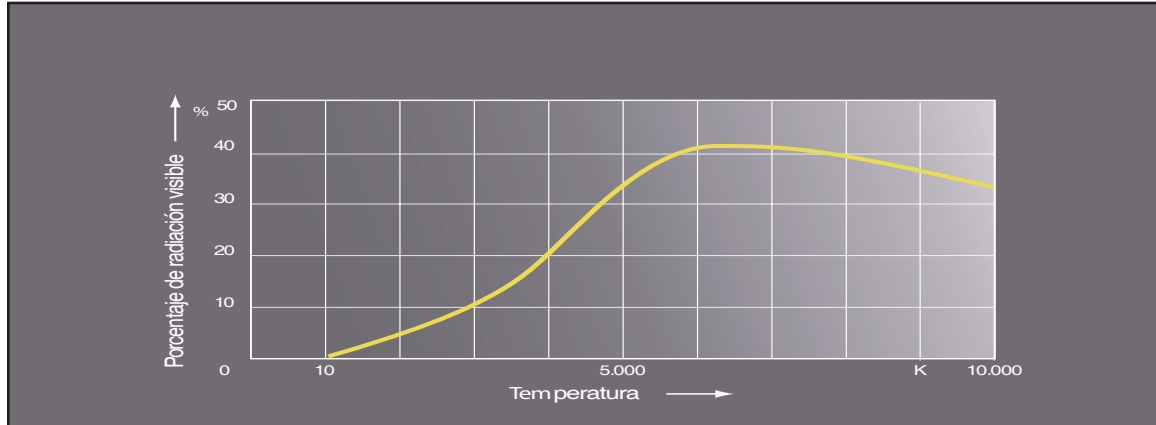
Tabla 3.1 Colores de incandescencia del metal a distintas temperaturas (Fuente: Phillips)

Temperatura °C	Color de incandescencia
400	rojo - gris incipiente
700	rojo - gris
900	rojo - oscuro
1,100	rojo - amarillo
1,300	rojo - claro
1,500	rojo - blanco incipiente
2,000 en adelante	rojo - blanco

El porcentaje de radiación visible aumenta en función de la temperatura del radiador.

La Fig. 3.2 muestra que a los 6,500 K se obtiene el máximo nivel de radiación visible y sería inútil aumentar la temperatura del radiador, con la pretensión de conseguir un nivel mayor al 40%.

Figura 3.2 Radiación visible en función de la temperatura absoluta
(Fuente:Philips)



Termorradiación natural

En la naturaleza misma, se encuentra un ejemplo evidente de producción de luz a gran escala mediante la termorradiación que brinda tanto el Sol como las demás estrellas similares a él.

El Sol, es una enorme bola de hidrógeno en estado incandescente, en la que una radiación nuclear está transformando constantemente hidrógeno (H_2) en Helio (He). En el proceso se liberan tremendas cantidades de energía que son liberadas al Universo.

El Sol emite una gran energía y cerca de un 40% de la radiación se transforma en luz visible, el cual corresponde al máximo “rendimiento óptico” a 6,500 K.

Termorradiación artificial

Es posible obtener luz por termorradiación artificial, calentando cualquier materia o cuerpo sólido a una elevada temperatura, bien sea por combustión o incandescencia.

Luz de la llama de alumbrado: El radiador térmico más antiguo de la historia y también el más primitivo fue la llama de alumbrado, producida por la combustión de una antorcha encendida. Posteriormente surgió la lámpara de aceite, la de petróleo y la vela de cera, que fueron las fuentes de alumbrado más utilizadas en la antigüedad.

A principios del siglo XIX comenzó a utilizarse el gas de carbón mineral (hulla), para obtener una llama de alumbrado en lugar de sus sucedoras sustancias sólidas como la cera y el sebo, así como las sustancias líquidas como el aceite y el petróleo.

Luz del arco eléctrico: Un claro ejemplo para generar luz del arco eléctrico es cuando dos barras de carbón en contacto por las que circula una corriente eléctrica se separan rápidamente hasta una determinada distancia, se produce entre sus puntas un potente arco eléctrico permanente.

El arco eléctrico produce un 5% de la luz emitida, correspondiendo el resto a los cráteres incandescentes formados en las dos barras de carbón. Esta clase de arco cuya intensidad de corriente es bastante elevada, no debe confundirse con los arcos de descarga gaseosa.

Luz de un cuerpo incandescente en el vacío: Cuando circula una corriente eléctrica por una resistencia óhmica, ésta se calienta y si esto tiene lugar en el vacío, se torna incandescente adquiriendo un color rojo-blanco a temperaturas comprendidas entre los 2,000°C y 3,000°C, en cuyo caso emite luz y calor de la misma manera que lo hace un termorradiador.

Henrich Goebel fue el primero que puso en práctica este principio. En el año 1854 construyó las primeras “lámparas incandescentes” eléctricas, utilizando unos frascos de colonia vacíos en los que encerró herméticamente un filamento hecho con fibras de bambú carbonizadas. Sin embargo en 1879, Thomas Alva Edison “posdescubrió” la lámpara incandescente con filamento de carbón y le dio una utilidad práctica como artículo de serie. Paralelamente a Edison, el inglés Swan también logró una lámpara incandescente usual.

El filamento de carbón: Entre los años 1880 a 1909, las lámparas utilizadas eran de filamento de carbón compuesto de fibras de bambú o papel “coquizadas”.

Inicialmente el punto de fusión de este filamento era aproximadamente de 3,700 °C, pero a causa de su elevado índice de vaporización, las lámparas sólo podían construirse para una temperatura que emite el cuerpo negro en función de su temperatura. Se llama curva de temperatura de servicio de unos 1,900 °C. Debido a esto, el rendimiento luminoso no llegaba a ser realmente de más de 3 a 5 lm/W.

El filamento metálico: Entre los metales difícilmente fusibles se encontraban el osmio, tantalio y principalmente el wolframio.

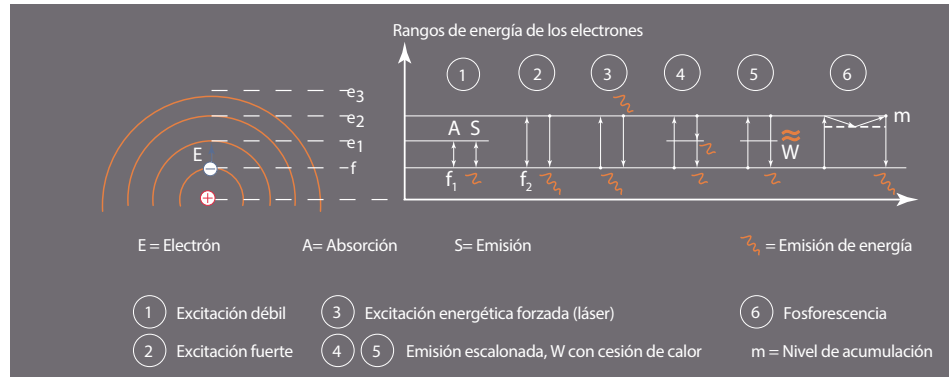
El wolframio tiene un punto de fusión de aproximadamente 3,400 °C, con un índice de evaporación notablemente inferior al del carbón. Con una duración de la lámpara de aproximadamente 1,000 horas, la temperatura de incandescencia del filamento llegaba a los 2,400 °C y con ello se obtenía un rendimiento luminoso de 8 a 10 lm/W.

Luminiscencia

Se conoce como todo proceso de emisión de luz cuyo origen no radica exclusivamente en las altas temperaturas si no que, por el contrario, es una fuente de “luz fría” en la que la emisión de radiaciones lumínicas es provocada en condiciones de temperatura ambiente o temperatura baja. Dicho fenómeno se caracteriza porque sólo ciertas partículas de los átomos de la materia, (los electrones), son incitados a producir radiaciones electromagnéticas. Emisión de radiación óptica causada por cualquier proceso no térmico.

El estudio del átomo según el modelo atómico de Böhr, facilita el entendimiento del fenómeno de luminiscencia

Figura 3.3 Modelo atómico de Böhr (Fuente: Philips)



De acuerdo a este modelo, cada átomo está formado por un núcleo atómico positivo y por una envoltura de electrones negativos distribuidos en capas que giran alrededor del núcleo, siguiendo órbitas determinadas. En el átomo normalmente existe un equilibrio eléctrico, es decir el número de cargas positivas es igual al número de cargas negativas (electrones). Este equilibrio se denomina estado fundamental del electrón E y para los electrones de la órbita más interna, es idéntico a la línea de base f que se observa en la Fig. 3.3.

Si la cantidad de energía suministrada es mayor, el electrón (E) puede llegar a alcanzar instantáneamente una órbita más externa. Como consecuencia del mayor rango de energía conseguido, la radiación emitida al volver el electrón a la base (f) será más rica en energía.

Por lo tanto, las distintas capas de energía corresponden a un nivel de energía perfectamente determinado y por ello, no pueden existir estados intermedios. De aquí se deduce que para excitar a un átomo se necesita una cantidad de energía exactamente determinada, la cual es emitida en forma de radiación y/o desprendimiento de calor al recuperar el átomo su forma fundamental.

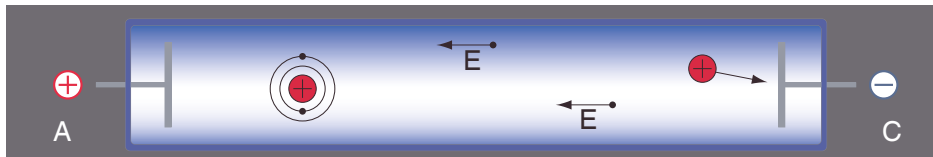
Desde el punto de vista atómico, la emisión de la energía transformada en este proceso se produce en porciones o partes discontinuas denominadas cuantos de energía (Böhr postuló que el electrón no podía girar a cualquier distancia del núcleo, sino en ciertas órbitas solamente). Sin embargo, en el campo de la Luminotecnia práctica, la luz emitida en esa transformación se considera emitida de manera continua en forma de ondas electromagnéticas, lo que resulta aceptable para los casos normales de su aplicación.

A través de la teoría de los cuantos de energía formulada por Max Plank, se demuestra que los distintos elementos químicos al ser excitados, no emiten un espectro continuo debido a la diferente estructura de sus capas electrónicas, sino solamente longitudes de onda muy particulares (líneas) dentro de todo el espectro electromagnético. A estos espectros se les conoce con el nombre de espectros de líneas. Cada sustancia posee un espectro de líneas característico. Esto mismo ocurre con los gases luminiscentes, como por ejemplo: el vapor de sodio, cuyo espectro está compuesto por una doble línea amarilla cuyas longitudes de onda corresponden a 589 nm y 589.6 nm respectivamente. Según el procedimiento físico empleado para excitar los átomos, el tipo de radiación y la forma en que se emite se distinguen varias clases de luminiscencia.

Luz de descarga eléctrica en el seno de un gas

Las cargas eléctricas libres (electrones), además de átomos de gas neutrales, se encuentran en todos los gases, principalmente en los que contienen las lámparas de descarga.

Figura 3.4 Tubo de descarga de gas (Fuente: Indal-Philips)



Si en un tubo de descarga (Fig.3.4) se aplica una corriente continua al ánodo A (+) y al cátodo C (-), se crea entre A y C un campo eléctrico que acelera las cargas negativas (electrones) y las precipita hacia el ánodo. Al alcanzar un electrón una determinada velocidad, posee ya energía cinética suficiente para excitar un átomo de gas. Si la velocidad del electrón al chocar con el átomo del gas es aún mayor, el impacto puede provocar incluso el desprendimiento de un electrón de la corteza atómica, con lo cual el átomo queda con un electrón menos en su configuración es decir, se obtiene un ión positivo. Este fenómeno se denomina ionización por choque.

De esta forma aumenta aún más el número de electrones libres, pudiendo llegar incluso a aumentar en gran medida si la corriente eléctrica por ellos producida no se limita mediante una resistencia apropiada (estabilizador).

Junto con los electrones libres o desprendidos, se encuentran también iones positivos que se desplazan en sentido contrario al de los electrones, es decir hacia el cátodo, sin embargo debido a su pequeña velocidad no pueden provocar ninguna excitación de otras partículas gaseosas sino al contrario, transcurrido un breve espacio de tiempo, toman de nuevo un electrón a cambio de una emisión de energía.

De acuerdo con el gas noble o gas metálico con que se llene el recipiente de descarga, se obtendrán mediante la excitación atómica antes mencionada, los espectros de líneas o colores de luz característicos del elemento químico elegido. Por ejemplo, si el gas es neón, el color de la luz es rojo-anaranjado y si es vapor de mercurio, blanco-azulado.

Estos fenómenos tienen lugar dentro de un volumen comprendido entre dos electrodos, que queda limitado por la pared del recipiente de descarga. Este volumen forma una columna gaseosa de descarga.

Si la alimentación del tubo de descarga se realiza a través de corriente alterna en vez de continua, los electrodos cambian periódicamente su función, actuando unas veces de cátodo y otras de ánodo; por lo demás, el fenómeno de la producción luminosa es el mismo.

Las condiciones de la descarga eléctrica en el seno de un gas para la producción de luz, dependen básicamente de la presión del gas o vapor que exista en el interior del tubo de descarga. En este sentido se distinguen tres tipos de descarga:

- Descarga a baja presión
- Descarga a alta presión
- Descarga a muy alta presión

A medida que la presión es más alta, las líneas espectrales se ensanchan formando bandas cada vez mayores, con lo cual mejora el espectro cromático.

Para las lámparas de vapor metálico se requiere vaporizar primeramente el metal, que en frío se encuentra en estado sólido o líquido; por ello, se llenan estas lámparas con gas noble que es el primero que se inflama, suministrando el calor necesario para la vaporización del metal.

Descarga eléctrica a baja tensión entre electrodos calientes

Al introducir en un tubo de vidrio previamente evacuado una cierta cantidad de sodio sólido o mercurio líquido y un gas noble para lograr transformar el metal en vapor al producirse la descarga eléctrica, se obtiene una descarga de vapor metálico en el seno de un gas, que incluso puede provocarse a una tensión baja normal (220 V), con electrodos precalentados o calentados (cátodos calientes). De acuerdo a este principio es como funcionan las lámparas de vapor de sodio y de vapor de mercurio.

La luz emitida por las lámparas de vapor metálico depende de forma decisiva del espectro de líneas del vapor metálico elegido; de esta manera, la lámpara de vapor de sodio da una luz monocromática de color amarillo-anaranjado y la de vapor de mercurio una luz verde-azulada.

Los espectros discontinuos de estas lámparas se mejoran a través de distintos medios:

En las de mercurio:

- Combinación con luz incandescente (lámparas de luz mixta).
- Combinación con una capa fluorescente (lámparas de vapor de mercurio, color corregido).
- Añadiendo halógenos metálicos (lámparas de vapor de halógenos metálicos).

En las de sodio:

- Combinación con luz de mercurio en un recipiente de metal transparente, a alta presión de llenado (lámparas de vapor de sodio a alta presión).

Fotoluminiscencia

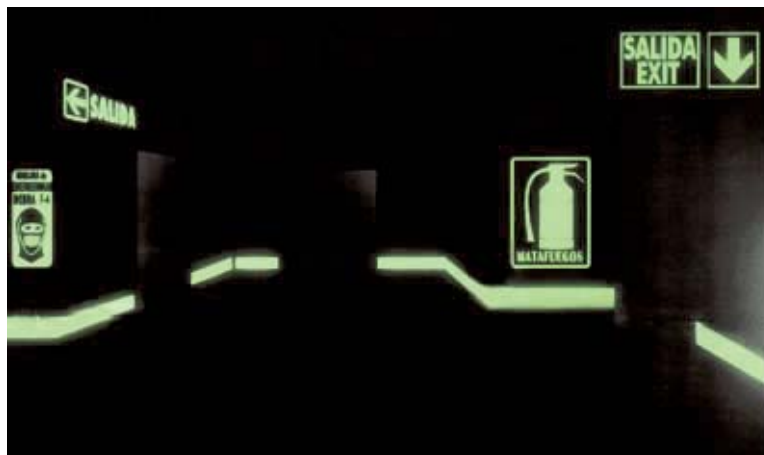
Se entiende por fotoluminiscencia, como la excitación a la luminiscencia de determinadas sustancias mediante una radiación, la mayoría de las veces radiación ultravioleta de onda corta. Las sustancias luminiscentes que se emplean, sólo emiten luz mientras son excitadas por la radiación ultravioleta de onda corta, la cual transforman en una radiación de onda más larga (luz en el espectro visible).

Las sustancias luminiscentes que se emplean entre otras, son el wolframato de calcio, wolframato de magnesio, silicato de zinc, silicato de cadmio, borato de cadmio, halofosfatos, etc.

Cada una de estas sustancias luminiscentes emite un determinado color de luz. A través de una mezcla apropiada de estas sustancias, se puede obtener prácticamente cualquier color de luz compuesto que se desee. Si se consigue que la emisión de cada uno de los componentes cromáticos se superpongan, se obtiene un espectro continuo que además, puede variar desde el blanco luz de día hasta el blanco cálido.

Se llama “fluorescencia” a todos aquellos fenómenos de luminiscencia en los que la radiación luminosa permanece mientras dura la excitación. El caso contrario a la fluorescencia es la fosforescencia.

Figura 3.5 Uso de la Fotoluminiscencia en señalizaciones

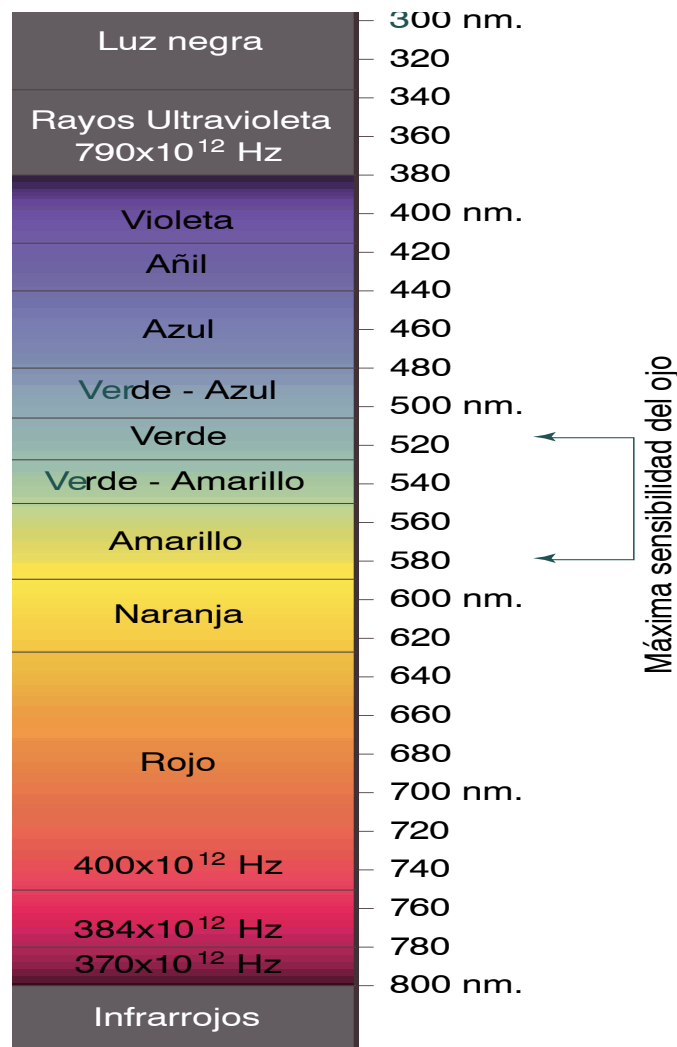


Condiciones que deben reunir las lámparas

Distribución espectral de la radiación total

Para hacer posible que las lámparas como transformadores de energía puedan trabajar con un alto rendimiento, la mayor parte de la energía absorbida deberán transformarla en radiación visible. Por otra parte, su luz debería ser blanca como la del día y con buena reproducción cromática, lo cual exige un espectro continuo que contenga todos los colores principales desde el violeta hasta el rojo, pero como la sensibilidad del ojo es máxima para la radiación amarillo-verdosa, lo más favorable en cuanto a rendimiento luminoso se refiere, es obtener el porcentaje mayor de radiación en la zona 555 nm.

Figura 3.6 Distribución Espectral



Luminancia

Aquellas lámparas que se emplean preferentemente al descubierto no deben tener una luminancia elevada, con el fin de que su deslumbramiento se mantenga dentro de unos límites soportables. El valor de la luminancia admisible depende del tipo de aplicación.

De otra manera, las lámparas que se utilizan en luminarias pueden tener grandes luminancias, ya que en ellas se amortigua el efecto de deslumbramiento.

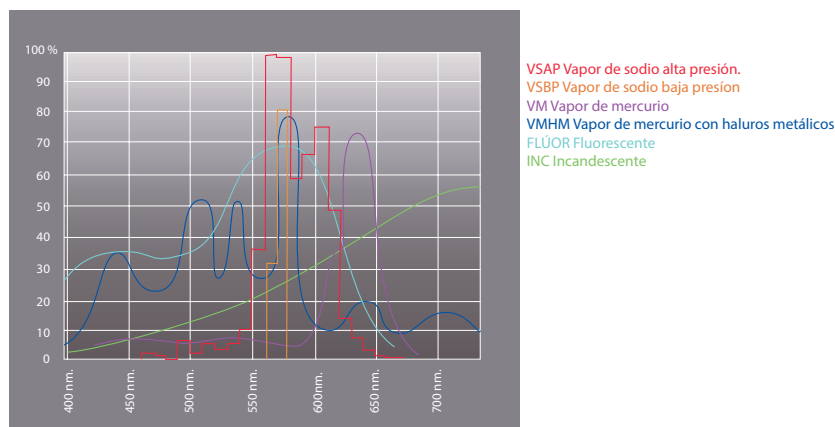
En términos generales, la luminancia que se puede obtener de una lámpara depende del sistema adoptado para la producción de luz, es decir, de la naturaleza física de la fuente y de si ésta es puntual, lineal o plana. La luminancia de las lámparas nunca puede aumentarse a través de cualquier sistema óptico pero sí debilitarse; como sucede con las capas difusoras.

Distribución de la intensidad luminosa

La radiación de una lámpara es distinta en todas las direcciones del espacio, siendo afectada por la posición del casquillo, los soportes del cuerpo luminoso, etc., lo que determina que cada tipo de lámpara posea una distribución típica de su intensidad luminosa.

Las curvas de distribución luminosa son necesarias para proyectar instalaciones de alumbrado, así como para el diseño de luminarias, porque su sistema óptico ha de ajustarse de tal forma a la curva de distribución luminosa de la lámpara, que la luz sea dirigida al lugar o punto de máxima necesidad.

Figura 3.7 Distribución de la energía espectral luminosa de las principales fuentes de luz artificial



Efecto biológico de la radiación emitida

Es de vital importancia que las lámparas no emitan ninguna radiación que pueda resultar peligrosa para el hombre, bien sea de inmediato o a largo plazo. Con los radiadores térmicos como son las lámparas incandescentes, se cumple esta condición desde un principio (la mayoría de la radiación producida es infrarroja).

Algunas descargas de gases, como las de vapor de mercurio, contienen por naturaleza un porcentaje de radiación ultravioleta (UV) que se clasifica en:

- La Radiación UV-A: tiene longitud de onda larga (320 y 400 nm).
- La Radiación UVA: Bronceadora o de onda larga (entre 315 y 380 nm).
- La Radiación UV-B: Tiene longitud de onda media (de 290 a 320nm). Favorece la producción en el cuerpo de la vitamina D.
- La Radiación UV-C: Tiene longitud de onda corta (de 200 a 290 nm). Bactericida. Destruye gérmenes y materia orgánica. Estos efectos se pueden aumentar por la debilitación de la capa de ozono de la atmósfera.

El efecto permanente de las radiaciones UV-B o UV-C produce quemaduras en la piel expuesta y conjuntivitis en los ojos que no están protegidos. En las lámparas para alumbrado general esto puede evitarse con el empleo de tipos de vidrio apropiados que absorban la radiación crítica.

Color apropiado para cada aplicación

El color de luz de una lámpara se determina por la composición espectral de su radiación. En la Tabla se establecen grupos de luz para las lámparas empleadas en el alumbrado general:

Tabla 3.2 Grupos de luz (Fuente: Indal-Phillips)

Color de luz	Temperatura de color
Incandescencia - fluorescente	2,600 - 2,700 K
Blanco cálido	2,900 - 3,000 K
Blanco o blanco neutral	3,500 - 4,100 K
Blanco frío	4,000 - 4,500 K
Blanco luz de día	6,000 - 6,500 K

Mientras que las lámparas incandescentes por su alto contenido en rojo (a excepción de las lámparas de color), sólo pueden radiar un color blanco cálido, los colores de luz de las lámparas de descarga están determinados por los gases o vapores elegidos para ellas. Por ejemplo, el color amarillo de la descarga del vapor de sodio, o el azul pálido de la de vapor de mercurio.

Se pueden obtener otras variantes cromáticas, combinando diferentes vapores metálicos o modificando la presión de vapor.

Grupos de luz

Con las lámparas fluorescentes se ofrece la posibilidad de conseguir cualquier matiz que se desee, mediante la selección o mezcla de una gran cantidad de sustancias luminiscentes conocidas, para adaptarlas a cada tipo de aplicación.

Calidad de reproducción cromática

Se entiende como reproducción cromática, al aspecto del color que presentan las superficies iluminadas. Su calidad reproductora no sólo depende de la tonalidad de la luz incidente, sino básicamente de su composición espectral. Por lo tanto, la temperatura de color se refiere únicamente al color de la luz, pero no a su composición espectral. Así, dos fuentes de luz pueden tener un color muy parecido y poseer al mismo tiempo unas propiedades de reproducción cromática muy diferentes. La mayoría de los casos lo que se requiere de una lámpara es una buena reproducción cromática, lo cual requiere una distribución espectral diferente a la que se necesitaría para conseguir un elevado rendimiento luminoso.

Flujo luminoso constante

Por motivos físicos y tecnológicos, en la práctica no es posible mantener el valor del flujo luminoso a un 100% en toda la duración de la fuente de luz.

Los flujos luminosos que se usualmente se indican en los catálogos, se refieren en el caso de las lámparas de incandescencia, a lámparas que no han funcionado todavía, y en el caso de las de descarga, a lámparas con 100 horas de funcionamiento en las cuales se considera que se ha estabilizado el mismo.

Rendimiento luminoso

El máximo rendimiento luminoso que se puede conseguir en el caso más favorable es de 683 lm/W. A pesar de que no se puede llegar a ese valor, actualmente se han conseguido lámparas con un rendimiento bastante alto que permiten obtener iluminaciones elevadas de forma relativamente económica.

Sin embargo, en muchos casos hay que decidir cuál es la propiedad de la lámpara que resulta más valiosa: si un elevado rendimiento luminoso o una reproducción cromática extremadamente buena.

Vida media y vida útil

La vida media representa la media aritmética de la duración en horas de cada una de las lámparas de un grupo suficientemente representativo del mismo modelo y tipo.

La vida útil, es una magnitud referida a la práctica dada también medida en horas, al cabo de las cuales el flujo luminoso de una determinada instalación de alumbrado ha descendido a un valor tal, que la lámpara ya no es rentable aunque esté en condiciones de seguir funcionando.

Repercusiones en la red de alimentación

Toda lámpara moderna requiere que su funcionamiento no tenga una repercusión importante en la red de alimentación. Con lámparas incandescentes, esta repercusión queda limitada a una sobreintensidad en el momento de la conexión, debido a su pequeña resistencia con la lámpara en frío.

- Lámparas de vapor de mercurio de alta presión: Requieren un tiempo de enfriamiento de 5 a 8 minutos, para poder reencender en caliente y otro tanto para alcanzar el flujo luminoso total.
- Lámparas de halogenuros metálicos: Se comportan igual que las de vapor de mercurio, existiendo algunos tipos que pueden reencender en caliente mediante balastos.
- Lámparas de vapor de sodio a alta presión: Los tipos que poseen aparato de encendido separado reencienden en caliente dentro de un minuto y alcanzan el flujo total prácticamente sin demora. Los otros tipos sin aparato de encendido separado, se comportan de forma similar a las lámparas de vapor de mercurio.
- Lámparas de vapor de sodio a baja presión: Se comportan como las lámparas de vapor de mercurio.

Efecto estroboscópico

En aquellas fuentes de luz artificiales que funcionan con corriente alterna, su emisión cesa cada vez que la corriente pasa por un punto cero. Esto tiene lugar dos veces por periodo, por lo que para una frecuencia de 50 Hz (periodos por segundo) se producirán 100 instantes de oscuridad por segundo.

El filamento de las lámparas incandescentes posee alta inercia térmica, provocando un ligero descenso de la emisión luminosa debido a esta circunstancia, y que pasa desapercibido por el ojo excepto cuando lámparas de poca potencia funcionan con redes de 25 Hz.

En el caso de las lámparas de descarga que funcionan con redes de 50 Hz, el ojo no es capaz de apreciar las variaciones tan rápidas de luz que se producen, pero puede darse el caso de que las lámparas iluminen zonas en las que se realicen movimientos rápidos, observándose entonces como si estos movimientos se realizaran de forma intermitente e incluso como si estuvieran parados. Este fenómeno se conoce como efecto estroboscópico y se puede reducir hasta hacerlo insensible, por medio de montajes especiales de alimentación de las lámparas, o donde se disponga de línea trifásica, distribuyendo su conexión entre las tres fases.

Posición de funcionamiento

Una lámpara eléctrica usualmente está construida para una determinada posición de funcionamiento en la que presenta unas óptimas propiedades de trabajo. Fuera de esta posición, las propiedades cambian desfavorablemente, ya sea por sobrecalentamiento de la espiral, del casquillo o de la ampolla de vidrio, por desviación del arco de las lámparas de descarga o por variaciones del calor circundante. Debido a esto, hay que tener en cuenta las tolerancias dadas en los correspondientes catálogos de las lámparas, a fin de evitar su agotamiento prematuro por inadecuada posición de funcionamiento.

Las abreviaturas utilizadas indican la posición principal de funcionamiento y el ángulo de inclinación admisible en grados.

Principales posiciones de funcionamiento:

S (s) = Posición vertical (de pie, casquillo abajo).

H (h) = Posición vertical (colgando, casquillo arriba).

P (p) = Posición horizontal (casquillo a un lado).

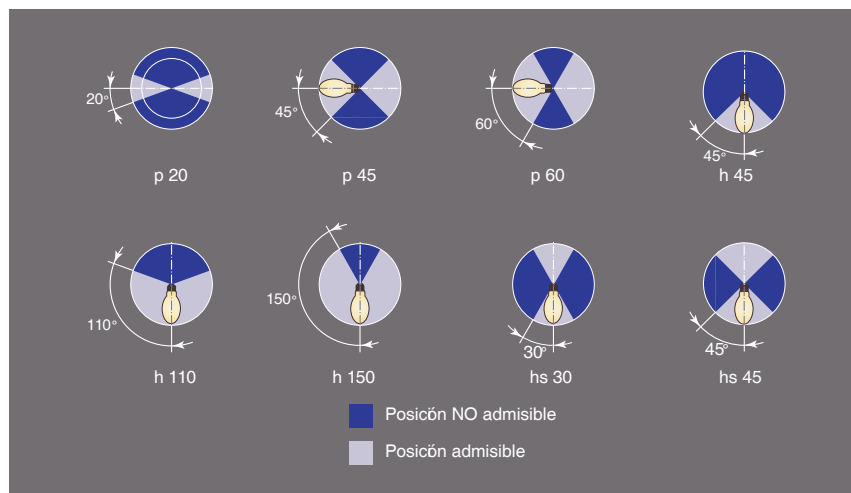
HS (hs) = Posición vertical (casquillo arriba o abajo).

Universal = Permite cualquier posición de colocación.

Ángulos de inclinación admisibles:

De la posición principal de funcionamiento le sigue una cifra que señala la inclinación admisible en grados, con respecto a aquella.

Figura 3.8 Esquema de posiciones de funcionamiento (Fuente: Philips)



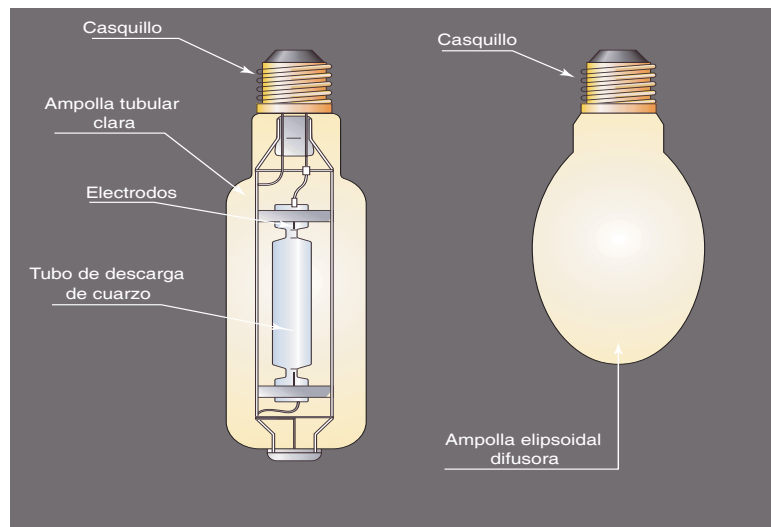
3.2 Lámparas para alumbrado público

Este capítulo se refiere únicamente a los tipos de lámparas más usados en la actualidad para los sistemas de alumbrado como son: lámparas de vapor de sodio de alta presión y lámparas de aditivos metálicos, mencionando las lámparas de vapor de sodio de baja presión.

Lámparas de aditivos metálicos

Son lámparas de vapor de mercurio a alta presión que adicionalmente, contienen halogenuros de tierras raras como el Dysprosio (Dy), Holmio (Ho) y el Tulio (Tm). Estos haluros son en parte vaporizados cuando la lámpara alcanza su temperatura normal operativa. El vapor de haluros, se disocia posteriormente dentro de la zona central caliente del arco en halógeno y en metal, consiguiendo de esta manera aumentar considerablemente la eficacia luminosa y aproximar el color al de la luz diurna solar. Se utilizan diversas combinaciones de halogenuros (sodio, yodo, ozono) a los que se añade indio, litio, escandio, talio, etc.

Figura 3.9 Lámparas de halogenuros o aditivos metálicos (Fuente: Indal-Philips)



Partes principales

Tubo de descarga: Hecho de cuarzo puro. En ocasiones se aplica una capa blanca de óxido de circonio en la parte externa de las cavidades del electrodo, para aumentar en ese punto la temperatura de la pared.

Electrodos: Similares a los que lleva la lámpara de vapor de mercurio a alta presión.

Ampolla externa: El vidrio externo de la ampolla de las lámparas de halogenuros está hecho de vidrio duro o de cuarzo. También las hay que no tengan ampolla externa.

Superficie interna de las ampollas: Tienen forma oval poseen una capa de fósforo para convertir la radiación ultravioleta de la descarga en radiación visible. Sin embargo, los haluros empleados en la lámpara de halogenuro metálico producen sólo una pequeña cantidad de ultra violeta y principalmente ésta irradiará en la zona de longitud de onda ultra violeta del espectro, donde la conversión en radiación visible es escasa.

Gas de relleno en el tubo de descarga: El tubo de descarga contiene en su interior una mezcla de gases inertes (neón y argón o cripton-argón), una dosis de mercurio y los haluros apropiados de acuerdo con el tipo de lámpara.

Gas de relleno en la ampolla externa: La ampolla externa de una lámpara de aditivo metálico cuyo tubo de descarga está relleno de una mezcla de neón-argón, también debe estar rellena de neón para que la presión de neón que se encuentra dentro y fuera del tubo sea la misma. En caso de que el tubo de descarga esté relleno de una mezcla cripton-argón se puede utilizar nitrógeno en la ampolla externa, o esta última puede ser eliminada.

Las condiciones de funcionamiento de las lámparas de aditivos metálicos son muy parecidas a las de vapor de mercurio convencionales, estando dispuestas para ser conectadas en serie con un balastro limitador de la corriente, necesitando un condensador de compensación.

Debido a los aditivos, la tensión de encendido de estas lámparas es elevada, necesitando el empleo de un cebador o de un aparato de encendido con tensiones de choque de 0.8 a 5 KV.

Las lámparas de aditivos metálicos en su gran mayoría, permiten un re-encendido inmediato con las lámparas en caliente (después de ser apagadas), a través del empleo de tensiones de choque de 35 a 60 KV, y de no ser así, es necesario que se enfríen entre cuatro y quince minutos para ser encendidas de nuevo.

Lámparas de vapor de sodio

En este apartado se verán las lámparas de descarga, en cuyo tubo de descarga se introduce vapor de sodio. Se describen tanto las lámparas de vapor de sodio a baja presión, así como las lámparas de sodio a alta presión.

Lámparas de sodio a baja presión

Hay una gran similitud entre el funcionamiento de una lámpara de vapor de sodio a baja presión y una lámpara de vapor de mercurio a baja presión (o fluorescente). Sin embargo, mientras que en la de mercurio de baja presión, la luz se produce al convertir la radiación ultravioleta de la descarga de mercurio en radiación visible, utilizando un polvo fluorescente en la superficie interna, en la de sodio de baja presión, la radiación visible se produce por la descarga directa del sodio.

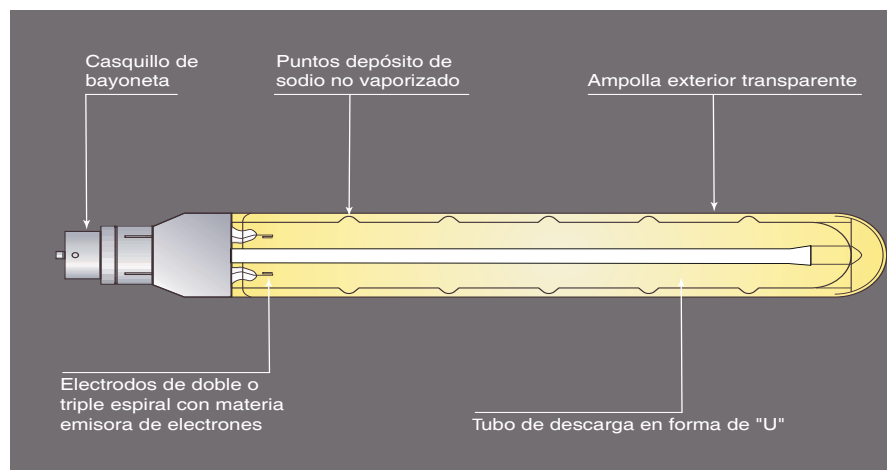
Principio de funcionamiento:

En una lámpara de sodio de baja presión, el tubo de descarga es en general en forma de U y está contenida en una cubierta exterior de vidrio tubular vacío, con capa de óxido de indio en la superficie interna. El vacío junto con la capa la cual actúa como un reflector selectivo de infrarrojo, ayuda a mantener la pared del tubo de descarga a una temperatura de trabajo adecuada. Estas medidas son necesarias para que cuando se condensa el sodio, se deposita en hendiduras del vidrio, se evapore con una pérdida mínima de calor; debido a eso, se logra la mayor eficiencia luminosa posible.

El gas neón contenido dentro de la lámpara, sirve para iniciar la descarga y para desarrollar el calor suficiente como para vaporizar el sodio. Esto es debido a la luminiscencia rojo-anaranjada durante los primeros minutos de funcionamiento. El sodio metálico se evapora en forma gradual, debido a eso se produce la característica luz amarilla monocromática, con líneas de 589 nm y 589.6 nm en el espectro. El color rojo, que en principio se produce por la descarga de neón, se suprime enérgicamente durante el funcionamiento porque los potenciales de excitación y de ionización de sodio son mucho menores que los del neón.

La lámpara alcanza su flujo luminoso establecido en aproximadamente diez minutos. En caso de que el suministro de alimentación se interrumpa momentáneamente, volverá a encender de forma inmediata ya que la presión de vapor es bastante baja y el voltaje aplicado suficiente como para restablecer el arco.

Figura 3.10 Lámpara de sodio a baja presión



Tubo de descarga: En una lámpara de sodio de alta presión, el tubo de descarga de una es en forma de U, para aprovechar espacio y proveer un mejor aislamiento térmico. Está hecho de vidrio cal-soda y tiene una superficie interna revestida de vidrio de borato para formar una capa protectora contra el vapor de sodio.

Este tubo contiene un número de pequeñas hendiduras o agujeros, donde se deposita el sodio durante la fabricación.

Relleno del tubo de descarga: El relleno consiste en sodio metálico de alta pureza y en una mezcla de neón y argón, la cual actúa como un gas de arranque y de amortiguación.

Electrodos: Las lámparas de sodio de baja presión tienen electrodos de arranque frío. Estos consisten en un alambre de wolframio triple. De esta manera puede mantener una gran cantidad de material emisor.

Ampolla externa: Esta ampolla está vacía y se reviste en su superficie interna con una fina película de material reflector infrarrojo. El reflector infrarrojo sirve para reflejar la mayor parte de la radiación de calor que vuelve al tubo de descarga. De este modo se mantiene a la temperatura deseada, mientras que transmite la radiación visible.

Este tipo de lámpara precisa de un equipo auxiliar formado por alimentador con autotransformador o balastro e ignitor con tensión de impulso según el tipo. Necesita de un condensador de compensación.

Actualmente el flujo luminoso máximo de esta lámpara se logra a los 7 minutos de encendido. Cuando se apaga la lámpara necesita enfriarse unos minutos para encenderse nuevamente.

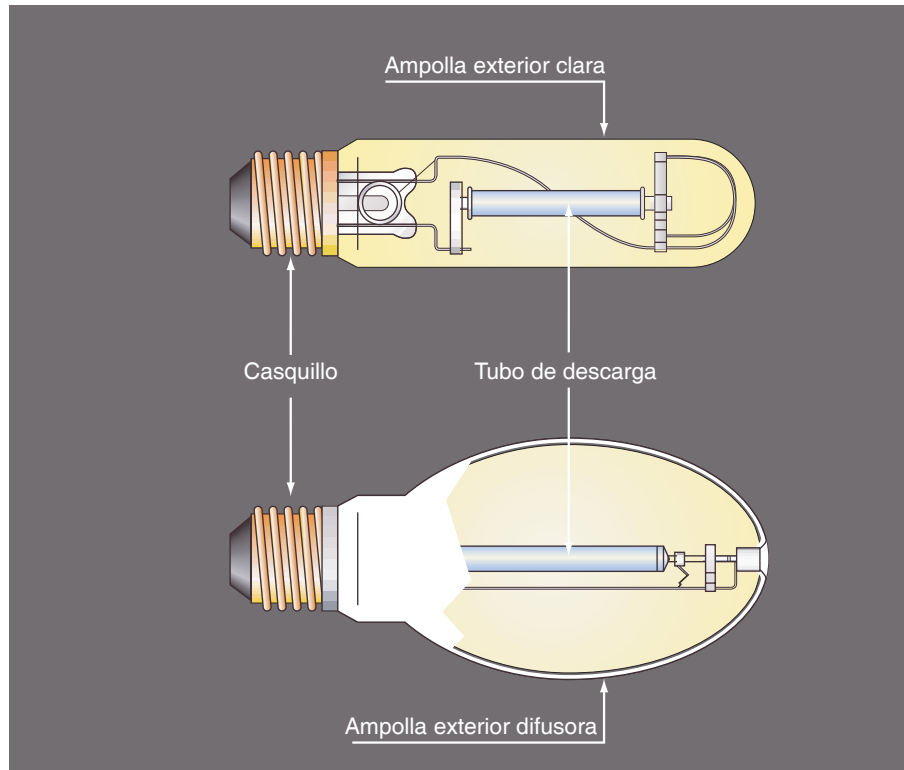
Lámparas de sodio a alta presión

La lámpara de sodio a alta presión es muy distinta físicamente de la lámpara de sodio a baja presión, ya que la presión de vapor es más alta en la primera. Este factor de presión también es causa de muchas otras diferencias entre las dos lámparas, incluyendo las propiedades de la luz emitida.

El tubo de descarga en una lámpara de sodio de alta presión, contiene una gran cantidad de sodio para dar condiciones de vapor saturado cuando la lámpara está en funcionamiento. Adicionalmente tiene un exceso de mercurio para proporcionar un gas amortiguador y se incluye xenón, para facilitar el encendido y limitar la conducción de calor del arco de descarga a la pared del tubo. El tubo de descarga se aloja en una envoltura de vidrio protector que está vacía.

Las lámparas de sodio a alta presión irradian energía a través de una buena parte del espectro visible. Por lo tanto, en comparación con la lámpara de sodio a baja presión, ofrecen una reproducción de color bastante aceptable.

Figura 3.11 Lámparas de vapor de sodio a alta presión



Tubo de descarga: Está hecho de cerámica de óxido de aluminio (aluminio sinterizado) muy resistente al calor y a las reacciones químicas con el vapor de sodio.

Electrodos: Están cubiertos por una capa de material emisor que consiste en una varilla de wolframio con una serpentina de wolframio enroscada alrededor de la misma.

Relleno: En el interior del tubo de descarga se encuentran sodio, mercurio y un gas noble (xenón o argón) de los cuales es el sodio el principal productor de luz.

Ampolla externa: Esta ampolla suele estar vacía.

La forma de esta lámpara puede ser tanto ovoidal como tubular. La ovoidal tiene un revestimiento interno. Sin embargo, ya que el tubo de descarga de la lámpara de sodio alta presión no produce prácticamente ninguna radiación ultra violeta, el revestimiento es simplemente una capa difusa de polvo blanco para disminuir el elevado brillo del tubo de descarga. La ampolla tubular es siempre de vidrio claro.


Arrancadores y arrancadores auxiliares: La mayoría de las lámparas de sodio de alta presión llevan un arrancador auxiliar incorporado, el cual ayuda a reducir la medida del voltaje pico de encendido que se necesita para encender la lámpara. En algunos casos, tanto el arrancador incorporado y el arrancador auxiliar, se encuentran en la misma lámpara.

Estas lámparas requieren de un equipo auxiliar formado por un balastro e ignitor con tensión de impulso según el tipo. También necesitan un condensador de compensación.

Se requieren de cinco minutos de encendido para que esta lámpara alcance su valor nominal. Cuando se apaga una lámpara debido a la gran presión del quemador, necesita enfriarse entre cuatro y siete minutos para encenderse nuevamente.

Comparativas de eficiencia de lámparas existentes en el mercado nacional

Tabla 3.3 Lámparas de vapor de sodio de alta presión

LÁMPARAS DE VAPOR DE SODIO A ALTA PRESIÓN (ALTA EFICIENCIA) <small>REF5</small>								
Lámpara Tipo Ovoide MASTER SON PIS PLUS NAV-TSUPER 4 Y	Potencia W	Voltaje V	Base	Flujo luminoso	Eficiencia lm/W	Temperatura de color	Rendimiento de color	Duración Horas
	100	220	E 40	10,200	107	2,000	25	32,000
	150	220	E 40	17,000	113			
	250	220	E 40	31,100	124			
	400	220	E 40	55,500	139			

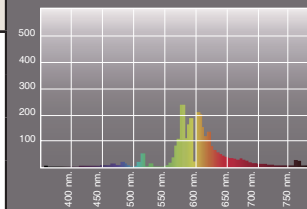


Figura 3.12 Gráfica de la vida útil de las lámparas de vapor de sodio de alta presión

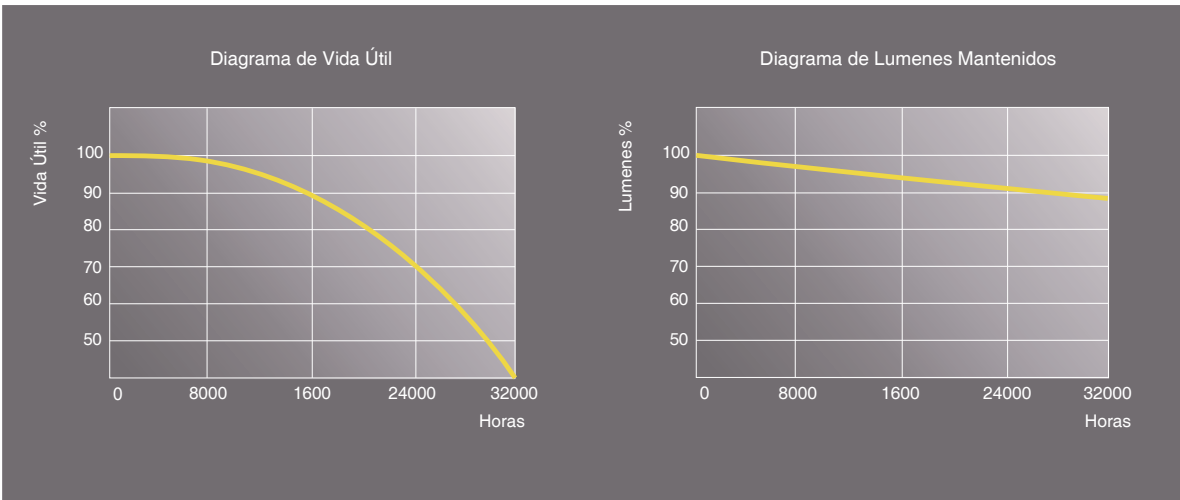



Tabla 3.4 Lámparas de vapor de sodio de alta presión

LÁMPARAS DE VAPOR DE SODIO A ALTA PRESIÓN (ALTA EFICIENCIA) REF6								
Tipo Tubular	Potencia W	Voltaje V	Base	Flujo luminoso	Eficiencia lm/W	Temperatura de color	Rendimiento de color	Duración Horas
	50	220	E 40	4,400	88	2,000	25	32,000
	70	220	E 40	6,650	95			
	100	220	E 40	10,700	107			
	150	220	E 40	17,500	116			
	250	220	E 40	33,200	133			
	400	220	E 40	56,500	141			
	600	220	E 40	90,000	150			

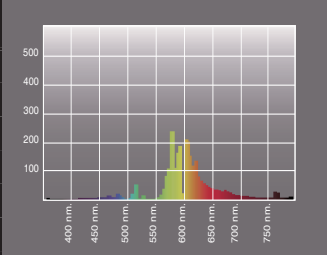


Figura 3.13 Gráfica de la vida útil de las lámparas de vapor de sodio de alta presión

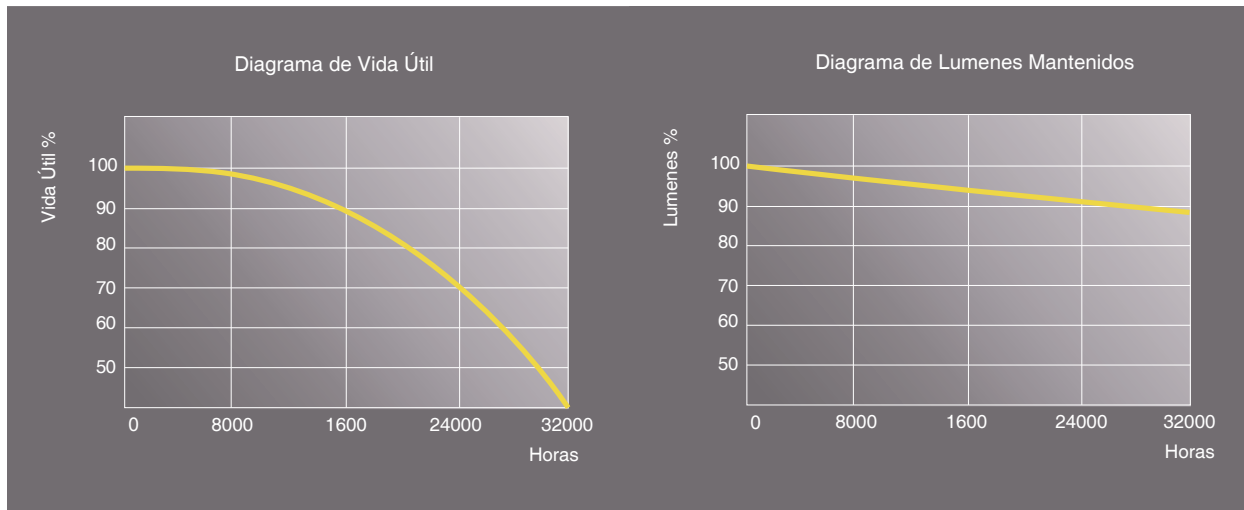



Tabla 3.5 Lámparas de aditivos metálicos tipo ovoide

LÁMPARAS DE ADITIVOS METÁLICOS TIPO OVOIDE (ALTA EFICIENCIA) REF7							
Tipo Ovoide MASTER HPI PLUS	Potencia W	Voltaje V	Flujo lm	Eficacia lm/W	Temperatura de color	Rendimiento color	Duración de horas
	250	645	18,000	72		65	20,000
	400	645	35,000	87	4,500 K		

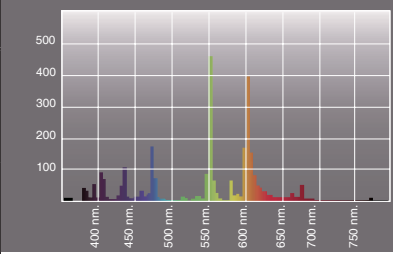


Figura 3.14 Gráfica de la vida útil de las lámparas de vapor de sodio de alta presión

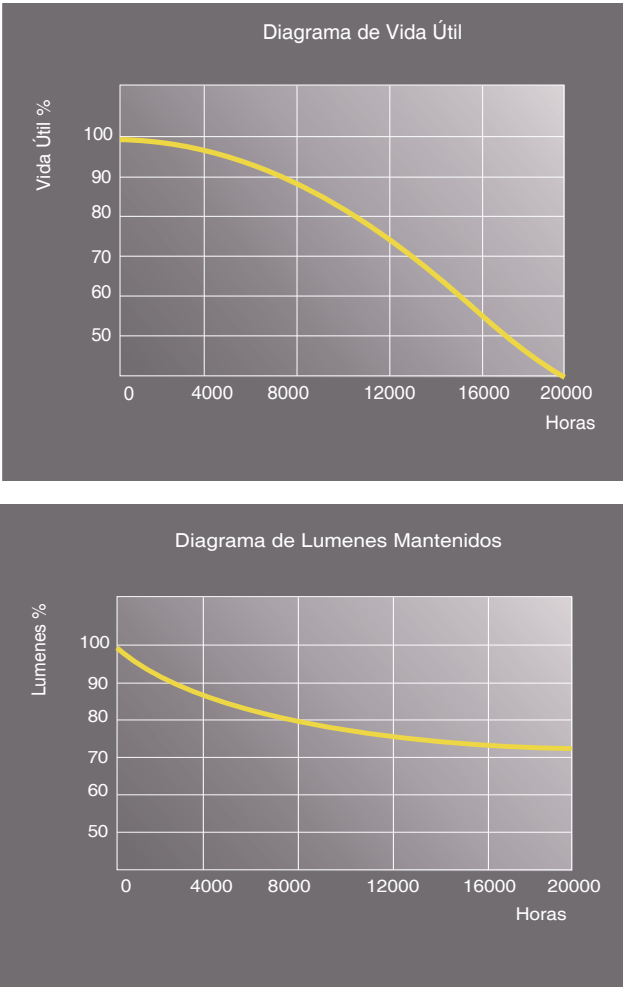


Tabla 3.6 Lámparas de aditivos metálicos tipo tubular

LÁMPARAS DE ADITIVOS METÁLICOS TIPO TUBULAR (ALTA EFICIENCIA) REF8							
Tipo Tubular MASTER HPI T PLUS	Potencia W	Voltaje V	Flujo lm	Eficacia lm/W	Temperatura de color	Rendimiento color	Duración de horas
	250	645	19,500	796	4,000 K 6,500 K	65	20,000
	400	645	32,500	833	4,000 K 6,500 K	95/65	

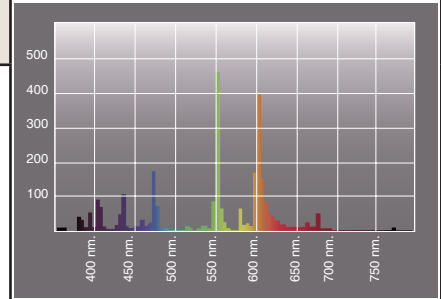


Figura 3.15 Gráfica de la vida útil de las lámparas de vapor de sodio de alta presión

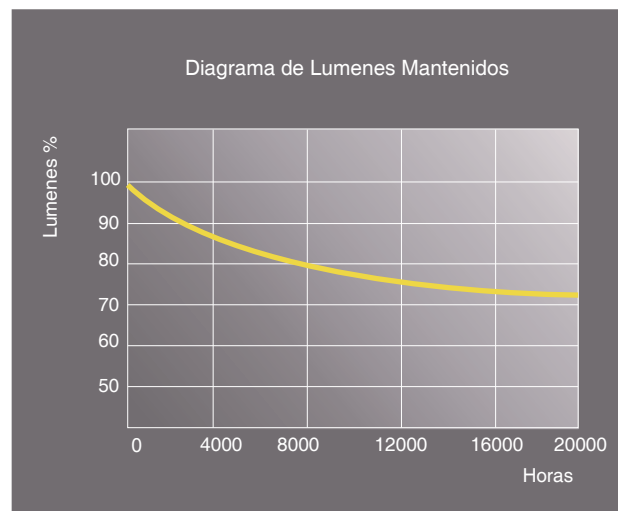



Tabla 3.7 Lámparas de LEDs

LAMPARAS DE LEDs <small>REF9</small>							
TIPO LU 4 Y LU 6	Potencia W	Voltaje V	Flujo lm	Eficacia lm/W	Temperatura de color	Rendimiento color	Duración de horas
	96	220	8,000	—	5,000 ≈ 7,000	Ra > 75	> 50,000
	168	220	15,000	≥ 80	3,000 ≈ 4,000	Ra > 75	

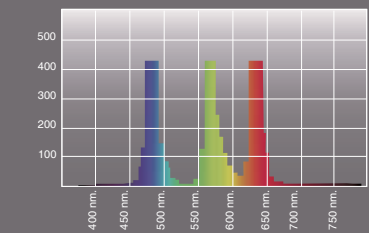


Figura 3.16 Gráfica de la vida útil de las lámparas de LEDs

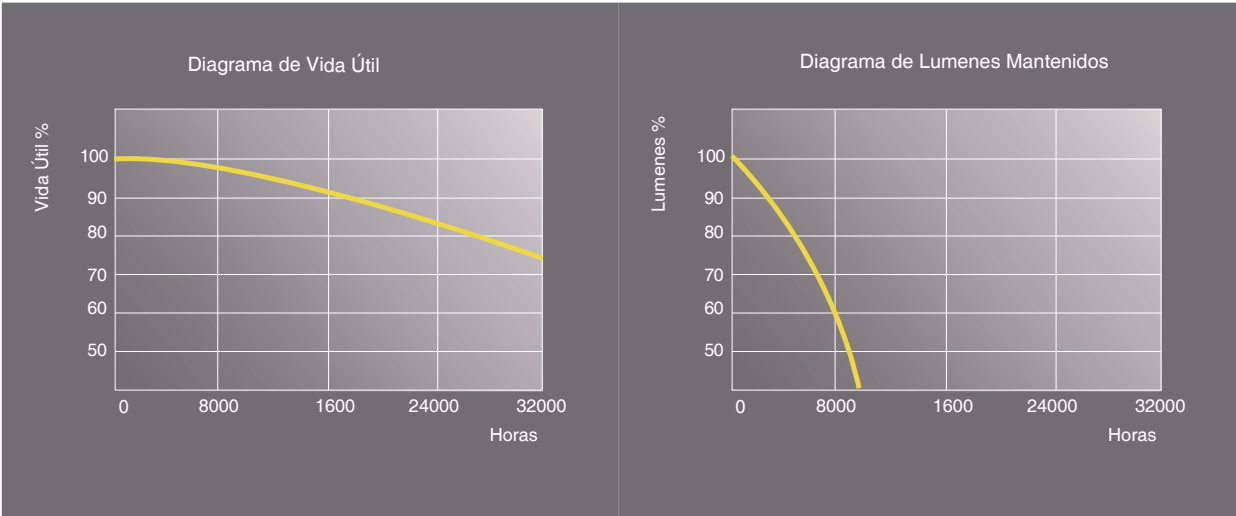
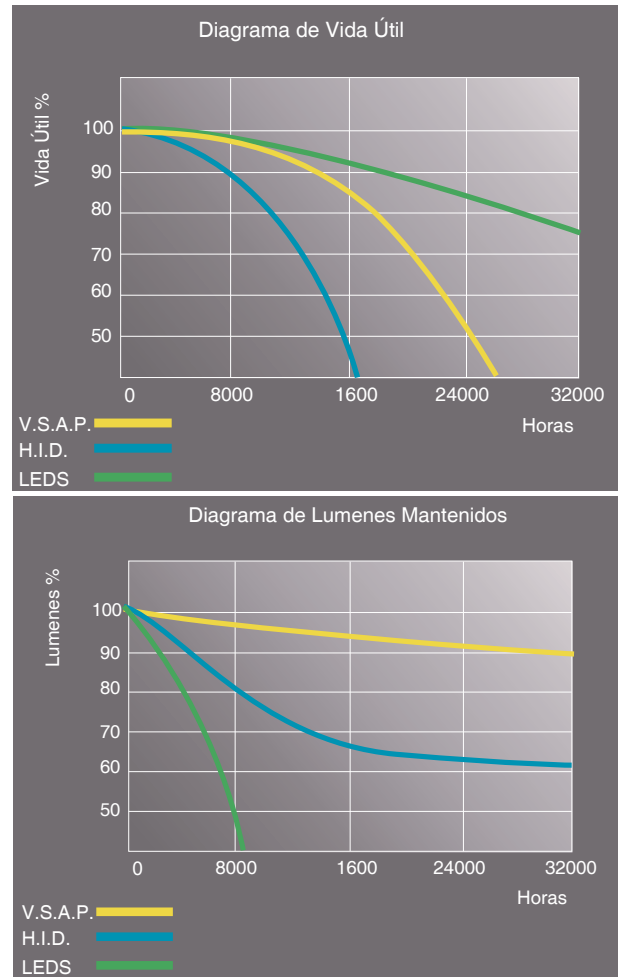


Figura 3.17 Gráficas comparativas



3.3 LED

Definiciones

Se entiende por LED (Light Emitting Diode) un diodo compuesto por la superposición de varias capas de material semiconductor que emite luz en una o más longitudes de onda del espectro de radiación electromagnética cuando es polarizado correctamente. Un diodo es un dispositivo que permite el paso de la corriente en una única dirección y su correspondiente circuito eléctrico se encapsula en una carcasa plástica, de resina epóxica o cerámica según las diferentes tecnologías.

Actualmente los LEDs (Light Emitting Diodes) de alta potencia como fuente de luz son utilizados en luminarias de alumbrado exterior aplicadas en vías secundarias de baja circulación.

Módulo LED: Sistema comprendido por uno o varios LEDs individuales instalados adecuadamente sobre un circuito impreso con la posibilidad de incluir o necesitar otros elementos como disipadores térmicos, sistemas ópticos o fuentes de alimentación que modificarán las cualidades y garantías que el propio fabricante de LEDs ofrece, haciendo así necesaria su certificación y pruebas de funcionamiento para la correcta oferta de características.

Luminaria LED: Luminaria que incorpora la tecnología LED como fuente de luz y que determina condiciones de funcionamiento, rendimiento, vida, etc. Propias de esta tecnología.

Dispositivo de alimentación y control electrónico (DRIVER): Elemento auxiliar básico para regular el funcionamiento de un sistema LED que adecua la energía eléctrica de alimentación recibida por la luminaria a los parámetros exigidos para un correcto funcionamiento del sistema.

Eficacia luminosa: Es la relación del flujo luminoso total emitido por la fuente de luz, entre la potencia eléctrica de la misma fuente luminosa, más las pérdidas por equipos auxiliares. Se expresa en lumen por watt (lm/w).

Para determinar la eficacia luminosa de la luminaria con LEDs se debe aplicar la siguiente fórmula:

$$\text{Eficacia luminosa} = \frac{\text{Flujo luminoso total inicial (lm)}}{\text{Potencia eléctrica (w)}}$$

Factor de potencia (Fp): Es la relación entre la potencia activa (P) y la potencia aparente (S), en un circuito de corriente alterna.

Flujo luminoso mantenido: Es la relación del flujo luminoso después de un determinado tiempo de uso de la luminaria con diodo emisor de luz (LEDs), en condiciones de operación específicas, dividido por su flujo luminoso inicial, expresado como porcentaje.

Flujo luminoso total: Es la energía radiante en forma de luz visible al ojo humano, emitida por una fuente luminosa en la unidad de tiempo (segundo), su unidad de medida es el lumen (lm).

Flujo luminoso total inicial: Es el flujo luminoso total emitido por una fuente de luz medido al inicio de su vida y después de un periodo de estabilización.

Flujo luminoso total nominal: Es el flujo luminoso total emitido por una fuente de luz en su posición ideal, que declara el fabricante.

Flujo luminoso de deslumbramiento (D): Es el flujo luminoso parcial emitido por una luminaria, que incide en el campo visual definido por dos ángulos extremos α y β y que produce un mayor nivel de iluminación que el del entorno, produciendo fastidio, molestia o pérdida en rendimiento visual y visibilidad, en tanto los ojos se adaptan a éste; es decir:

$$FD = F_{\beta} - F_{\alpha}$$

Índice de rendimiento de color (IRC): Es la medida cuantitativa sobre la capacidad de la fuente luminosa para reproducir fielmente los colores de diversos objetos comparándolo con una fuente de luz ideal.

Lado calle: Parte frontal de una luminaria respecto a su plano vertical transversal.

Lado casa: Parte posterior de una luminaria respecto a su plano vertical transversal.

Luminaria con diodos emisores de luz (LEDs): Equipo de iluminación que distribuye, filtra o controla la luz emitida por uno o varios diodos emisores de luz (LEDs) y el cual incluye todos los accesorios necesarios para fijar, proteger y operar estos LEDs y lo necesario para conectarlos al circuito de utilización eléctrica.

Temperatura de color correlacionada: Expresa la apariencia cromática de una fuente de luz por comparación con la apariencia cromática de la luz emitida por un cuerpo negro a una temperatura absoluta determinada, su unidad de medida es el kelvin (K).

Vialidad: Área definida y dispuesta adecuadamente para el tránsito.

Vida nominal: Periodo de tiempo en horas especificado por el fabricante de luminarias desde el primer encendido, hasta la reducción del 30% del flujo luminoso inicial de una muestra estadística de unidades de LEDs, en condiciones de encendido y operación controladas.

Investigación y desarrollo

El diodo emisor de luz es un dispositivo semiconductor (diodo) que emite luz sin dirección específica de espectro reducido cuando se polariza de forma directa la unión P (ánodo) N (cátodo) del mismo y circula por él una corriente eléctrica. El arco que se forma de esta unión produce una luminiscencia en donde el color depende del material semiconductor empleado en la construcción del diodo y puede variar desde el ultravioleta, pasando por el visible, hasta el infrarrojo.

Los diodos emisores de luz que emiten luz ultravioleta también reciben el nombre de UV LED (Ultraviolet Light Emitting Diode) y los que emiten luz infrarroja se llaman IRED (Infrared Emitting Diode).

Los LEDs necesitan drivers (controladores electrónicos y convertidores/reguladores de energía).

Como estos dispositivos son integrales al funcionamiento de la luz LED, también debe considerarse la huella ecológica de su producción.

Mientras que es probable que estos componentes sean producidos de forma masiva y por lo tanto se beneficien de las eficiencias de la producción a gran escala.

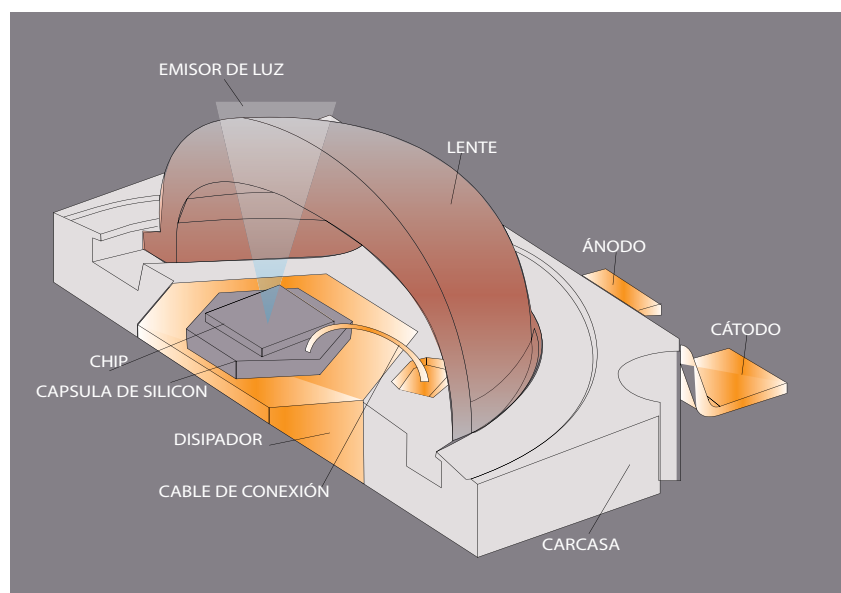
Funcionamiento físico

El funcionamiento físico consiste en los materiales semiconductores, un electrón que al pasar de la banda de conducción a la de valencia, pierde energía; esta energía perdida se puede manifestar en forma de un fotón desprendido, con una amplitud, una dirección y una fase aleatoria.

Esto va a depender principalmente del tipo de material semiconductor. Cuando un diodo semiconductor se polariza directamente, los huecos de la zona que se mueven hacia la zona n y los electrones de la zona n hacia la zona p; ambos desplazamientos de cargas constituyen la corriente que circula por el diodo. Este proceso emite con frecuencia un fotón en semiconductores de banda prohibida directa o "direct bandgap" con la energía correspondiente a su banda prohibida. Sin embargo, estas emisiones son mucho más probables en los semiconductores de banda prohibida directa (como el Nitruro de Galio) que en los semiconductores de banda prohibida indirecta (como el Silicio).

La energía se libera principalmente en forma de calor, radiación infrarroja o radiación ultravioleta.

Figura 3.18 Estructura de un LED



Características de los LEDs

Los LEDs se caracterizan básicamente por:

- Color: rojo, ámbar, verde, azul, blanco, en distintas frecuencias y matices.
- Tamaño: el diámetro de la cápsula del LED varía normalmente entre 3 y 10 mm.
- Transparencia: el encapsulado de los LEDs puede variar desde cristal (transparentes) a difusos.
- Ángulo: el ángulo de visibilidad está determinado por la forma de la lente y la transparencia. Varían entre 10° y 60°.
- Luminosidad: la luminosidad de los LEDs está determinada por todas las variables antes dichas más la composición y calidad del chip emisor de luz. Se mide usualmente en milicandelas y en carteles varía entre 500 mcd y 7000 mcd.
- Duración: dos LEDs aparentemente iguales en todas las características antes enunciadas pueden tener distintas duraciones. Un LED de calidad construido bajo normas ISO 9000 garantiza una duración bajo circunstancias normales de 100.000 horas; esto es más de diez años manteniendo una luz no inferior al 60% de la que tenía al ser nuevo.

Normas aplicables

La certificación de productos en Normas Mexicanas (NMX):

- NMX-I-201-NYCE-2009 - Dispositivos de control electrónicos alimentados en corriente continua o corriente alterna para módulos LED - Requisitos de funcionamiento.
- NMX-I-202-NYCE-2009 - Requisitos particulares para dispositivos de control electrónicos alimentados con corriente continua o corriente alterna para módulos LED.
- NMX-I-203-NYCE-2009 - Requisitos particulares de los conectores para módulos LED.
- NMX-I-204-NYCE-2009 - Módulos LED para iluminación general - especificaciones de seguridad.
- NOM-031-ENER-2012 - Eficiencia energética para luminarias con diodos emisores de luz (leds) destinadas a vialidades y áreas exteriores públicas. Especificaciones y métodos de prueba.

Especificaciones

Eficacia luminosa para luminarias LEDs de alumbrado en vialidades:

Las luminarias con LEDs destinados al alumbrado de vialidades deben tener un valor de eficacia luminosa mínima de 70 lm/w.

Luminarias para alumbrado de áreas exteriores:

Las luminarias con LEDs destinados al alumbrado de áreas exteriores, deben cumplir con el valor de eficacia luminosa indicada en la Tabla 3.8.

Tabla 3.8 Eficacia luminosa mínima y flujo luminoso total para luminarias de exteriores (Fuente: PROY-NOM-031-ENER-212)

Luminaria para instalarse en	Eficacia Luminosa mínima [lm/W]	Porcentaje de flujo luminoso en la zona, respecto al flujo luminoso total.
Pared	52	No más de 48% hacia enfrente en la zona de 60 y 80° (FH)
		No más de 3% hacia en frente en la zona de 80 y 90° (FVH)
		0% en la zona de 90 y 100° (UL) y en la zona arriba de 100° (UH)
Poste	70	Al menos el 30% hacia enfrente y hacia atrás en la zona de 60 y 80° (FH + BH)
		No más de 20% arriba de 80° (FVH + BVH + UL + UH)

Relación del flujo luminoso total nominal

El flujo luminoso total inicial medido de las luminarias con LEDs no debe ser menor al 90% del valor nominal marcado en el producto, en el empaque, en el instructivo o en la garantía.

Temperatura de color correlacionada

Las luminarias con LEDs deben cumplir con la Temperatura de Color Correlacionada (TCC), indicada en la Tabla 3.9.

Tabla 3.9 Temperatura de color correlacionada (TCC) (Fuente: PROY-NOM-031-ENER-212)

TCC nominal [K]	Intervalo de tolerancia de TCC [K]
2,700	2,580 a 2,870
3,000	2,870 a 3,220
3,500	3,220 a 3,710
4,000	3,710 a 4,260
4,500	4,260 a 4,746
5,000	4,745 a 5,311
5,700	5,310 a 6,020
6,500	6,020 a 7,040

Distorsión armónica total:

La distorsión armónica total en corriente eléctrica, debe ser menor a 20%.

Flujo luminoso de deslumbramiento:

Flujo luminoso de deslumbramiento máximo para luminarias con LEDs para vialidades.

El flujo luminoso de deslumbramiento máximo respecto al ángulo vertical y su porcentaje respecto al flujo luminoso total, no deben ser mayores a los indicados en la tabla 3.10 y estar de acuerdo a la figura 3.19.

Flujo luminoso lado calle bajo (FL):

El flujo luminoso lado calle comprendido entre 0 y 30 grados (FL), debe ser menor que el flujo luminoso lado calle comprendido entre 30 y 60 grados (FM). ver Fig. 3.19.

El flujo luminoso lado calle comprendido entre 0 y 30 grados (FL), debe ser menor que el flujo luminoso lado calle comprendido entre 60 y 80 grados (FH), Fig. 3.19.

Figura 3.19 Ángulo de medición en luminaria LED (Fuente: PROY-NOM-031-ENER-212)

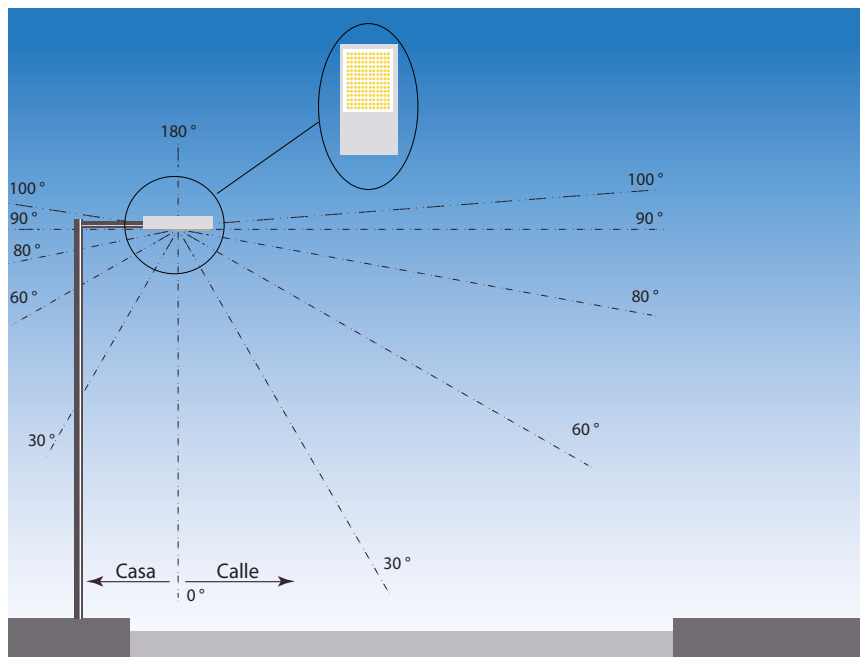


Tabla 3.10 Valores máximos de flujos luminosos de deslumbramiento (Fuente: PROY-NOM-031-ENER-212)

Angulo respecto a la vertical (Figura ...)	Flujo luminosos de deslumbramiento máximo	
	En lúmenes [lm]	Respecto al flujo luminoso total [%]
Entre 60 y 80° lado calle (FH)	12,000	48
Entre 60 y 80° lado casa (BH) [Asimétrico]	5,000	20
Entre 60 y 80° lado casa (BH) [Simétrico]	12,000	48
Entre 80 y 90° lado calle (FVH)	750	3
Entre 80 y 90° lado casa (BVH)	750	3
Entre 90 y 100° lado calle y lado casa (UL)	1,000	4
Entre 100 y 180° lado calle y lado casa (UH)	1,000	4
Entre 0 y 30° lado casa (BL)	5,000	20
Entre 30 y 60° lado casa (BM)	8,500	34

Ángulos de medición del flujo luminosos máximo

Prueba de resistencia al choque térmico y a la conmutación:

Las luminarias deben someterse a una prueba de ciclos de choque térmico y a una prueba de conmutación, como se establecen en el Apéndice “C”, después de realizar las pruebas las luminarias deben operar y permanecer encendidas 15 minutos.

Descargas atmosféricas

- Las luminarias deben resistir la prueba de descarga atmosférica con los niveles de prueba que se establecen en la tabla 3.11.

Tabla 3.11 Niveles de prueba para luminarias (Fuente: PROY-NOM-031-ENER-212)

Características de la forma de onda y niveles de prueba	
Datos de la forma de onda	1.2/50 μ s
Nivel de prueba línea a línea	2.0 kV
Nivel de prueba línea a tierra	4.0 kV

Características principales de un dispositivo de control electrónico (driver) para LEDs:

- Marca, modelo y datos del fabricante.
- Temperatura máxima asignada (tc)
- Tensión de salida asignada para dispositivos de control de tensión constante. Corriente de salida asignada para dispositivos de control de corriente constante.
- Consumo total del equipo electrónico.
- Grado de hermeticidad IP
- Factor de potencia del equipo.
- Vida del equipo en horas de funcionamiento dada por el fabricante.

Los datos fotométricos exigibles para la luminaria LED utilizada en un proyecto son:

- Curva fotométrica de la luminaria
- Curva del factor de utilización de la luminaria
- Flujo luminoso global emitido por la luminaria
- Eficacia de la luminaria en %
- Flujo hemisférico superior instalado (FHSINST)
- Temperatura de color en K de la luz emitida por la luminaria

Con estos datos se realiza el proyecto luminotécnico, que incorpora:

- Cálculo luminotécnico para cada sección de proyecto
- Cálculo de la eficiencia energética para cada sección de proyecto

Eficiencia energética en insalaciones de alumbrado público con LEDs

Conceptos y consideraciones iniciales, que incluirá:

FDL: Porcentaje de depreciación del flujo luminoso respecto al flujo inicial hasta el periodo de reemplazo del módulo LED.

FSL: Porcentaje de luminarias LED que sobreviven y alcanzan el flujo indicado en su curva de depreciación, para las horas especificadas. Deberá ser 100% a las 20.000 horas. Diferencial porcentual entre el flujo lumínico a las 20 000 horas y el flujo luminoso por debajo del que el fabricante está obligado a sustituir la fuente luminosa a las 20 000 horas.

FDLU: Depreciación de la luminaria según su grado de IP e intervalo de limpieza cada dos años.

FDSR: Factor de depreciación de las superficies del recinto para túneles de carretera o pasos inferiores.

El factor de mantenimiento global se calculará por la siguiente fórmula:

$$F_m = F_{DFL} \times F_{SL} \times F_{DLU} \times F_{DSR}$$

El factor de mantenimiento global por estos conceptos no podrá ser inferior a 0,7 ni superior a 0,85.

En el apartado de parámetros luminotécnicos, una luminaria equipada con fuentes luminosas tipo LED, tiene que tener una eficacia superior al 55% si es de tipo vial ambiental y superior al 65% si es de tipo vial funcional.

El estudio luminotécnico propondrá la eficiencia energética de la instalación y aportarar lo necesario para conocer las características y prestaciones de sus componentes:

Clasificación de las vías según

- Valores máximos de luminancia e iluminancia establecida.
- Valores mínimos y de referencia de eficiencia energética con la correspondiente calificación energética de la instalación.
- Prescripciones de los componentes de la instalación.

Compromiso escrito del correcto funcionamiento de la luminaria, con un flujo lumínico mínimo del 80% respecto al inicial, durante un periodo no inferior a 5 años para funcionamiento en horario nocturno, indicando la depreciación del flujo para cada 4000 horas.

4.1 Luminarias

Luminaria: Dispositivo que distribuye, filtra o controla la radiación luminosa emitida por una o varias lámparas y que contiene todos los accesorios necesarios para fijar, sostener y proteger las mismas y conectarlas al circuito de alimentación.

Clasificación de luminarias de acuerdo a la CIE

Según el grado de deslumbramiento aceptado, se toman en consideración tres formas fundamentales de repartición luminosa de las luminarias:

Tabla 6.1 Deslumbramiento luminoso^{REF10}

Tipo de luminaria	Valor máximo permitido de intensidad emitida a un ángulo de elevación de 80°	Valor máximo permitido de intensidad emitida en un ángulo de elevación de 90°	Dirección de la intensidad máxima menor de
Cut - off	30 cd / 1000 lm	10 cd / 1000 lm	65°
Semi cut - off	100 cd / 1000 lm	50 cd / 1000 lm	76°
Non cut - off	Cualquiera		-

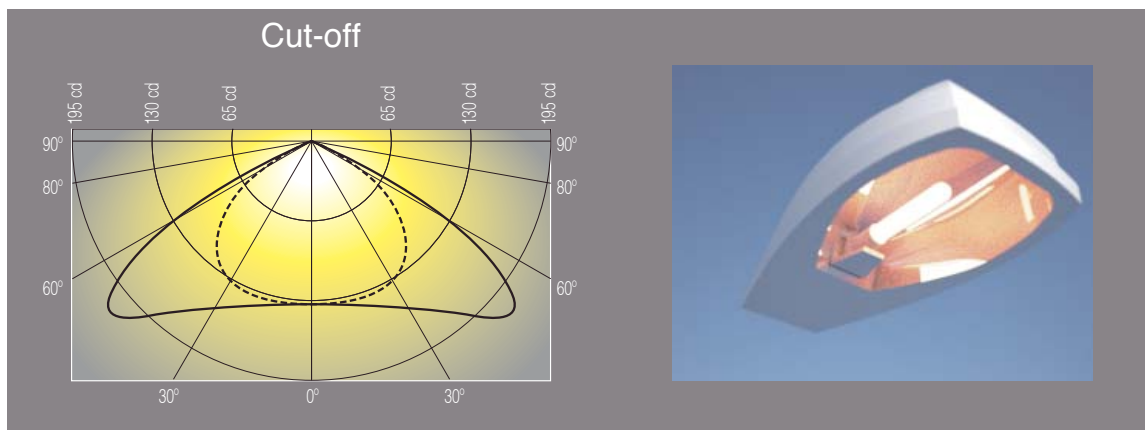
Luminarias con repartición Cut-off

Es aquella en la que la curva de repartición de la intensidad luminosa está estrictamente limitada en las direcciones que forman un ángulo igual a superior a 80° con relación a la vertical descendente, es decir, muy próxima a la dirección usual de observación de los automovilistas y que es prácticamente nula en la horizontal.

La especificación precisa de la curva de repartición varía según los países. En general, la intensidad luminosa en la horizontal no debe exceder de 10 candelas por cada 1000 lúmenes de flujo de la fuente luminosa y la intensidad de 80° es del orden de 30 candelas por cada 1000 lúmenes.

La dirección del máximo es cualquiera pero puede ser especificada. Esta está en relación directa con las condiciones de instalación.

Figura 4.1 Curva y luminaria Cut-off

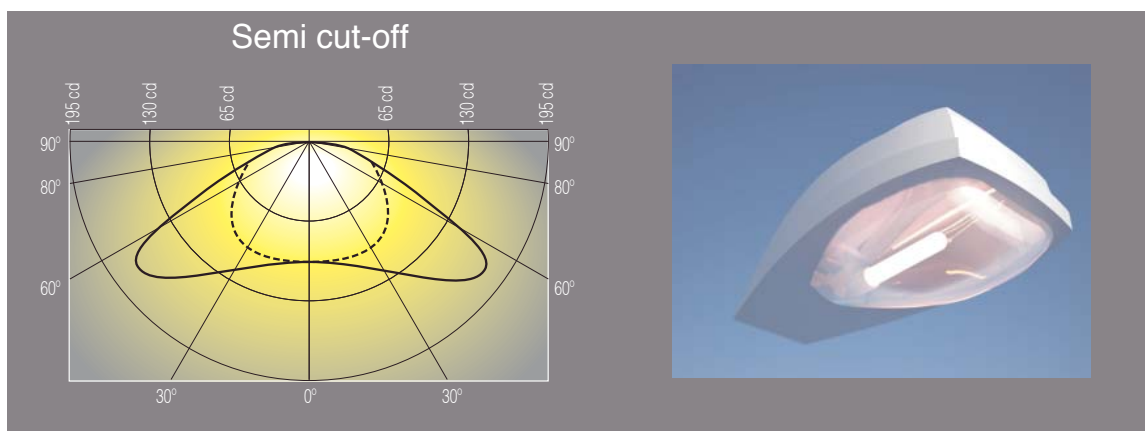


Luminarias con repartición Semi cut-off

Es aquella en la que la curva de repartición de la intensidad luminosa es reducida en las direcciones que forman un ángulo igual o superior a 80° con relación a la vertical descendente, cerca de la dirección usual de observación de los automovilistas y que es muy débil en la horizontal.

La especificación precisa de la curva de repartición varía de acuerdo con los países. En general, la intensidad luminosa en la horizontal no excede de 50 candelas por cada 1000 lúmenes de flujo de la fuente luminosa y la intensidad a 80° es del orden de 100 candelas por cada 1000 lúmenes. La dirección del máximo es cualquiera, pero puede ser especificada. Está en relación directa con las condiciones de instalación.

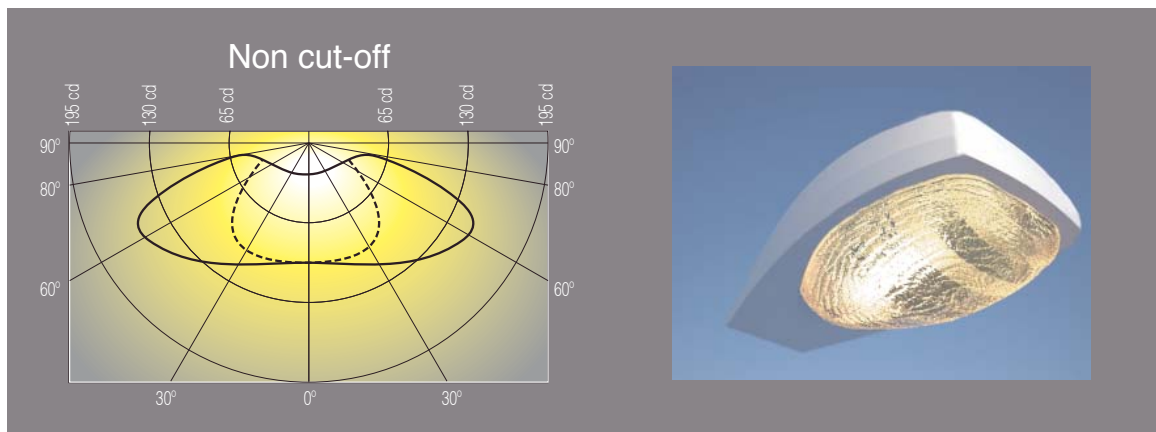
Figura 4.2 Curva y luminaria Semi cut-off



Luminarias con repartición Non cut-off

Es aquella en la que la intensidad luminosa en las direcciones que forman un ángulo igual o superior a 80° con relación a la vertical descendente no se reduce sensiblemente y en la que la intensidad en la horizontal puede exceder los valores especificados para una repartición semi-cut-of, sin por ello exceder 1000 cd.

Tabla 4.2 Curva y luminaria Non cut-off



No se deben instalar en carreteras y vías principales debido al enorme desperdicio de flujo luminoso hacia el espacio, causando contaminación lumínica y desperdicio energético.

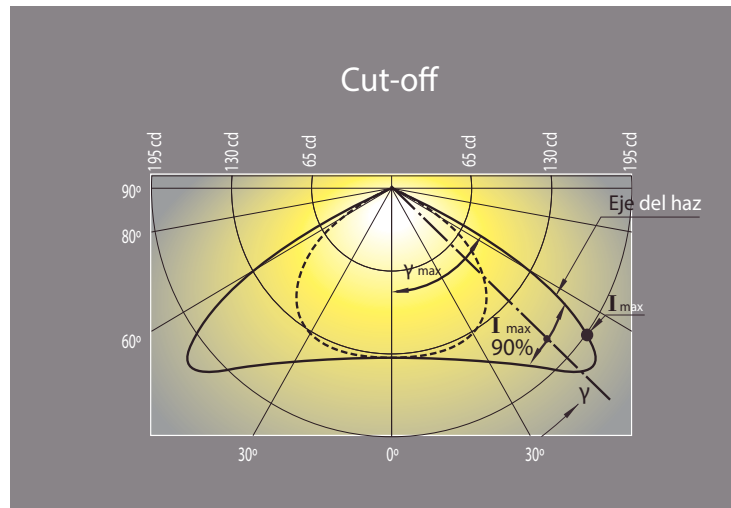
La nueva clasificación de las luminarias de la CIE se basa en tres propiedades básicas de las luminarias :

1. Alcance o extensión a la cual la luz de la luminaria se distribuye a lo largo de un camino.
2. Apertura o la cantidad de diseminación lateral de la luz a lo ancho de un camino.
3. Control o el alcance de la instalación para controlar el deslumbramiento producido por la luminaria.

Alcance

El alcance es la distancia determinada por el ángulo γ_{\max} , en que la Luminaria es capaz de iluminar la calzada en dirección longitudinal. Este ángulo se calcula como el valor medio entre los dos ángulos correspondientes al 90% de I_{\max} que corresponden al plano donde la luminaria presenta el máximo de intensidad luminosa.

Figura 4.3 Se muestran los ejes de la curva (Fuente: Holophane)



Se definen tres grados de alcance de la manera siguiente:

- $Y_{\max} < 60^\circ$: alcance corto
- $60 \leq Y_{\max} \leq 70^\circ$: alcance medio
- $Y_{\max} > 70^\circ$: alcance largo

Hasta un valor máximo absoluto de 1000 candelas.

Apertura

La apertura está definida por la posición de la línea, que va paralela al eje del camino y que apenas toca el lado más alejado del $90\% I_{\max}$ en el camino. La posición de esta línea está definida por el ángulo Y_{90} .

Los tres grados de apertura se especifican de la siguiente forma:

- $\gamma_{90} < 45^\circ$: apertura estrecha
- $45^\circ \leq \gamma_{90} \leq 55^\circ$: apertura media
- $\gamma_{90} > 55^\circ$: apertura ancha

Control de deslumbramiento

El control se define por el índice específico de la luminaria, (SLI), que es parte de la fórmula G de control del deslumbramiento molesto que está determinado sólo por las propiedades de la luminaria.

$$SLI = 13.84 - 3.31 \cdot \log I_{80} + 1.3 \cdot \log \left(\frac{I_{80}}{I_{88}} \right)^{0.5} - 0.08 \cdot \log \frac{I_{80}}{I_{88}} + 1.29 \cdot \log F + C$$

en donde:

I_{80} = Intensidad luminosa a un ángulo de elevación de 80°, en un plano paralelo al eje de la calzada en candelas

$\frac{I_{80}}{I_{88}}$ = Relación entre intensidades luminosas para 80° y 88°

F = Área emisora de luz de las luminarias (m²) proyectadas en la dirección de elevación a 76°

C = Factor de color, variable de acuerdo al tipo de lámpara (+0.4 para sodio alta presión y 0 para las demás)

Se definen tres tipos de control:

- $SLI < 2$: control limitado
- $2 \leq SLI \leq 4$: control moderado
- $SLI > 4$: control estricto

Figura 4.4 Se muestran los tres grados de alcance, apertura y control redefinidos por la CIE. donde h = altura de montaje de la luminaria

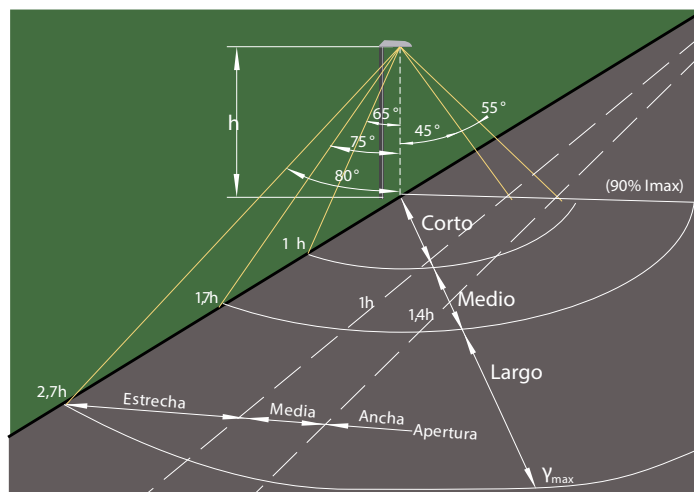


Tabla 4.3 Se resumen las definiciones anteriores de la CIE

Alcance	Apertura	Control
Corto $\gamma_{\max} < 65^\circ$	Estrecha $\gamma_{90} < 45^\circ$	Limitado $SLI < 2$
Medio $60^\circ \leq \gamma_{\max} \leq 70^\circ$	Media $45^\circ \leq \gamma_{90} \leq 55^\circ$	Moderado $2 \leq SLI \leq 4$
Largo $\gamma_{\max} > 70^\circ$	Ancha $\gamma_{90} > 55^\circ$	Estricto $SLI > 4$

Conclusión

Las luminarias cut-off y semi cut-off evitan el deslumbramiento y por lo tanto su instalación en calles y carreteras proporcionan un confort visual a los conductores, no así las luminarias non cut-off en las que la mayor parte del flujo luminoso emitido por sus lámparas se pierde en el espacio.

Las luminarias cut-off son fabricadas en aluminio de tipo abierto o cerrado. Por el contrario, las luminarias non cut-off siempre llevan una cubierta prismática de vidrio o plástico las cuales producen deslumbramiento, ya que hacen la función de una segunda fuente luminosa.

4.2 Reactor (balastro)

Las lámparas de incandescencia, halógenas y de luz mixta, pueden conectarse directamente a la red sin necesidad de ningún equipo auxiliar o a través de un transformador, debido a que por sus características, tienen la propiedad que la intensidad que pasa por ellas y la tensión aplicada son proporcionales.

Las lámparas de descarga tienen la característica particular de que la relación entre la intensidad que pasa por ellas y la tensión aplicada no son proporcionales, es decir, que la relación tensión-corriente no es lineal sino negativa; dicho de otra forma, la tensión del arco depende poco de la corriente que la atraviesa.

Dependiendo de la tensión aplicada, si se produce el arranque, puede ocurrir que la intensidad de la corriente se eleve en gran medida hasta provocar que la lámpara se destruya o que la corriente fluctúe desproporcionalmente con pequeñas variaciones de tensión.

Debido a estas razones, es indispensable utilizar algún dispositivo estabilizador de la corriente si se pretende conseguir un funcionamiento correcto.

Las reactancias o balastos son accesorios para utilizar en combinación con las lámparas de descarga, que en forma de impedancias inductivas, capacitivas o resistivas, ya sea solas o en combinación, limitan la corriente que circula por aquellas a los valores exigidos para un funcionamiento adecuado de la lámpara.

Además, cuando es necesario, suministran la tensión y corriente de arranque requeridas y en el caso de reactancias de arranque rápido, las bajas tensiones necesarias para el caldeo de los cátodos de las lámparas.

Características:

- Bajo costo, peso elevado ya que tiene que trabajar a frecuencia de red, gran volumen y bajo rendimiento.

Dadas las características que ofrecen de rendimiento y funcionamiento correcto de la lámpara, se clasifican como sigue:

Por el tipo de lámpara:

- Aditivos Metálicos
- Vapor de Sodio de Alta Presión

Por su forma de operación:

- Electromagnético (reactor autorregulado alto factor y bajas pérdidas)
- Electrónico

Características de los reactores en las diferentes lámparas de descarga

Lámparas de aditivos metálicos

Las condiciones de funcionamiento de las lámparas de aditivos metálicos son muy parecidas a las de vapor de mercurio convencionales, estando preparadas para ser conectadas en serie con un balastro limitador de la corriente.; debido a los halogenuros, la tensión de encendido de estas lámparas es elevada y necesitan el empleo de un cebador o ignitor.

El reactor conectado a la lámpara de halogenuros (Aditivos Metálicos) depende de las propiedades de ésta. Por ejemplo, las lámparas denominadas de tres bandas emplean balastros destinados a lámparas de mercurio, pero las lámparas de tierras raras funcionan mejor con balastros de lámparas de sodio de alta presión.

Lámparas de vapor de sodio a alta presión

Al igual que en las lámparas de halogenuros metálicos y debido a la alta presión a la que se encuentra el gas, para el encendido es necesario aplicar altas tensiones de choque. Por ello, las lámparas de sodio alta presión operan normalmente con un reactor y un arrancador. Algunas lámparas cuentan con un arrancador integrado, pero la mayoría utilizan un dispositivo de arranque externo.

Reactor electromagnético

El reactor electromagnético está compuesto, principalmente, por un gran número de bobinas de cobre sobre un núcleo de hierro laminado. En ellas se produce una pérdida de calor que ocurre a través de la resistencia de las bobinas y la histéresis en el núcleo, esto depende de la construcción mecánica del reactor y del diámetro del alambre de cobre.

La reactancia que combina un autotransformador con un circuito regulador se denomina autorregulado. Debido a que una parte del bobinado primario es común con el secundario, su tamaño es reducido. Puesto que sólo el bobinado secundario contribuye a una buena regulación, el grado de ésta depende de la porción de tensión primaria acoplada al secundario.

Reactor electrónico

Los reactores electrónicos usan tecnología de circuitos integrados, que proveen una regulación y control preciso de la operación de la lámpara. Además, brindan un monitoreo constante del voltaje de línea. Regulan la potencia de la lámpara, así como la potencia consumida.

Los reactores electrónicos ofrecen ventajas importantes con respecto a los reactores inductivos convencionales:

- Mejoran la eficiencia de la lámpara y del sistema.
- No producen efectos estroboscópicos o de parpadeo.
- Brindan un arranque instantáneo sin necesidad de un arrancador separado.
- Incrementan la vida de la lámpara.
- Ofrecen excelentes posibilidades de regulación del flujo luminoso de la lámpara.
- Factor de potencia próximo a la unidad, aunque hay que vigilar que los armónicos en línea no excedan los valores máximos admitidos.
- La conexión es más simple.
- Poseen menor aumento de la temperatura.
- No producen zumbido ni otros ruidos.
- Poseen menos peso.
- Pueden ser utilizados en corriente continua.

Los reactores electrónicos se usan generalmente para lámparas de halógenos metálicos y sodio de alta presión de hasta 400 w.

Factor de potencia

-El factor de potencia ($\cos \Phi$) puede definirse como la eficiencia relativa en el uso de la energía eléctrica. Técnicamente es la relación entre la potencia activa P (en w) entregada a un receptor y la potencia aparente S (en V.A.) suministrada por la línea de alimentación.

-Siempre será menor que la unidad; cuanto más próximo sea a ella, mayor aprovechamiento de la energía tomada de la red.

-Se especifica que un equipo (conjunto reactancia-lámpara) es de alto factor de potencia cuando su valor es igual o mayor que 0.92.

-El uso de reactancias de alto factor de potencia presenta las siguientes ventajas:

- 1.- Cumplir con los requisitos de las compañías suministradoras de energía eléctrica, de tener compensado el factor de potencia como mínimo a 0.92.
- 2.- Evitar recargos en los recibos por concepto de energía reactiva.
- 3.- Reducir sección en los conductores de las líneas de alimentación en las instalaciones.
- 4.- Utilizando equipos de alto factor de potencia se pueden instalar mayor número de luminarias por circuito, con lo que se reducen y simplifican los equipos de protección (magnetotérmicos, diferenciales, etc.).

Eficiencia energética

Valores límite permisibles de eficiencia energética.^{REF11}

Los modelos de reactores para lámparas de descarga en alta intensidad deben presentar valores iguales o mejores a los indicados en las tablas siguientes:

Tabla 4.4 Factor de Reactor mínimo

Tipo de Reactor	Factor de Reactor (FB)
	%
Electromagnético	92.50
Electrónico	95.00

Tabla 4.5 Eficiencia mínima del reactor que opere lámparas de vapor de sodio en alta presión (Fuente: Datos FIDE 28 agosto 2012)

Rango de la potencia nominal de lámpara	Eficiencia mínima (%)	
	Electromagnético	Electrónico
Hasta 70 w	96 %	99 %
Mayores de 70 w hasta 100 w	97 %	99 %
Mayores de 100 w hasta 150 w	94 %	99 %
Mayores de 150 w hasta 250 w	96 %	99 %
Mayores de 250 w hasta 400 w	94 %	99 %

Tabla 4.6 Eficiencia mínima del reactor que operen lámparas de aditivos metálicos de arranque por pulso (Fuente: Datos FIDE 28 agosto 2012)

Rango de la potencia nominal de lámpara	Eficiencia mínima (%)	
	Electromagnético	Electrónico
Hasta 70 w	98 %	99 %
Mayores de 70 w hasta 100 w	99 %	99 %
Mayores de 100 w hasta 150 w	98 %	98 %
Mayores de 150 w hasta 200 w	97 %	99 %
Mayores de 200 w hasta 250 w	96 %	99 %
Mayores de 250 w hasta 350 w	98 %	97 %
Mayores de 350 w hasta 400 w	95 %	97 %

Seguridad

Los reactores para lámparas de descarga en alta intensidad, deben cumplir con los requisitos de seguridad establecidos en la Norma NOM-058-SCFI vigente, que establece las especificaciones de seguridad que deben cumplir los balastos para lámparas de descarga eléctrica en gas, con el propósito de prevenir y eliminar los riesgos para la incolumidad corporal de los usuarios y para la conservación de sus bienes.

Calidad

Los reactores para lámparas de descarga en alta intensidad, deben cumplir con las características de calidad ofrecidas en su catálogo y manifestadas en el registro de producto, así como cumplir con los parámetros de calidad indicados.

La Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT) recomienda que en todas las instalaciones de alumbrado con luminarias equipadas con lámparas de descarga, se utilicen reactores autorregulados con factor de potencia mínima de 0.92.

El uso de reactores electrónicos requiere de una excelente regulación de voltaje, en las líneas de alimentación, por ser éstos muy sensibles a las variaciones de voltaje.

4.3 Elementos para el diseño eléctrico

Las instalaciones eléctricas deberán cumplir con la norma oficial mexicana NOM-001-SEDE de instalaciones eléctricas.

Los elementos que se consideran en el diseño de una instalación de alumbrado y fuerza son los siguientes:

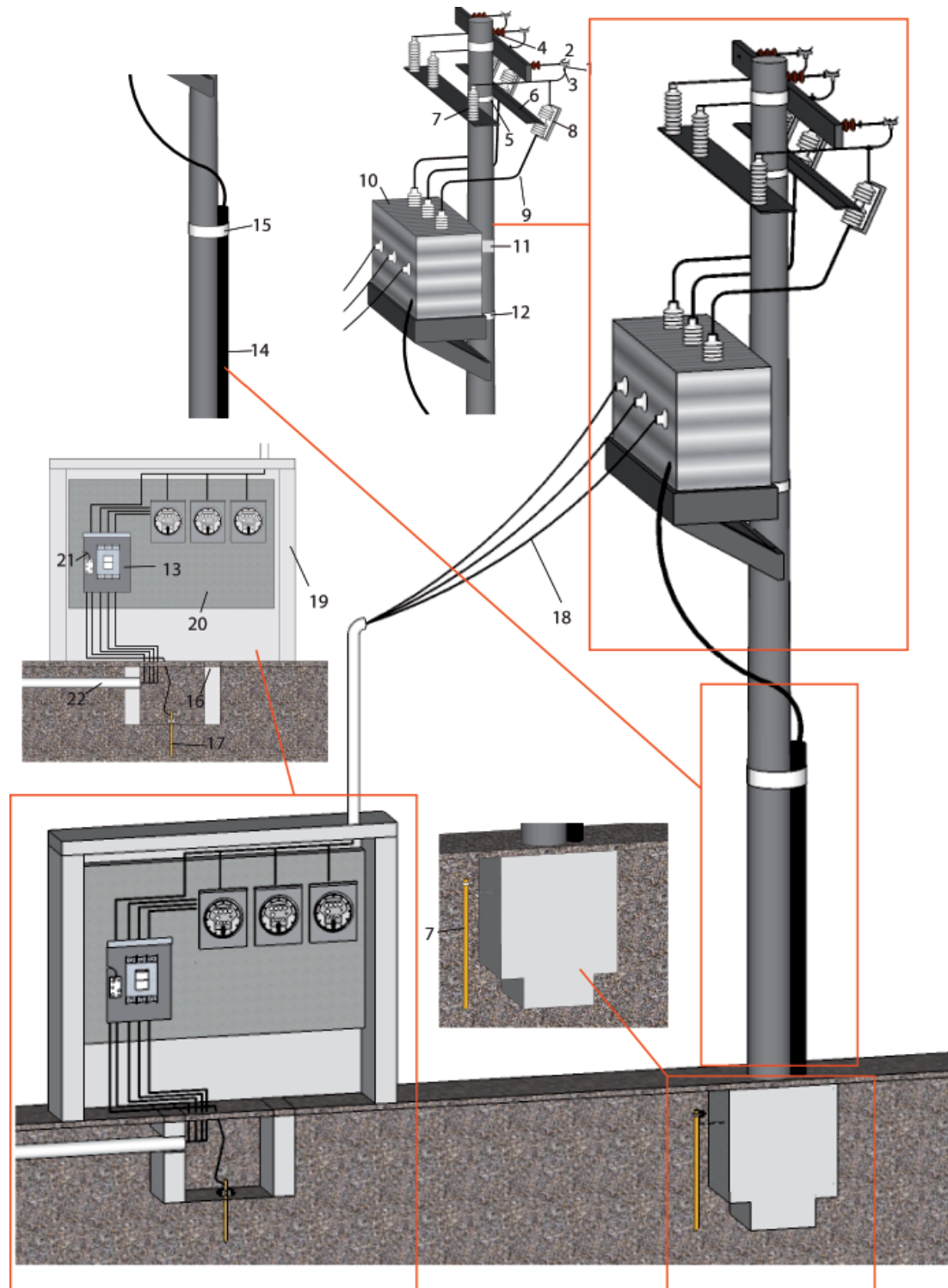
1. Cargas por circuito
2. Capacidad del transformador
3. Protecciones
4. Calibre de conductores

4.4 Acometida aérea

Figura 4.5 Materiales a instalar en una acometida aérea

Materiales de acometida aérea (transformador tipo poste)	
1	Conector para línea
2	Hilo de guarda
3	Amarres
4	Aislador con alfiler
5	Abrazadera i - u
6	Cruceta c4t
7	Apartarrayos
8	Corta circuito fusible
9	Alambre desnudo no. 4
10	Transformador: Por la tensión de transmisión: 13.2 KV, 23KV, 34.5 KV, 69 KV,115KV, 230KV, 400 KV; Por sistema: de 200 Amp. o 600 Amp.
11	Abrazadera universal para montaje de transformador
12	Separador sit
13	Combinación de contacto e interruptor
14	Tubo conduit galvanizado
15	Abrazadera
16	Registro
17	Varilla de tierra copper-weld de cobre de 16 mm y 3 metros de long con conector soldable
18	Acometida aérea
19	Murete de mampostería
20	Madera de 25 mm de espesor
21	Puente de unión principal
22	Tubo para alimentación a la carga

Figura 4.6 Elementos de servicio de alimentacion aérea.



4.5 Acometida subterránea

Figura 4.7 Elementos del servicio de alimentación subterránea.

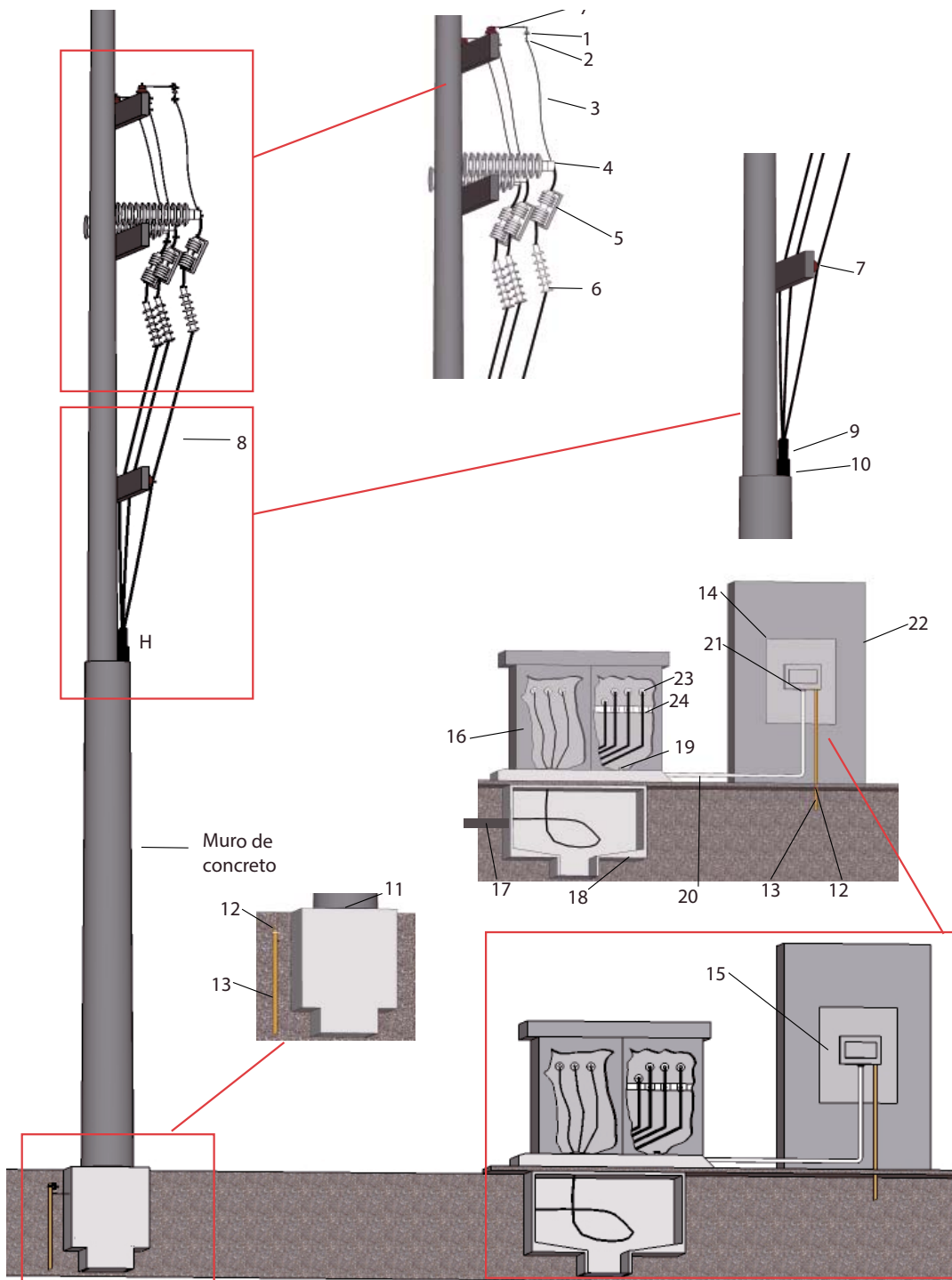


Tabla 4.7 Materiales de acometida subterránea

Materiales de acometida subterránea (transformador tipo pedestal)	
1	Estribo de cobre CU-4
2	Conector de línea viva
3	Alambre de cobre desnudo cal 4/0
4	Apartarrayo adom 12
5	Fusible universal de 3 Amp
6	Terminal Q T- II tipo exterior para 15 KV tripolar
7	Aislador 22 A
8	Cable de potencia XLP 15 KV cal 1/0
9	Cople para tubo galvanizado
10	Tubo galvanizado de 101.6 mm de diámetro
11	Registro de media tensión en banqueta
12	Conector para electrodo en tierra
13	Electrodo de tierra ACS 5/8
14	Base para equipo de medición
15	Interruptor principal
16	Subestación tipo pedestal: Por la tensión de Transmisión: 132 KV, 23 KV, 34 KV; Por sistema: de 200 Amp o 600 Amp.
17	Acometida media tensión XPL 1/0
18	Registro para acometida tensión
19	Monitor de 38 mm de diámetro
20	Tubería conduit galvanizada pared gruesa de 38 mm de diámetro
21	Juego de contra y monitor de 38 mm de diámetro
22	Murete de medición
23	Fundas termotractiles para sellar las terminales de baja tensión del transformador
24	Transformador de corriente (TC'S)

La distribución de la potencia eléctrica desde el punto de alimentación se efectúa por medio de alimentadores y circuitos derivados.

Circuito derivado: Es un conjunto de conductores que llegan hasta el último dispositivo de sobrecorriente en el sistema. Por lo general, un circuito derivado alimenta parte del sistema.

Alimentador: Es un conjunto de conductores que conectan un grupo de circuitos derivados.

Los alimentadores son protegidos por los dispositivos de protección contra sobrecorriente en los tableros.

Tableros: Conjunto de dispositivos de sobrecorriente contenidos en un gabinete con entrada al frente.

4.6 Conductores eléctricos

El calibre de los conductores se designa en forma convencional por su sección o área expresada en milímetros cuadrados (mm^2), o bien, por la designación usada en los Estados Unidos de la American Wire Gauge (AWG), la unidad de referencia es el mil o circular mil.

Los conductores se seleccionan por su capacidad de conducción de la corriente (ampacidad) y máxima caída de voltaje permisible. En instalaciones eléctricas de alumbrado público, el mínimo calibre de conductor usado es el número 6 AWG, por su resistencia mecánica y seguridad al instalarse y conductor desnudo del número 8 AWG, para el sistema de tierra física.

La fuerza requerida para instalar un cable o un grupo de cable (Tensión de Instalación o de jalado), dentro de un sistema subterráneo de ductos enterrado o en un banco de ductos depende de factores tales como:

- Peso del cable
- Longitud de circuito
- Coeficiente de fricción entre el ducto y los cables
- Geometría de trayectoria (recta, curva, etc.)
- Acomodo de los cables del ducto

Por esta razón se recomienda utilizar los conductores mayores al calibre 6AWG para conductor de tierra física.

4.7 Cálculo de la caída de tensión

Para el cálculo de la caída de tensión se utiliza la tabla siguiente y la fórmula indicada.

Tabla 4.8 Caída de Tensión (Fuente: NOM-001-SEDE-2012)

CALIBRE AWG O MCM	MONOFÁSICO		TRIFÁSICO	
	CONDUIT*		CONDUIT*	
	METÁLICO	NO METÁLICO	METÁLICO	NO METÁLICO
14	21.54	21.54	18.65	18.65
12	13.56	13.56	11.74	11.74
10	8.52	8.52	7.38	7.38
8	5.36	5.36	4.64	4.64
6	3.37	3.37	2.92	2.92
4	2.12	2.12	1.84	1.84
2	1.35	1.33	1.18	1.16
1/0	0.86	0.84	0.74	0.73
2/0	0.68	0.67	0.59	0.59
3/0	0.55	0.53	0.48	0.47
4/0	0.44	0.42	0.38	0.36
250	0.38	0.36	0.33	0.31
300	0.32	0.30	0.28	0.26
350	0.27	0.26	0.24	0.23
400	0.24	0.22	0.21	0.19
500	0.20	0.18	0.17	0.16
600	0.17	0.15	0.16	0.14
750	0.14	0.12	0.12	0.10
1000	0.12	0.09	0.10	0.09

* Valores válidos para todo tipo de canalización.

Para el cálculo de la caída de voltaje expresada en porcentaje se utiliza la siguiente fórmula:

$$\% \Delta V = \frac{F_c \times L \times I}{10 \times V}$$

De la fórmula anterior:

- %ΔV= Caída de voltaje, expresada en porcentaje.
- L = Longitud del conductor (Circuito) en metros.
- I = Corriente en el circuito de Amperes.
- V = Voltaje de alimentación en Volts.
- Fc = Factor de caída de tensión unitaria en mili-Volts/Ampers-metro.

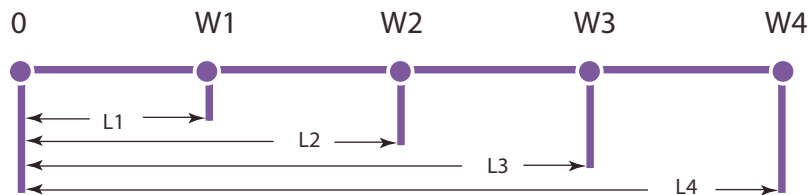
El factor de potencia considerado en el cálculo de las tablas es de 0.9

Cálculo del centro de carga:

Cuando las cargas parciales están en un mismo lineamiento:

Punto cero donde se encuentra la toma de energía.

Figura 4.8 Determinación del centro de carga



$$L = \frac{L1 W1 + L2 W2 + L3 W3 + L4 W4}{W1 + W2 + W3 + W4}$$

Donde:

L = Longitud del Circuito

W = Potencia del Circuito

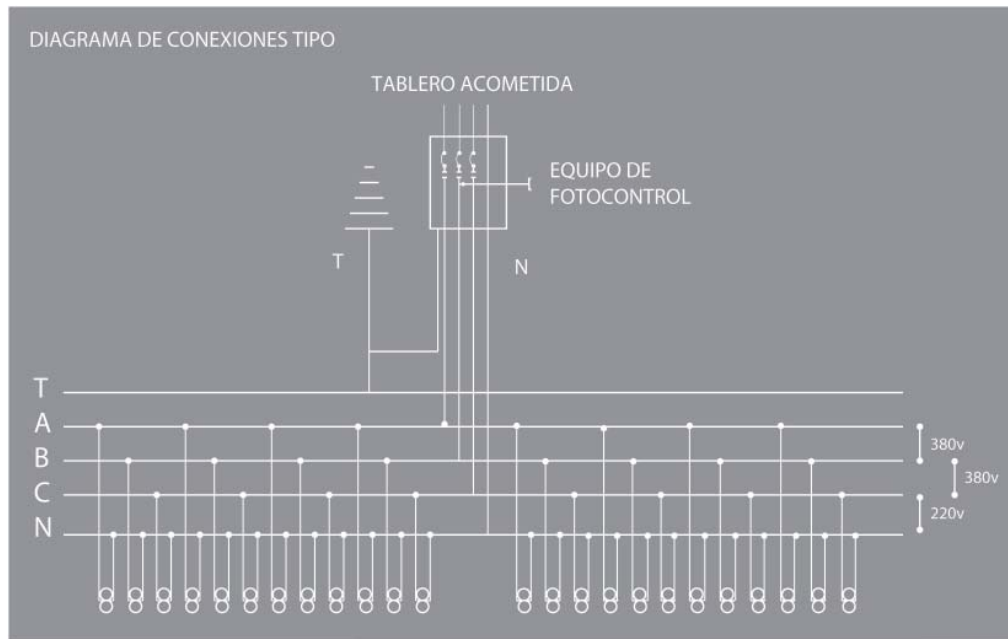
Artículo 210.19 Conductores: Tamaño nominal del conductor y capacidad de conducción de corriente mínimos.

Nota: Los conductores de circuitos derivados dimensionados para evitar una caída de tensión eléctrica superior a 3% en la salida más lejana que la alimente a cargas de calefacción, alumbrado o cualquier combinación de ellas y en los que la caída máxima de tensión eléctrica de los circuitos alimentadores y derivados hasta el receptáculo más lejano no supere 5%, proporcionando una razonable eficacia de funcionamiento para la caída de tensión eléctrica de los conductores de los circuitos alimentadores.

4.8 Conexión de los equipos de alumbrado a un alimentador trifásico

Para balancear las corrientes, las luminarias deben conectarse formando grupos alternados como se indica en el diagrama de conexiones.

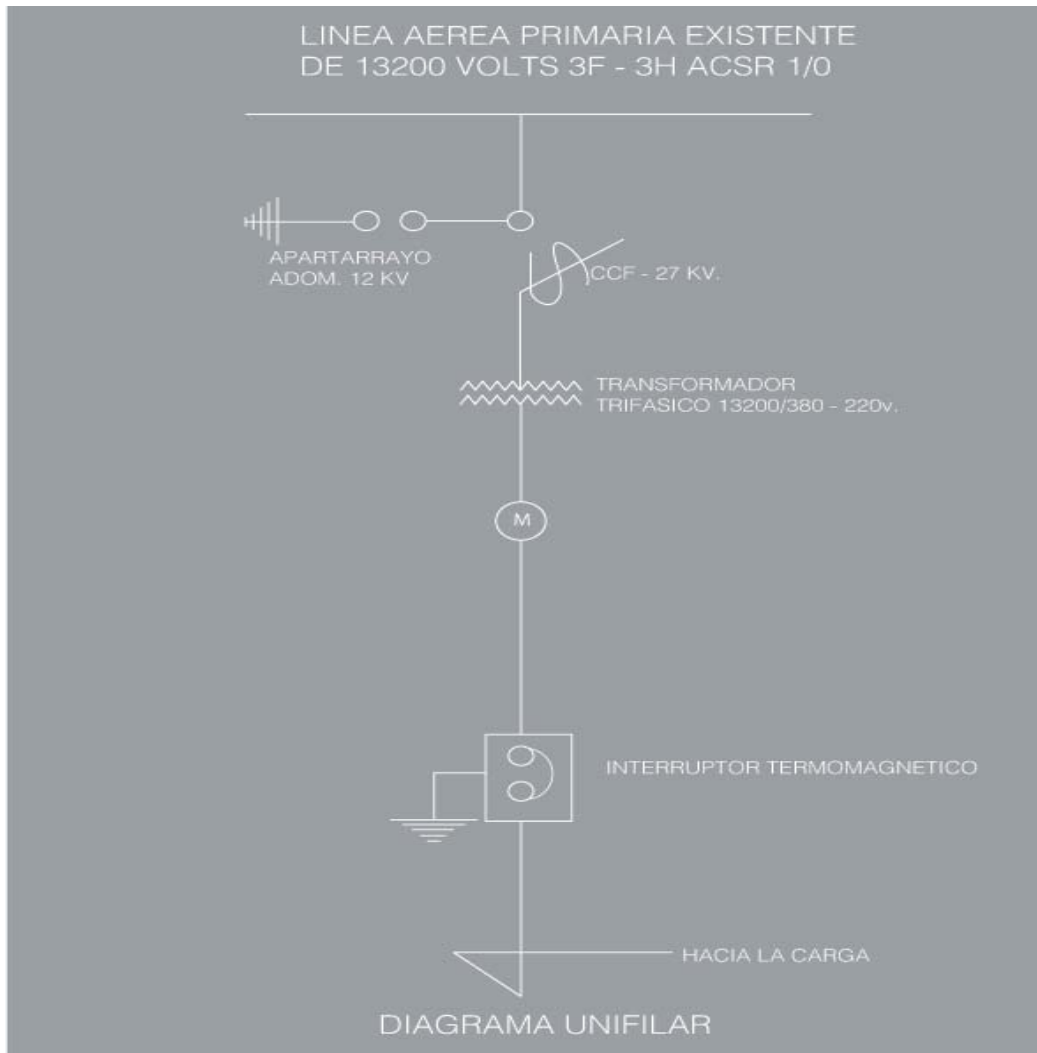
Figura 4.9 Diagrama de conexión



4.9 Transformadores y equipos de media tensión

Transformadores trifásicos 13200 o 23000 volts / 380 volts delta estrella, cuchillas, fusible y apartarrayos de alta tensión deben cumplir las especificaciones de la Comisión Federal de Electricidad (CFE). Se debe instalar un transformador por cada circuito eléctrico, salvo en caso de entronques.

Tabla 4.9 Diagrama unifilar



4.10 Fórmulas eléctricas

$$Pa[\text{volt-ampere}] = \frac{Pr[\text{watt}]}{\cos \emptyset}$$

Circuito Trifásico.

$$I[\text{Ampere}] = \frac{Pr[\text{watt}]}{1.732 \times V_{L-L}[\text{volt}] \cos \emptyset} = \frac{Pa[\text{volt-ampere}]}{1.732 V_{L-L}[\text{volt}]}$$

4.11 Unidades eléctricas

Tabla 4.10 Tabla representativa (Fuente: Instalaciones eléctricas de potencia. Enrique Harper)

Concepto	Símbolo	Unidad	
		Nombre	Abrev.
Potencia aparente	Pa	Volt-Ampere	VA
Potencia real	Pr	Watt	W
Intensidad de corriente eléc.	I	Ampere	A
Voltaje (tensión eléct.)	V	Volt	V
Frecuencia	F	Hertz	Hz
Voltaje de línea a neutro	V_{LN}	Volt	V
Factor de potencia	$\cos \emptyset$	-	-
$Pa(\text{Volt-ampere}) = \frac{Pr(\text{watt})}{\cos \emptyset}$			

4.12 Postes

Acorde con la actual tecnología de iluminación, es conveniente evitar al máximo que las luminarias queden dentro del ángulo visual del conductor, por lo que se recomienda que los brazos de los postes no excedan de 0.60 m de longitud o bien que las luminarias estén pegadas a los postes dependiendo del modelo de la luminaria y del ancho del acotamiento, camellón o banqueta.

En las zonas costeras se le pedirá al fabricante que los postes de alumbrado sean del tipo anticiclónico para soportar una velocidad del viento de hasta 180 Km/h y con tratamientos anticorrosivos o bien galvanizados con su correspondiente garantía.

Figura 4.10 Ilustración de poste

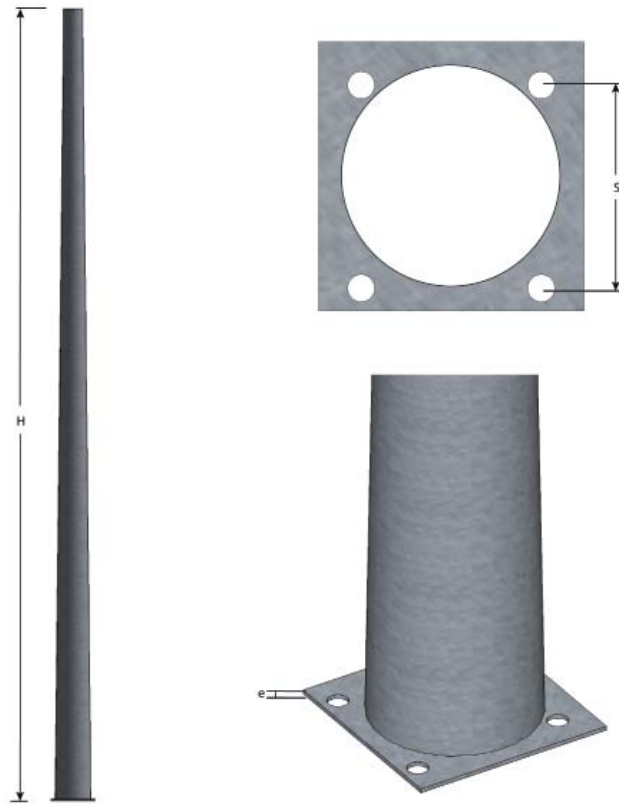


Tabla 4.11 Descripción de poste (Fuente: Catálogo de Tubo y Postes S.A.)

H(*)	Punta Ø (+)	Base Ø (+)	Base			
			Barrenos Ø	# Base	S	e
3 a 5	60	115	28.6	280	190	9.5
5.5 a 7	75	150	28.6	280	190	9.5
7.5 a 9.5	75	180	28.6	280	190	11.1
10 a 12	75	180	28.6	350	270	12.7
12.5 a 15	100	190	28.6	350	270	12.7

+ Cotas en milímetros

* Cotas en metros

Todos los postes son fabricados en lámina calibre 11 U.S.G

Figura 4.11 Ilustración de super poste

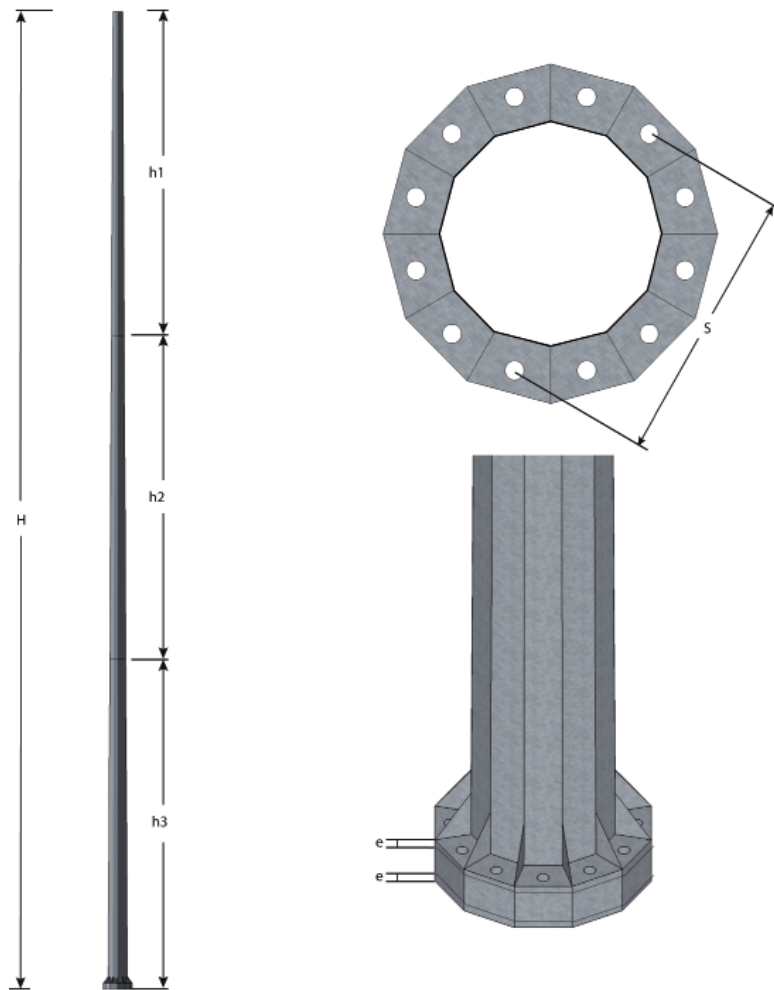


Tabla 4.12 Descripción super poste (Fuente: Catálogo de Tubo y Postes S.A.)

Referencia	H (*)	N° de Secc	Largo de Secciones				Punta Ø (+)	Base Ø (+)	Base					Espesor de lámina (+)	Peso en Kg
			* h1	* h2	*h3	*h4			Barrenos Ø	N° Anclas	Ø Base	S	e		
SDT 20	20	2	10.0	10.6			250	500	51	6	800	650	19	4.8	1022
SDT 25	25	2	13.0	12.6			300	600	51	8	900	650	19	4.8	1485
SDT 10	30	3	10.0	10.6	10.6		300	600	51	12	900	650	25	6.4	2286
SDT 35	35	3	13.0	11.6	11.6		300	900	51	12	1200	650	25	6.4	3525
SDT 40	40	4	10.0	10.6	10.6	10.6	300	900	51	12	1200	650	38	6.4	5921

En todos los casos la altura de base será 200 mm.

Este tipo de superpostes está diseñado para ser equipado con corona móvil, soporte y proyectores.

+ Cotas en milímetros

+ Cotas en metros

Figura 4.12 Anclas (Fuente: Catálogo de Tubo y Postes S.A.)

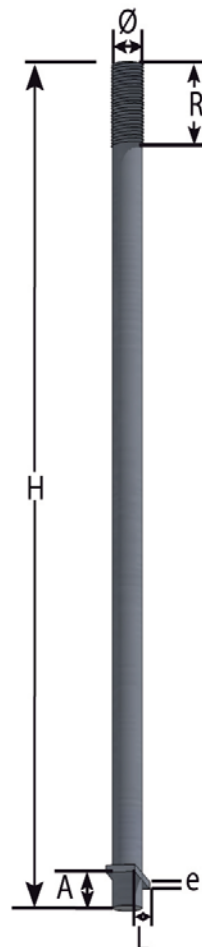
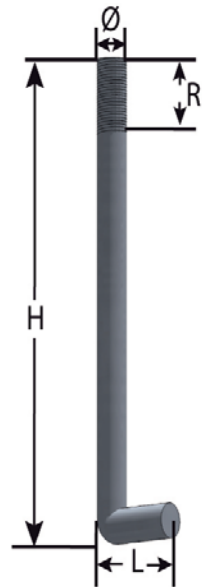


Tabla 4.13 Descripción de anclas (Fuente: Catálogo de Tubo y Postes S.A.)

Se recomienda	Referencia	H	L	R	Ø
a	AL 19	500	100	100	19
b	AL 25	500	100	100	25
c	AL 90	500	100	100	25

Se recomienda	Referencia	H	L	R	Ø	e	A
d	AR 12	1500	200	400	32	13	50
e	AR 38	1500	200	400	38	13	50

a y b	Para postes hasta 12 m de altura
c	Para postes hasta 16 m de altura
d	Para postes hasta 20 m de altura
e	Para postes hasta 30 m de altura

(Cotas en milímetros)

4.13 Detalles de obra civil registros, bases y ductos, para baja tensión.

Registros

Los registros son de concreto armado, ubicándose al pie de los postes en donde existan interconexiones o bien en los cruces de ductos en carretera. Cuando el nivel freático (presencia de agua) se encuentre arriba del fondo del registro, dicho registro será impermeable. Las tapas se construirán para sellar el registro y evitar la entrada de agua.

Los registros sencillos en cruces de carretera de 0.80 m x 0.60 m x 1.0 m de profundidad. El detalle se puede apreciar en la siguiente figura.

Figura 4.13 Detalles de registro

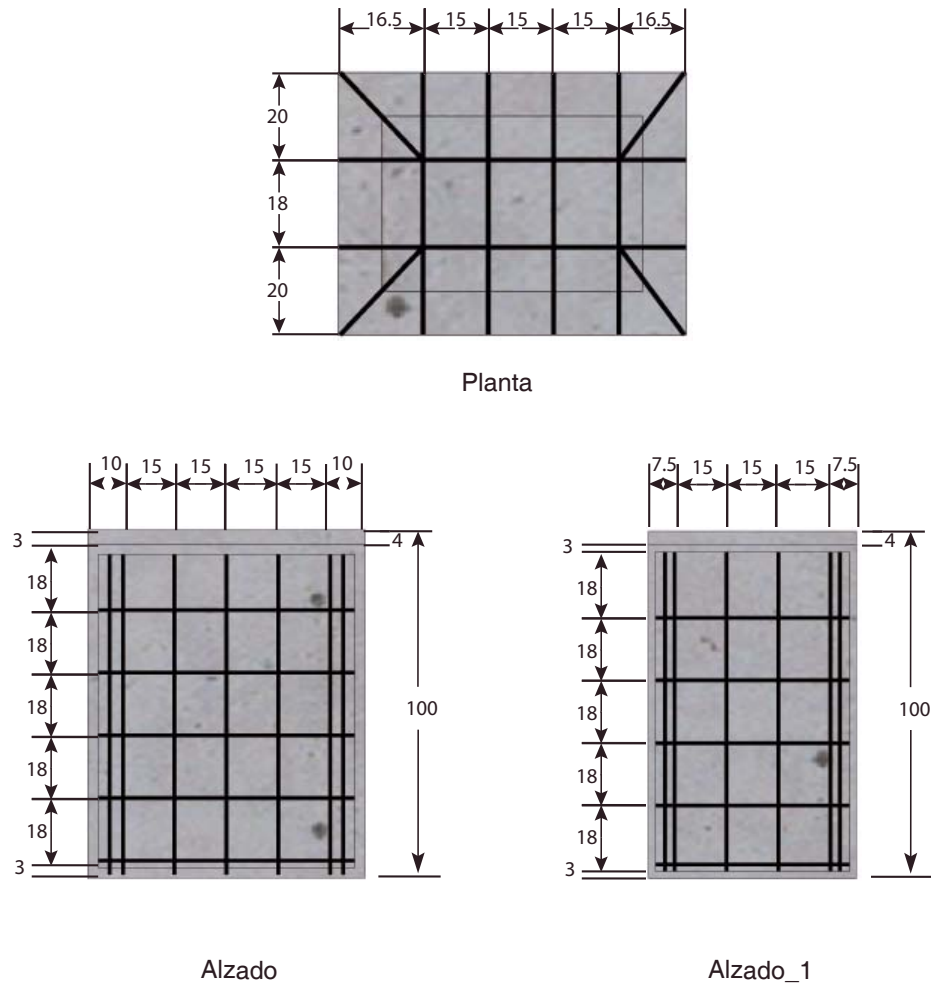
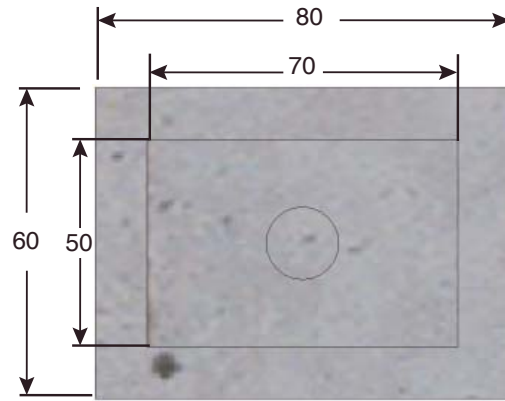


Figura 4.14 Detalles de registro en planta



Planta



Isométrico

Bases

Las Bases mantienen fijos los postes en su lugar de anclaje y deben ser de concreto armado, lo suficientemente sólidos y pesados para absorber junto con el suelo los movimientos producidos por el viento y el propio peso de postes y luminarias. Para dimensionar la cimentación debe tomarse en cuenta la resistencia mecánica de cada suelo. Las anclas y su plantilla de colocación deben ser suministradas por el fabricante del poste.

Figura 4.15 Detalles de base para postes de 20 metros

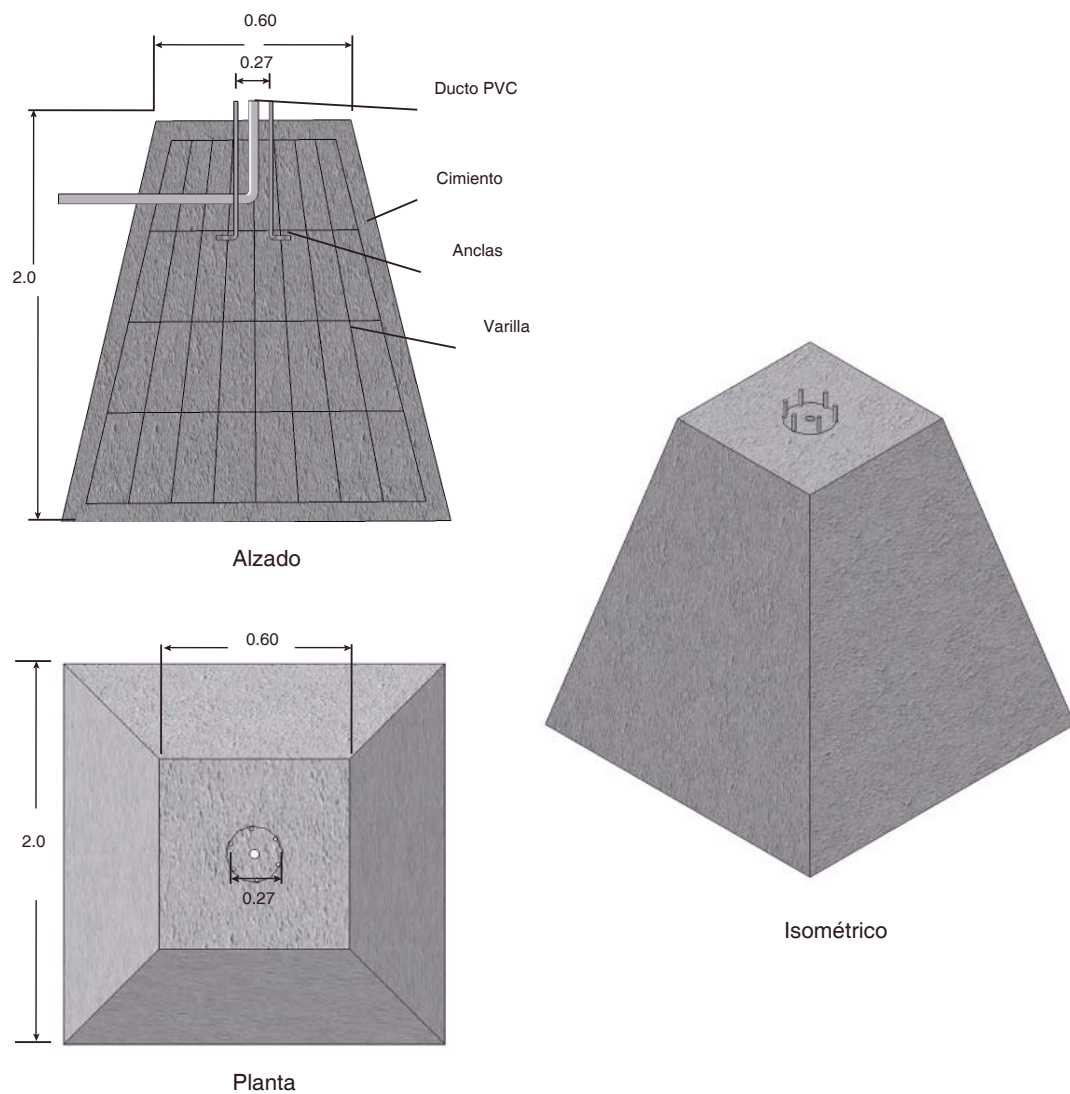
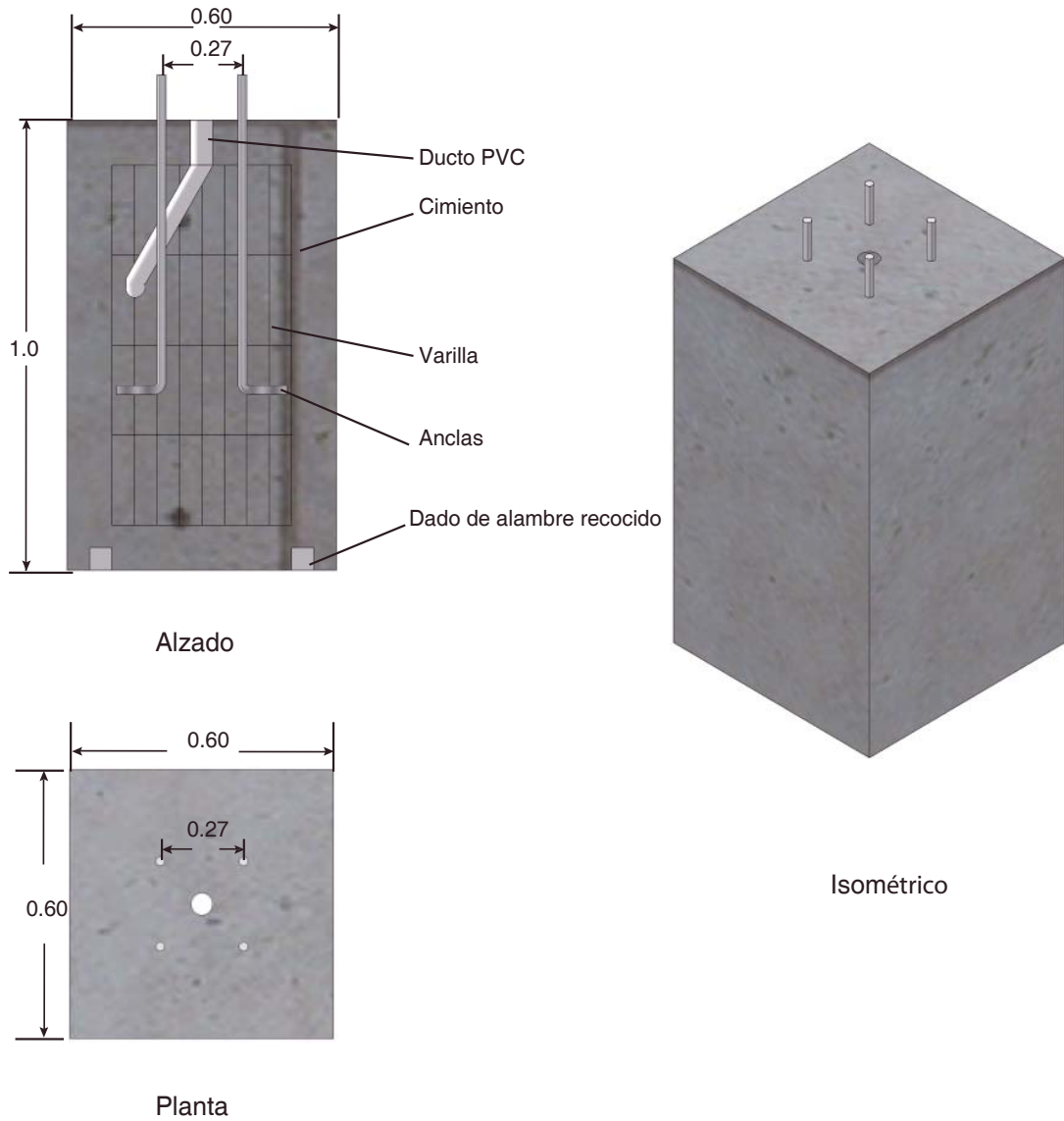


Figura 4.16 Detalle de base para postes de 9 a 14 metros

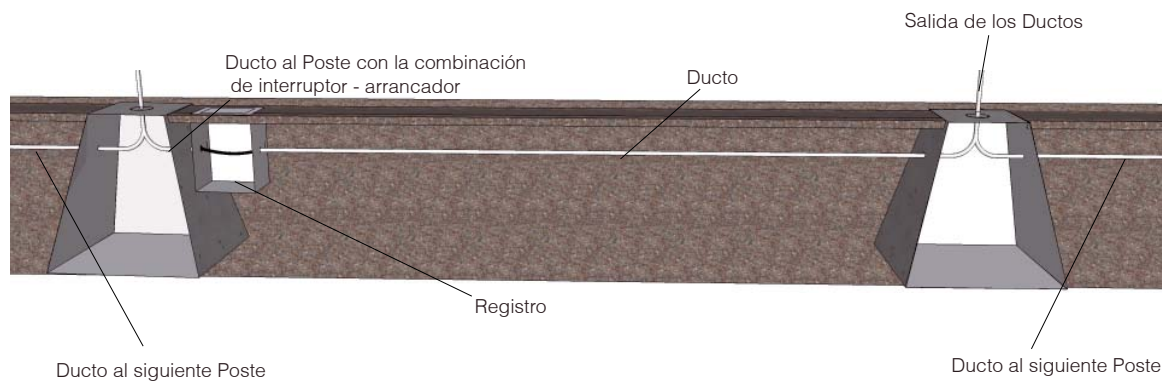


Ductos

En los tramos longitudinales se utilizan ductos de PVC tipo pesado a 0.40 m de profundidad como mínimo. En los cruces de carretera se debe utilizar tubo de acero de pared gruesa esmaltado con una capa de concreto de 10 cm de espesor mínimo instalados a 1 m de profundidad.

En cada registro, y después de instalar los cables deben sellarse los extremos de los ductos mediante tapones de alambre recocido y concreto pobre, para evitar la entrada de roedores.

Figura 4.17 Detalles de las salidas de los ductos



4.14 Desarrollo de planos

Generalidades

Los planos se harán en formato mínimo doble carta (279.40 x 431.80 mm) para su fácil manejo, tanto en oficina como en campo y deberán contener la información y características de los proyectos a ejecutarse de la siguiente forma:

Plano maestro

1. Representación gráfica de los bulevares, entronques, libramientos, calles, plazas y jardines que contenga el proyecto.
2. Localización de los puntos de conexión de la red de distribución de energía eléctrica de las empresas suministradoras.
3. Localización de postes, luminarias y equipos de control y protección.

4. Localización de los registros y trayectoria de canalizaciones

5. Indicación de instalaciones existentes que vayan a ser modificadas o retiradas. Los detalles de alumbrado especial del proyecto se harán en planos a mayor escala.

Planos y documentos del proyecto de iluminación

1. Distribución de los equipos

2. Localización de los puntos luminosos, detallando la altura de montaje y la distancia interpostal, posición relativa con respecto al acotamiento de la carretera, el boulevard o la calle.

3. Niveles de iluminación incluyendo:

- Promedio sostenido
- Nivel máximo
- Nivel mínimo
- Relación de uniformidad
- Localización de puntos y lecturas obtenidas (curvas isolux)

4. Cuantificación de los equipos localizados en el proyecto por Km de boulevard o carretera y vías urbanas.

5. Descripción de los equipos de control de encendido y apagado, carga instalada y horas de operación, especificaciones generales de los equipos de alumbrado (luminarias, lámparas, reactores y postes).

Planos del proyecto eléctrico

1. Diagrama unifilar del sistema

2. Cuadro de cargas

3. Diagrama de control

4. Subestaciones eléctricas

5. Simbología empleada

6. Detalles constructivos

7. Relación de materiales y equipos usados

8. Espacios para sellos de aprobación por la dependencia correspondiente y para datos del perito responsable del proyecto
9. Firma del perito responsable del proyecto
10. Aprobación del proyecto por la entidad gubernamental correspondiente

Planos del proyecto civil

1. Trayectoria de canalizaciones
2. Cimentaciones (bases para postes)
3. Registros
4. Ductos

Incremento de umbral (TI)

TI = incremento de umbral correspondiente al deslumbramiento perturbador.

Se calcula para el estado inicial de la instalación, es decir, con la luminaria nueva y con el flujo inicial de la lámpara, mediante la siguiente fórmula:

$$TI = K \times E_g / (L_{prom}) 0.8 \times \varnothing 2 \%$$

(K) es una constante que varía con la edad del observador. Generalmente se considera un observador de 23 años de edad, en cuyo caso es igual a 650 porque:

$$TI = 65 \times L_v / (L_{prom}) 0.8$$

$$L_v = 10 \times E_g / \varnothing 2$$

$$TI = 650 E_g / \varnothing 2 \times (L_{prom}) 0.8$$

Para edades del observador diferentes a 23 años, el valor de la constante K se calcula a partir de la siguiente fórmula:

$$K = 641(1+(A/66.4)^4)$$

En donde:

A: edad del observador en años.

E_g : es la iluminancia total inicial producidas por las luminarias, en su estado nuevo, sobre un plano normal a la línea de visión y a la altura del ojo del observador.

El observador está ubicado a una altura de 1.50 m sobre el nivel de la calzada y con relación a ésta, está colocado de la siguiente manera:

Transversalmente al ancho total de la calzada y longitudinalmente a una distancia, frente al inicio del campo de cálculo de:

$$2.75 (H-1.5)$$

Donde H es la altura de montaje de la luminaria en metros. (Se asume que el ángulo de apantallamiento del techo del vehículo es de 20°).

L_{prom} : es la luminancia media inicial de la superficie de la calzada.

\emptyset : es el ángulo en grados entre línea de visión y el centro de cada luminaria.

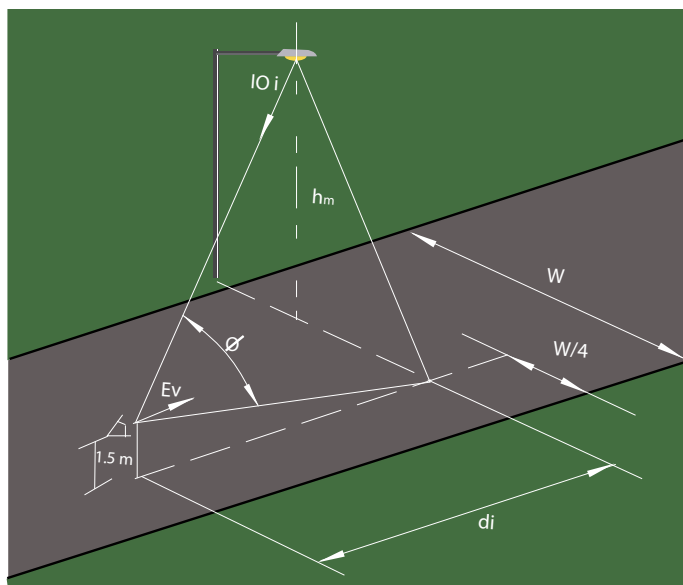
El cálculo de TI se inicia con el observador situado en la posición inicial, definida anteriormente, y luego se repite moviendo el observador hacia delante con incrementos que son los mismos en un número y distancia que los utilizados para el cálculo de luminancias promedio de la calzada.

El TI de la calzada es el correspondiente al valor máximo encontrado en los cálculos.

Esta ecuación es válida para $0.05 < L_{prom} < 5 \text{ cd/m}^2$ y $1.5^\circ < \emptyset < 60^\circ$

Eg se añade para la primera luminaria en la dirección de observación y luminarias más alejadas, hasta una distancia de 500 m.

Figura 4.18 Distancia y ángulo del observador (Fuente: Tecnología del alumbrado público en las vialidades principales del Estado de México. Ing. A. Horacio López Díaz)



Ejemplo:

Se tiene un alumbrado público con los siguientes resultados:

1. Observador de 23 años

$$E_g = 17 \text{ Lux}$$

$$L_{\text{prom}} = 1.3 \text{ cd/m}^2$$

$$\varnothing = 30^\circ$$

$K = 650$ para un observador de 23 años

$$TI = 650 E_g / \varnothing^2 \times (L_{\text{prom}}) 0.8 = 9.95 \%$$

2. Observador de 50 años

$$E_g = 17 \text{ lux}$$

$$L_{\text{prom}} = 1.3 \text{ cd/m}^2$$

$$\varnothing = 30^\circ$$

$K = 847$ para un observador de 50 años

$$TI = 847 E_g / \varnothing^2 \times (L_{\text{prom}}) 0.8 = 12.96 \%$$

Resulta evidente que el incremento de umbral TI es directamente proporcional a la luminancia de velo (L_v) e inversamente proporcional a la luminancia media de la calzada (L_m). Por otra parte, el estándar de calidad establecido por la CIE (1977) para el incremento de umbral depende del tipo de vía de tráfico, siendo del orden de $TI \leq 14 \%$.

En resumen, el deslumbramiento perturbador afecta a la agudeza visual, sin causar necesariamente una sensación desagradable.

5.1 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 5.1 Alumbrado vial



5.2 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 5.2 Vista desde interior de vehículo



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 ($0.2-0.3 \text{ cd/m}^2$), 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.

Campo visual del conductor

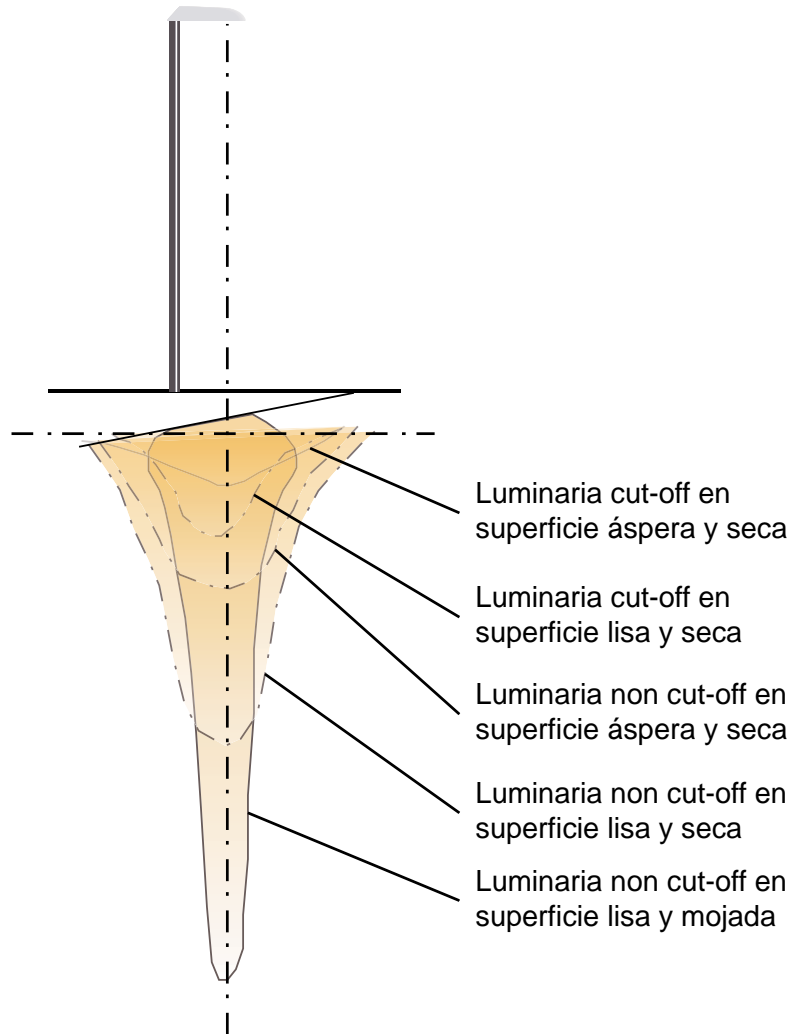
El campo visual normal del conductor comprende en orden de importancia:

- 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 (ver figura 5.3).

Figura 5.3 Curvas de luminancia de acuerdo al tipo de luminaria (Fuente: Revista Lumitecnia-1973)



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.

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 5.4 Peatón cruzando una avenida con bajo nivel de iluminación



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.

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 apertura de la luminaria no debe de pasar de los 70° respecto a su vertical, de esta manera se evita el deslumbramiento al conductor.

Figura 5.5 Ángulo de deslumbramiento de luminaria cut-off (Fuente: Revista Lumitecnia-1973)

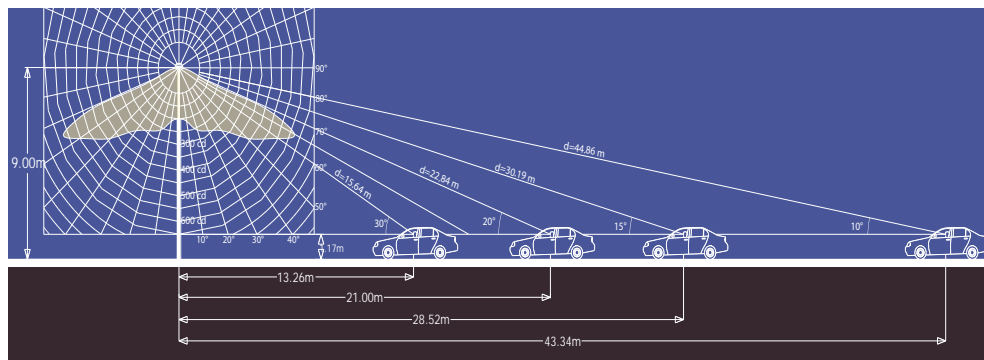


Figura 5.6 Boulevard iluminado con luminarias cut-off



En el siguiente análisis vemos al mismo boulevard iluminado con luminarias no 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 5.7 Ángulo de deslumbramiento de luminaria no cut-off (Fuente: Revista Lumitecnia-1973)

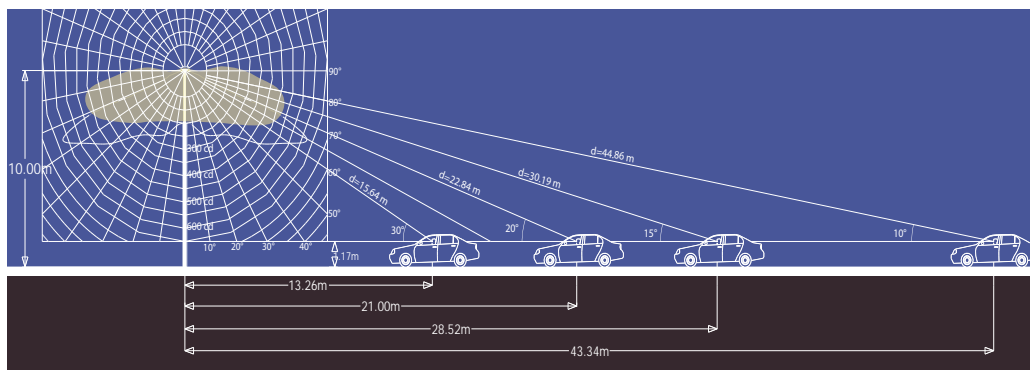


Figura 5.8 Boulevard iluminado con luminarias OV non cut-off



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.

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 5.9 Ejemplo de contaminación visual y lumínica



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 5.10 Ejemplo de contaminación visual



Figura 5.11 Ejemplo de avenida iluminada por luminarias equipadas con refractor



Inconvenientes de los recubrimientos oscuros.

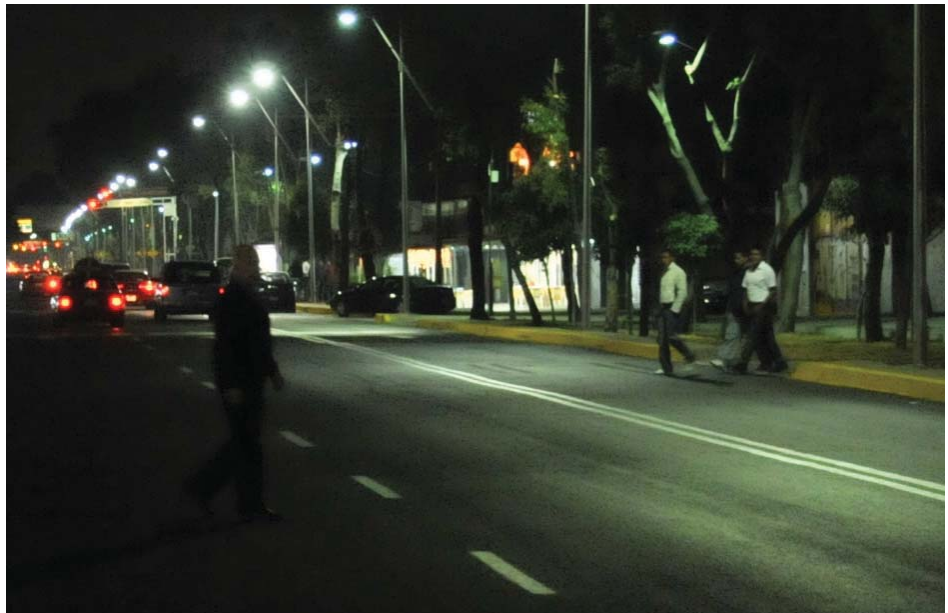
Tal y como se ha mostrado anteriormente, existe un especial interés en que el recubrimiento de las calles no sea en acabado liso sino granulado, ya que contribuye a la seguridad en el manejo en cuanto a la buena adherencia de las llantas de los vehículos en circulación.

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 5.12 Foto de ejemplo



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 m^2 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.

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 despidе 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 5.13 Mapa de luminancia



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 5.14 Avenida con lámparas de vapor de sodio alta presión y lámparas con aditivos metálicos

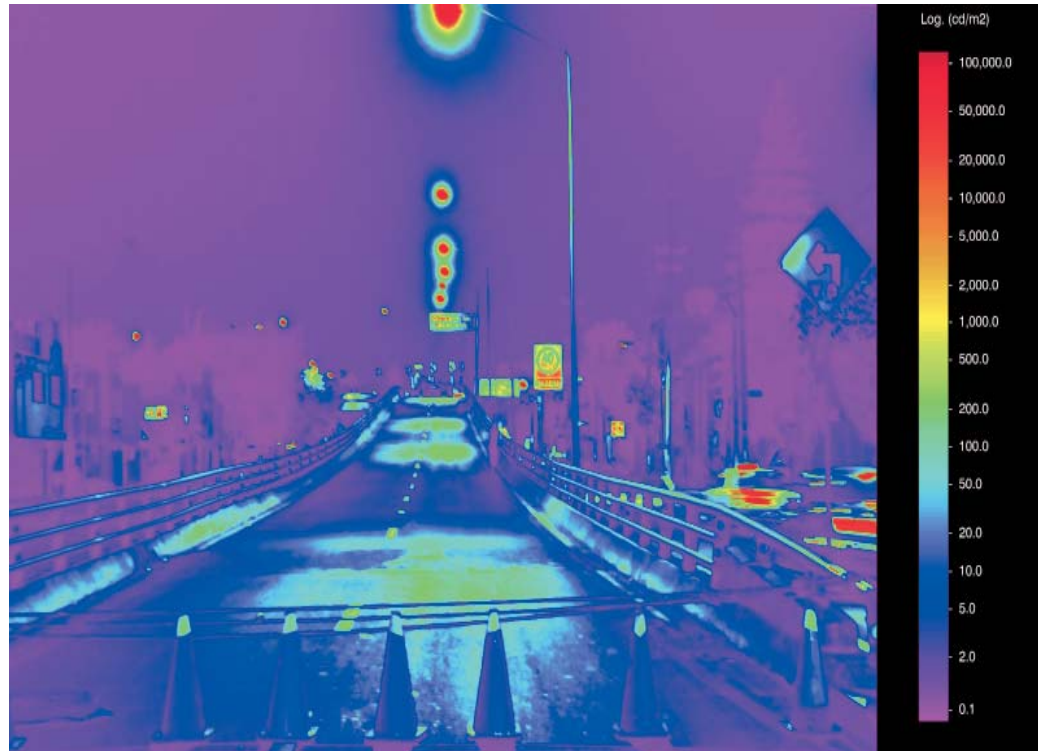


En esta foto se ven las sombras oscuras debajo de las lámparas con aditivos metálicos en contraste con las de vapor de sodio alta presión.

Midiendo con un luminómetro esas sombras oscuras nos dan un valor de 0.50 cd/m^2 , valor muy por debajo del permitido en una vialidad de estas características, que debe de ser 2 cd/m^2 .

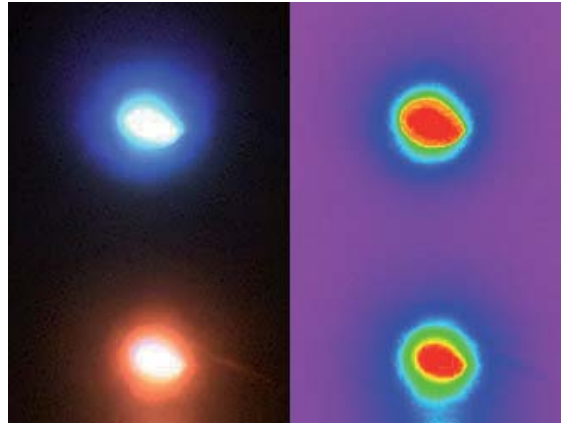
Estos valores de luminancia se aprecian en la siguiente figura, en donde el color magenta representa menos de 1 cd/m^2 .

Figura 5.15 Representación de las candelas por m^2 , por medio de un mapa de luminancias



En esta misma imagen podemos aprovechar por medio del mapa de luminancia, analizar la diferencia entre las intensidades de los dos tipos de lámparas. La lámpara de aditivos metálicos es menos intensa y menos eficiente al proyectarse en el pavimento ($10 \text{ cd}/m^2$). La lámpara de vapor de sodio es más intensa proyectando más candelas por metro cuadrado ($120 \text{ cd}/m^2$) esto se debe a que el ojo es más sensible a la parte media del espectro electromagnético de la luz visible (amarillo y naranja).

Figura 5.16 Lámpara de aditivos metálicos y lámpara de vapor de sodio de alta presión



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.

5.3 Contaminación lumínica

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.

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 5.17 Ejemplo de contaminación lumínica



Efectos

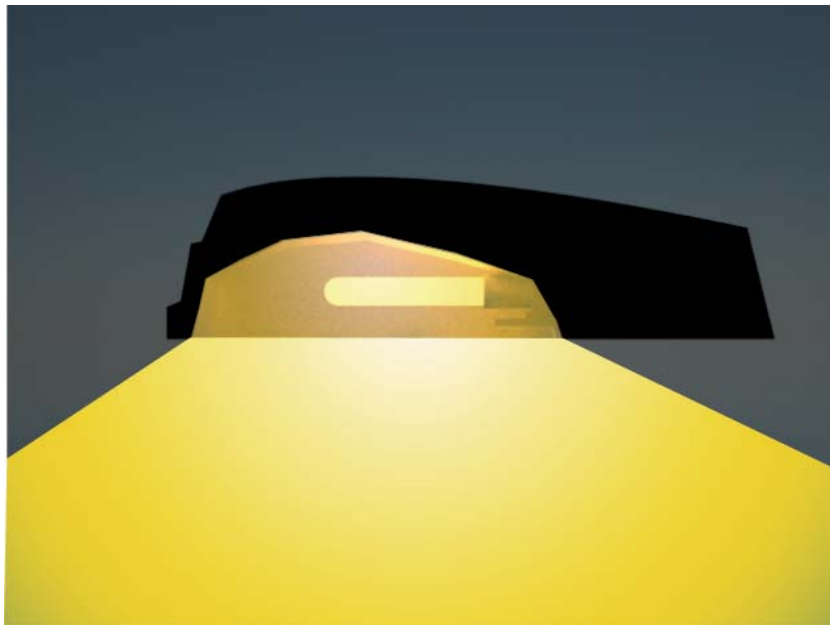
Las consecuencias que tiene esta contaminación luminosa son: tener un consumo de energía innecesario, un desperdicio de energía y dinero al enviar hacia el cielo gran parte de la energía consumida, lo cual obliga a tener lámparas de mayor potencia como es el caso de las lámparas de aditivos metálicos 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.

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 5.18 Vista transversal de una luminaria tipo semi cut-off



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.

6.1 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 6.1 Carretera iluminada



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 6.2 Carpeta seca nivel de luminancia uniforme



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.

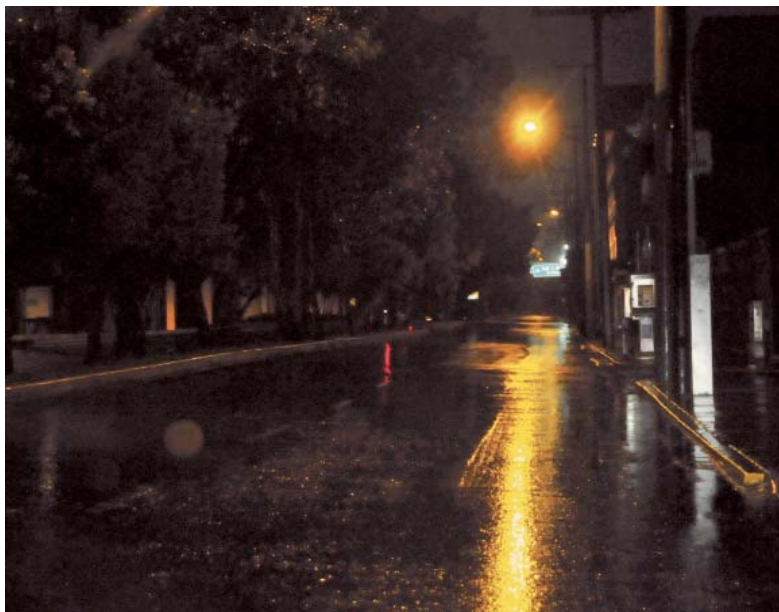
Se sabe que la impresión luminosa que recibe el ojo proveniente de un objeto iluminado, no es debido al nivel de iluminación de este objeto sino a su luminancia, es decir, que el ojo se sensibiliza no por la luz recibida por el objeto, sino por aquella que éste refleja hacia el observador, por lo tanto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

Esto sucede en el alumbrado publico en donde el objeto de nuestra atención, esta 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.

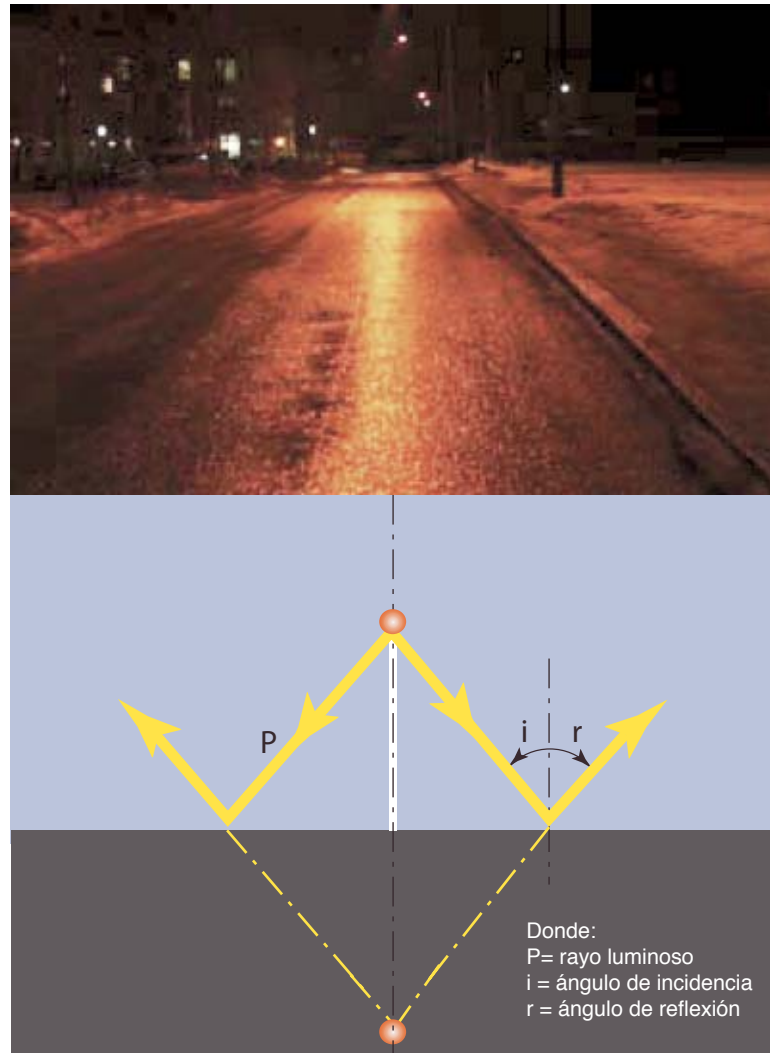
Figura 6.3 Carpeta mojada se vuelve más reflejante



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.

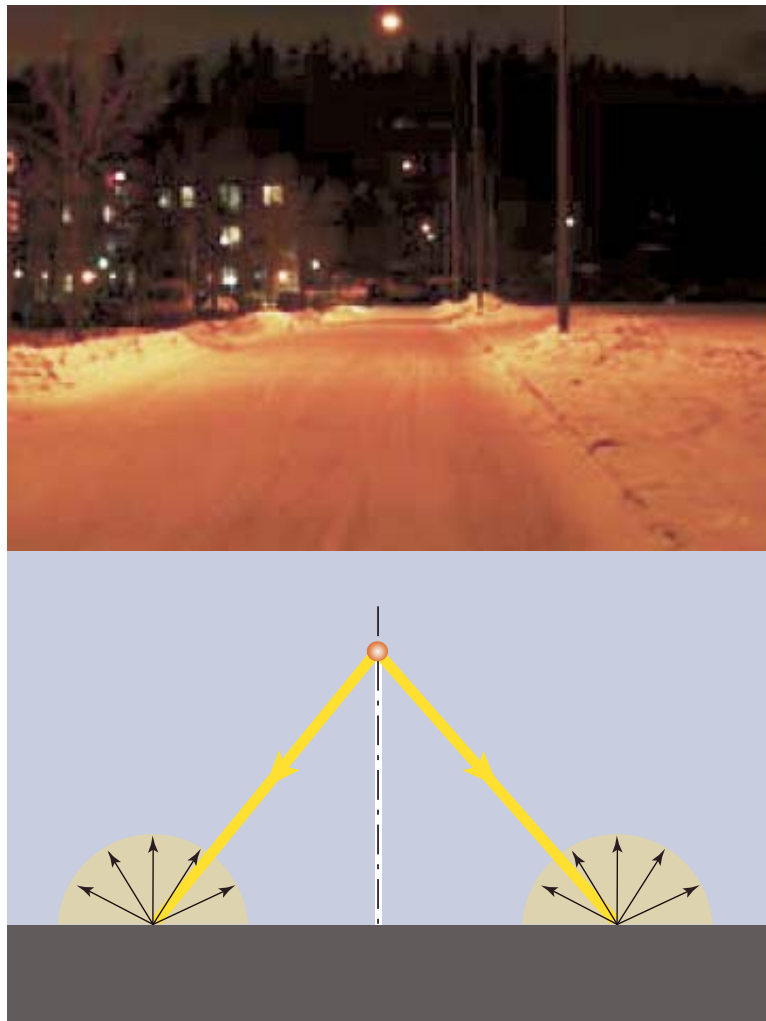
Está comprobado que en carpetas muy lisas, la zona de luminancia máxima nunca se extiende más allá de la base del poste; lo que se explica fácilmente, ya que los rayos luminosos son reflejados en sentido opuesto al de observación (figura 6.4) (rayo P) y por lo tanto no pueden ser percibidos por el ojo. Cuando el observador se desplaza, la raya de luminancia se desplaza también con él.

Figura 6.4 Angulo de incidencia igual al ángulo de reflexión



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.

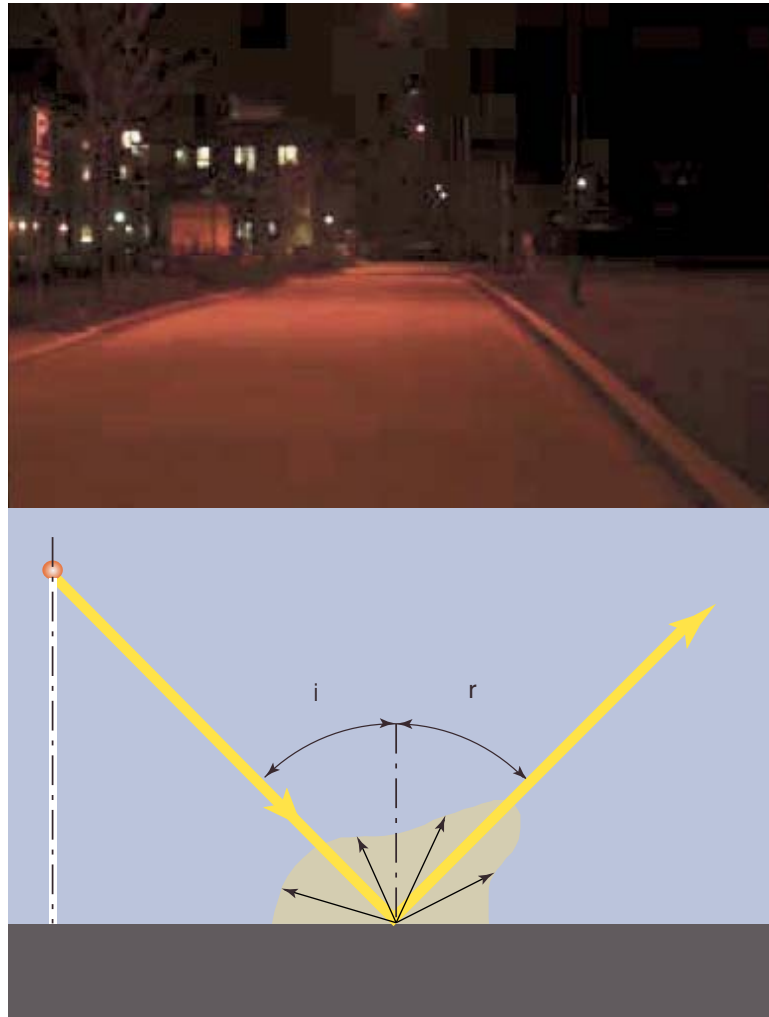
Figura 6.5 Carpeta con esparcimiento



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 6.6.

Figura 6.6 Reflexión de carpeta



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.



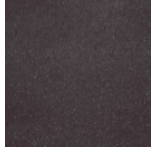

6.2 Pavimentos

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

Tabla 6.1 Características de reflectancia del pavimento (Fuente: CIE)

Clase	Qo	Descripción		Tipo de reflectancia
R1	0.10	Superficie de concreto cemento portland.		Casi difuso
R2	0.07	Superficie de asfalto con un agregado compuesto de un mínimo de 60% de grava de tamaño mayor de 10 mm.		Difuso especular
R3	0.07	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	0.08	Superficie de asfalto con textura muy tersa.		Muy especular

$$\text{luminancia [cd/m}^2\text{]} = \text{iluminancia [lux]} \times \text{reflectancia [Qo]}$$

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:

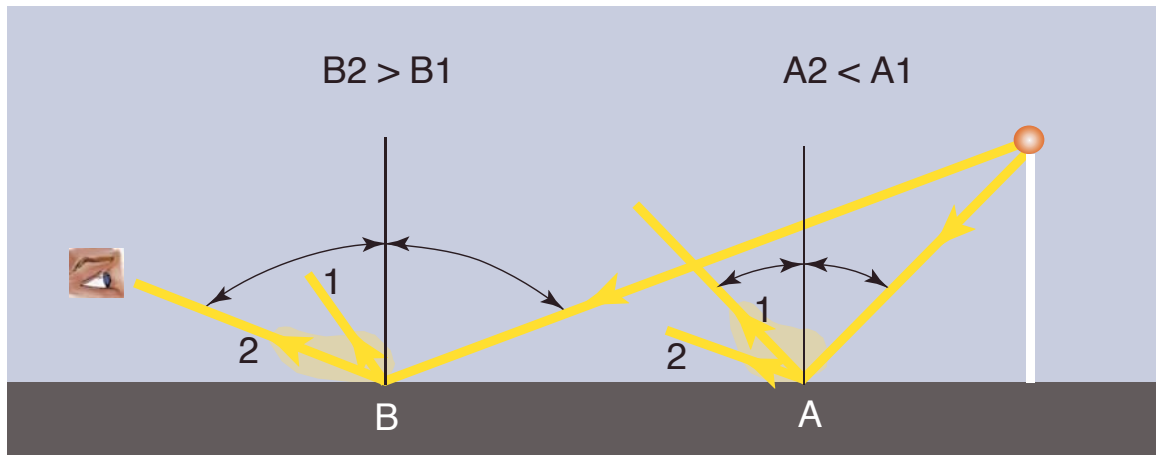
Tabla 6.2 Recomienda los siguientes niveles para carpetas oscuras o claras en varios tipos de vías de circulación^{REF12}

	Clases 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

6.3 Nivel de luminancia

Los recubrimientos de las carreteras o calles se comportan como superficies semi-difusoras y semi-reflejantes (figura 6.6), 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 6.7.

Figura 6.7 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^{REF13}, recomienda para los recubrimientos de calles más comunes que la UNIFORMIDAD DEL NIVEL LONGITUDINAL SOBRE EL EJE DE OBSERVACION 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:

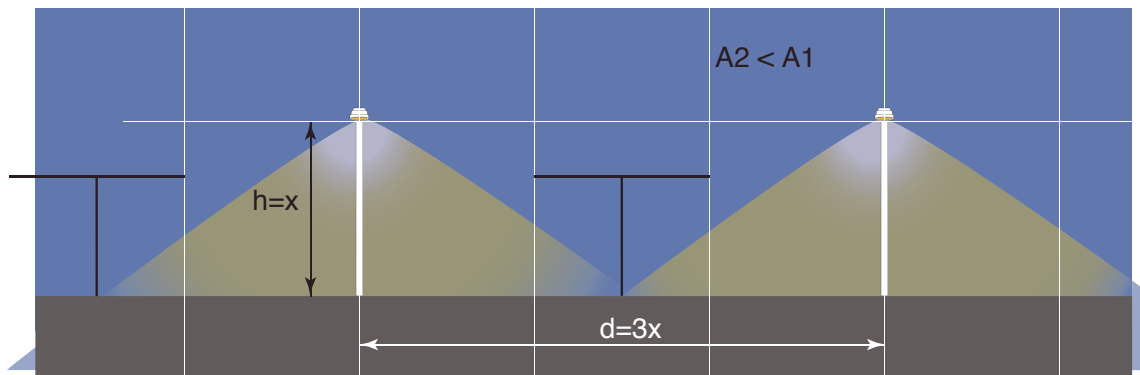
$$\frac{E_{\min}}{E_{\max}} > 0.4 \text{ y } < 0.8$$

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.).

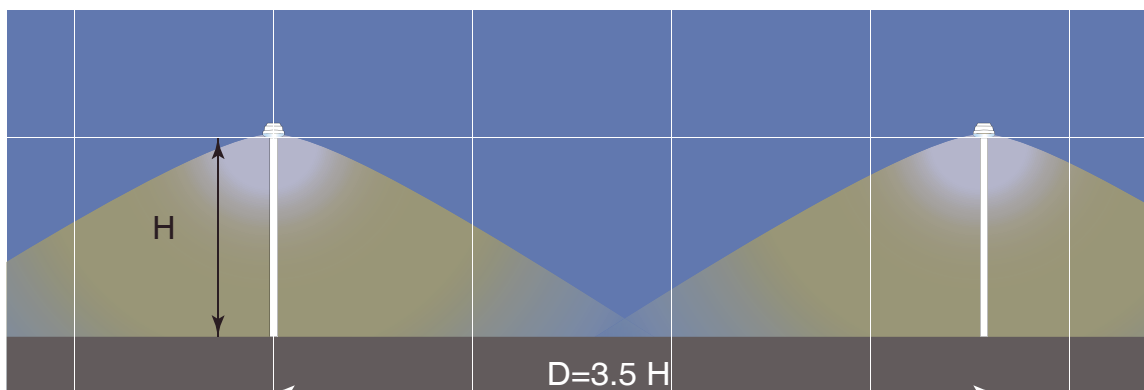
Este resultado se obtiene generalmente con una relación de distancia igual a tres veces la altura de montaje para luminarias del tipo cut-off, con lámparas con recubrimiento interior y de 3.5 con lámparas claras, desde luego, que los valores de esta relación pueden aumentarse a 4 respectivamente con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

Figura 6.8 Relación de espaciamento y altura en diferentes tipos de luminarias

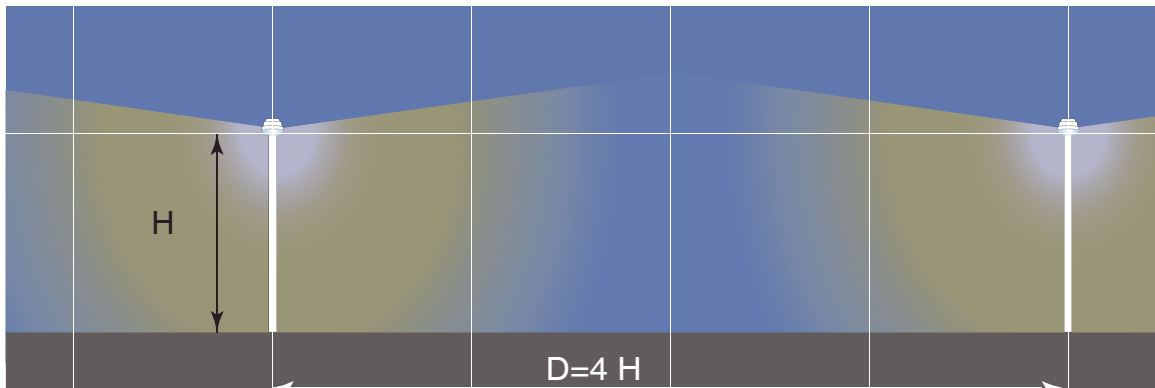
Luminaria Cut-off



Luminaria Semi cut-off



Luminaria Non cut-off



6.4 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 clasificó las luminarias de acuerdo a la dirección de la intensidad máxima con relación a la vertical, este sistema se sigue utilizando para iluminación vial.

Tabla 6.3 Intensidad máxima con relación a la vertical ^{REF14}

Tipo de luminaria	Dirección de la intensidad máxima	Valor máximo de la intensidad luminosa emitida a un ángulo de elevación de 90°	Valor máximo de la intensidad luminosa emitida a un ángulo de elevación de 80°
Cut-off	0 - 65°	10 cd / 1,000 lumen	30 cd / 1,000 lumen
Semi cut-off	0 - 75°	50 cd / 1,000 lumen	100 cd / 1,000 lumen
Non cut-off	0 - 90°	100 cd independientemente del flujo	-

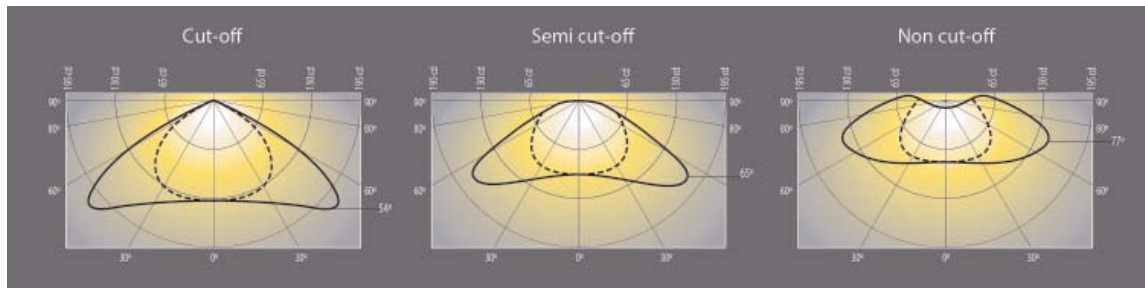
En los siguientes tres ejemplos de curvas fotométricas, se aprecia los diferentes ángulos de intensidad máxima de las luminarias:

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 6.9 Aplicación de curvas fotométricas según su clasificación (Fuente: Holophane)



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.

6.5 Nivel de iluminación

Para verificar la uniformidad de luminancia y el confort visual, debemos saber cual 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 UTILIZACION DEL EQUIPO (Fu), el cual depende de la concepción de sus componentes, de la altura de montaje y del ancho de la calle.

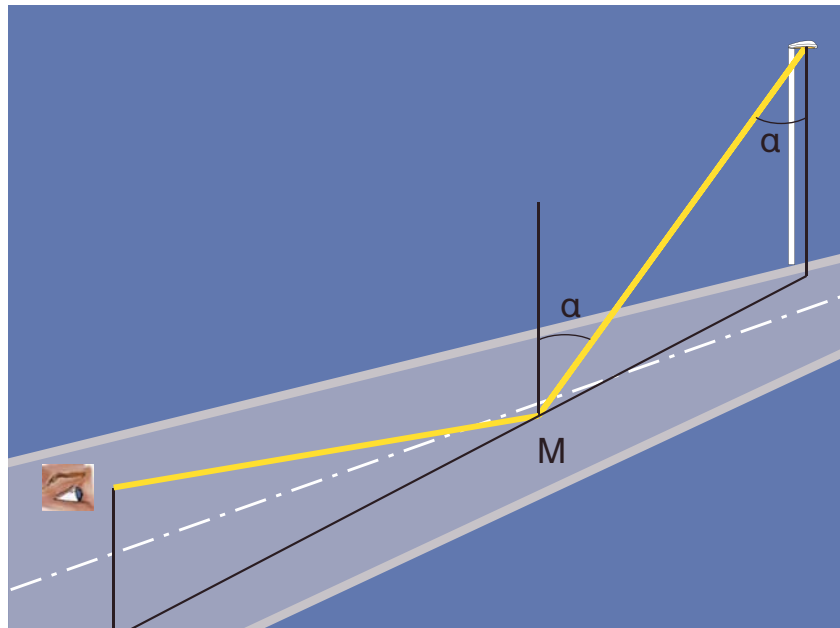
La SCT exige que el factor Fu sea igual o mayor a 0.40, para cualquier tipo de luminarias con la relación:

$$F_u = \frac{\text{Ancho de calle}}{\text{Altura de montaje}} \geq 0.40$$

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 6.10 Nivel de luminancia (Fuente: CIE)



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


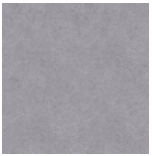

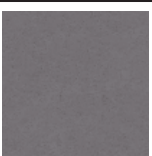

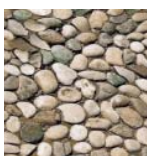
El nivel de luminancia es lo que el ojo capta, por lo que, el cálculo de luminancias es lo que más se asemeja a la sensación de ver.

La CIE^{REF15}, Manual de Alumbrado Vía^{REF16}, 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.

$$\text{Luminancia [cd/m}^2\text{]} = \frac{\text{Nivel de iluminación [lux]}}{R}$$

El factor R, depende de las características ópticas de cada recubrimiento (Tabla 6.4).

Tabla 6.4 Factor R para diferentes tipos de recubrimientos (Fuente: CIE)

	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

El Manual de Alumbrado Vial^{REF17}, 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^{REF18} y el Manual de Alumbrado Vial^{REF19} (Tabla 6.5).

Tabla 6.5 Valores de luminancia promedio para diferentes instalaciones (Fuente: Manual de Alumbrado Vial SCT)

CLASE DE VIA	LUMINANCIA PROMEDIO	TIPO DE LUMINARIA
Vías rápidas	1.5 a 2.5 cd/m ²	Cut-off o Semi cut-off
Alumbrado urbano	1.5 a 2 cd/m ²	Semi cut-off
Glorietas y cruceos peligrosos	1.5 a 2 cd/m ²	Semi cut-off
Puntos singulares fuera de zona alumbrada	0.5 a 1 cd/m ²	Semi cut-off

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.

Tabla 6.6 Factores de envejecimiento de una luminaria

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

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

$$V = V_{la} \times V_{lu}$$

V = Factor de envejecimiento de equipo

V_{la} = Factor de envejecimiento de lámpara

V_{lu} = 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.

6.6 Clasificación de carreteras según la CIE

Los criterios indicados en la Tabla 6.7 indican los valores de intensidades medias diarias de tráfico (IMD) que se deben tomar en cuenta para iluminar una carretera

Tabla 6.7 Valores límites de IMD (intensidad media diaria) recomendados para iluminación (Fuente: CIE)

TABLA 6.7	
Tipo de vía	IMD mínima para iluminar (Vehículos/hora)
Carreteras convencionales	12,000
Periféricos y autopistas	22,000
Intersecciones	4,000
Entronques	7,000

Tabla 6.8 Clasificación de la CIE de los diferentes tipos de carreteras

TABLA 6.8					
Tipo de vía	Tipos de usuarios				Tipo de carretera
	M	S	C	P	
Carreteras de calzadas separadas con cruces a distinto nivel y accesos controlados (autopistas y autovías).	M				A1
Carreteras de calzada única de doble sentido de circulación y accesos limitados (vías rápidas).					
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

M	=	Tráfico motorizado
S	=	Vehículos en movimiento lento
C	=	Ciclistas
P	=	Peatones

Selección de clases de alumbrado

Teniendo las características de la carretera a iluminar y de acuerdo a la clasificación de la tabla (6.8) 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.

Tabla 6.9 Clases de alumbrado para carreteras (Fuente: CIE)

TABLA 6.9		
Carretera tipo:	Tipos 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) <p>* Intensidad de tráfico y complejidad del trazado de carreteras:</p> <p>Alta (IMD) > 25,000 Media (IMD) - Entre 15,000 y 25,000 Baja (IMD) < 15,000</p>	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) <p>* Intensidad de tráfico y complejidad del trazado de la carretera:</p> <p>Alta (IMD) > 15,000 Media y baja (IMD) < 15,000</p>	ME 1 ME 2
A2	<ul style="list-style-type: none"> • Carreteras interurbanas sin separación de aceras o carriles bici. <p>* Intensidad de tráfico y complejidad del trazado de la carretera.</p> <p>* Control de tráfico y separación de los distintos tipos de usuarios</p> <p>* Parámetros específicos</p>	ME 1 ME 2 ME 3a ME 4a
A3	<ul style="list-style-type: none"> • Vías, colectoras y rotondas de circunvalación. • Carreteras interurbanas con accesos no restringidos. <p>*Intensidades de tráfico y complejidad del trazado de la carretera.</p> <p>* Control de tráfico y separación de los distintos tipos de usuario.</p> <p>* Parámetros específicos.</p>	ME 1 ME 2 ME 3b ME 4a ME 4b

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.

Tabla 6.10 Clases de alumbrado SERIE ME. (de acuerdo con la CIE)

Clase de alumbrado serie ME *	Luminancia de la superficie de la calzada en condiciones secas			Deslumbramiento perturbador	Iluminación de alrededores	
	Luminancia media L_m (cd/m^2)	Uniformidad global U_o	Uniformidad longitudinal U_l	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	1.0	0.4	0.7	15	0.5
	b	1.0	0.4	0.6	15	0.5
ME 4	a	0.75	0.4	0.6	15	0.5
	b	0.75	0.4	0.5	15	0.5

* 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.

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 tomarán en cuenta los criterios que se muestran en la Tabla 6.11.

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 realizará de acuerdo al método que aparece descrito en la publicación CIE ^{REF20}, tomando en cuenta las características fotométricas de los pavimentos normalizados al respecto.

Tabla 6.11 Clases de alumbrado SERIE MEW (Fuente: CIE)

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 L_m (cd/m^2)	Uniformidad global U_o	Uniformidad longitudinal U_l^*	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

* 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.

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 aplicarán los criterios de luminancias, uniformidades global y longitudinal, deslumbramiento perturbador y relación entorno, que han sido definidos para las distintas clases de alumbrado. Se tomará 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 CEO. 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 utilizarán los criterios de iluminancia. Esta situación puede ocurrir cuando la distancia de visión sea inferior a los 60 m (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 aplicarán los criterios de iluminación mediante la iluminancia media y su uniformidad, que corresponden a las clases de alumbrado de la serie CE (Tabla 6.12).

Se cumplirá también con las limitaciones de deslumbramiento o de control de la contaminación luminosa, representadas por las clases de intensidades serie G (Tabla 6.13).

Tabla 6.12 Clases de alumbrado SERIE CE (Fuente: CIE)

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

* 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.

Tabla 6.13 Clases de alumbrado SERIE G (Fuente: CIE)

Clases de intensidad	Intensidad máxima (cd-7Klm)**			Otros 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

*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.

Tabla 6.14 Comparativo de niveles de iluminancia y luminancia ^{REF21}

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
CE1	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

6.7 Tipos de carreteras

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

Figura 6.11 Vista en corte transversal de la carretera tipo A1 ^{REF22} con cuerpos separados



Figura 6.12 Vista en planta de la carretera tipo A1 con sistemas de iluminación



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

El Tipo A 1 clasificación CIE corresponde al tipo SCT A 4 (un cuerpo con camellón)

Figura 6.13 Vista en corte transversal de la carretera tipo A4 (un cuerpo con camellón central)

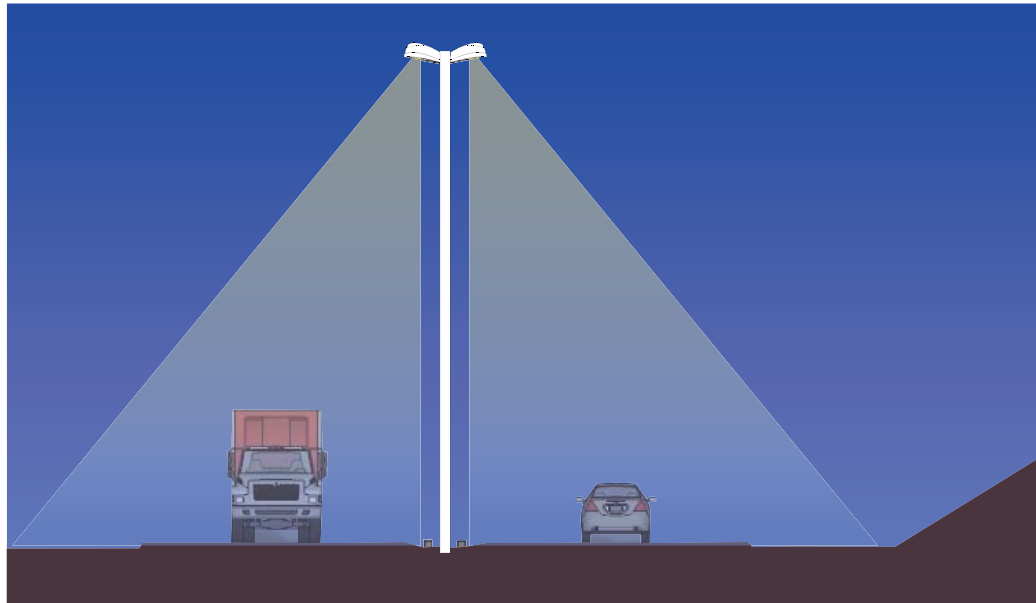
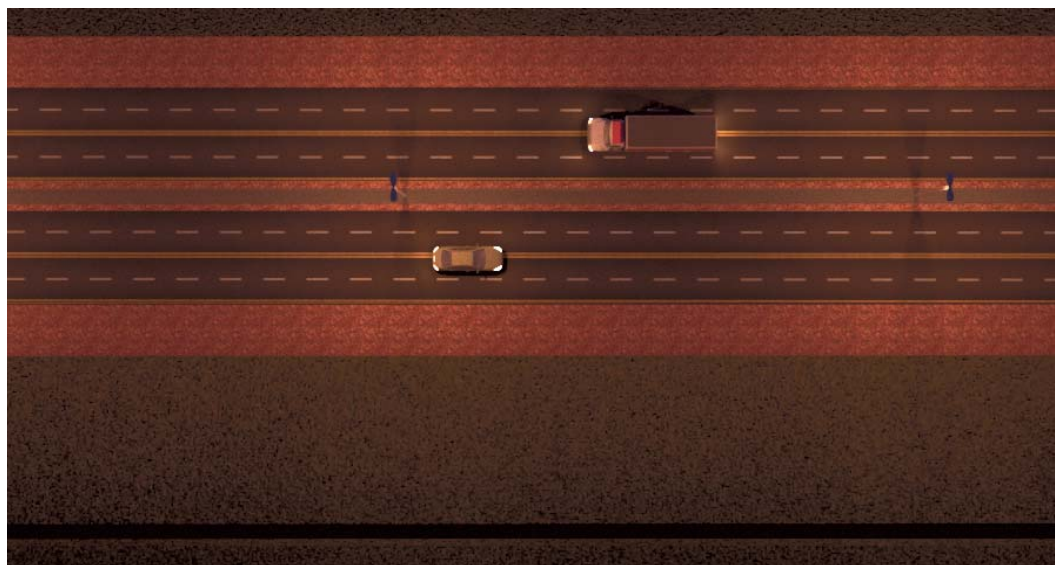


Figura 6.14 Vista en planta de la carretera tipo A4 con sistemas de iluminación.



Cuando el camellón tiene un ancho igual o mayor a 2 m y se encuentra libre de otras instalaciones, se colocará 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 6.15 Perspectiva donde los postes están colocados fuera del acotamiento

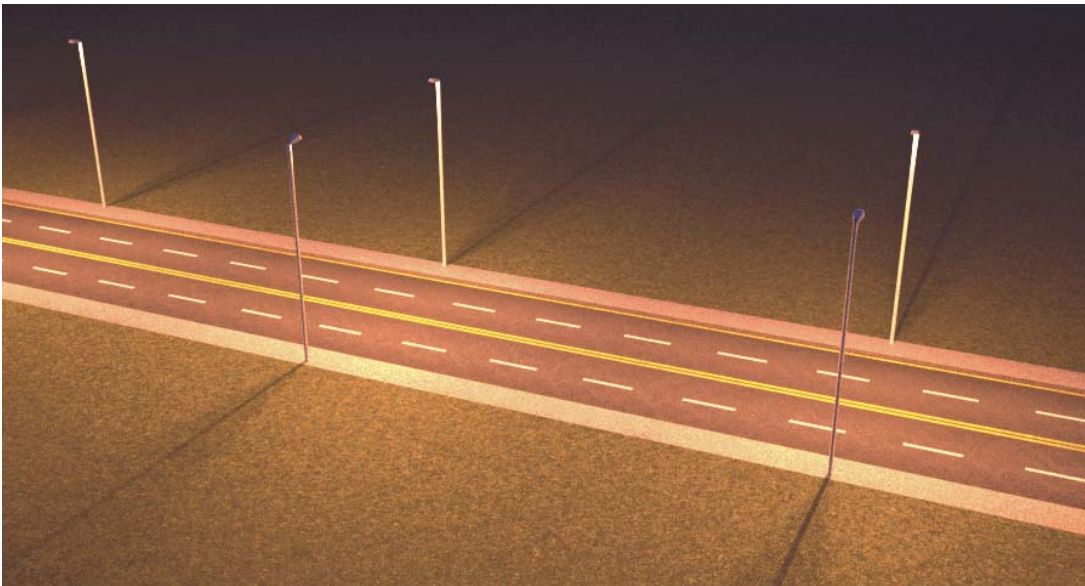
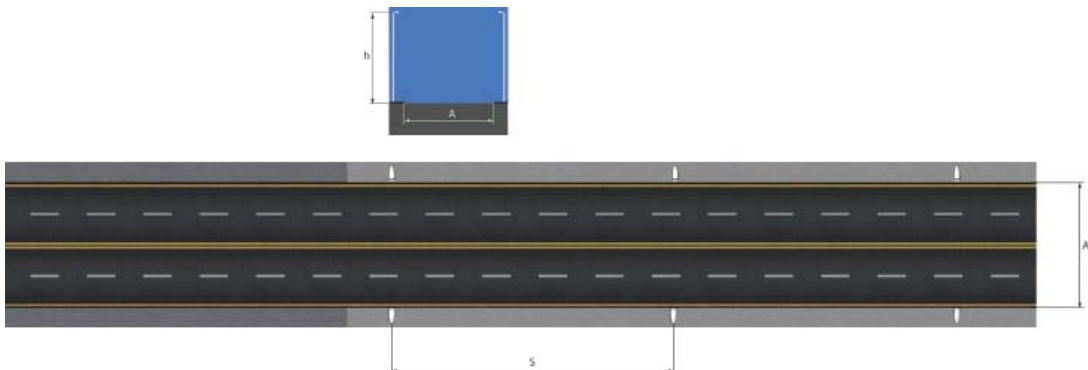


Figura 6.16 Vista de planta



h = Altura de poste

A = Ancho de calzada

S = Distancia interpostal

$A1$ = Ancho de carretera

Tabla 6.15 Tipo de distribución de puntos de cruz en función de la relación (h/A).
(Fuente: CIE)

Disposición	Relación h/A	
	Valor Mínimo	Valor Máximo
Unilateral	0.85	1
Tresbolillo	0.5	0.66
Frente-Frente	0.33	0.5
Axial	0.85	1

Carretera tipo A2 un cuerpo

Los postes de alumbrado serán colocados fuera del acotamiento como se muestra en las Figuras 6.17 y 6.18

Figura 6.17 Vista en corte transversal de la carretera tipo A2

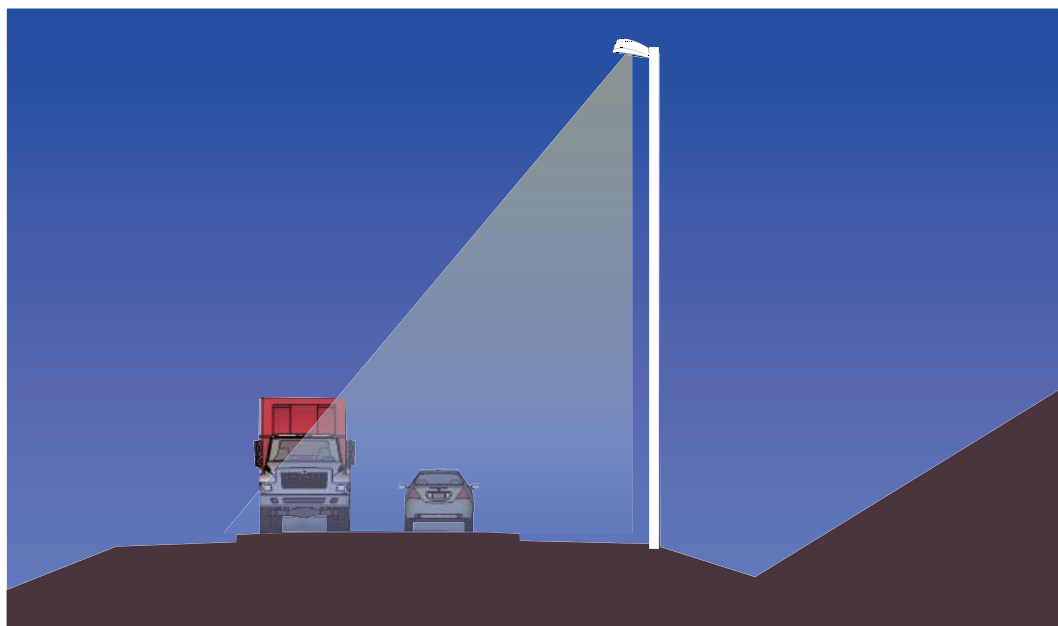
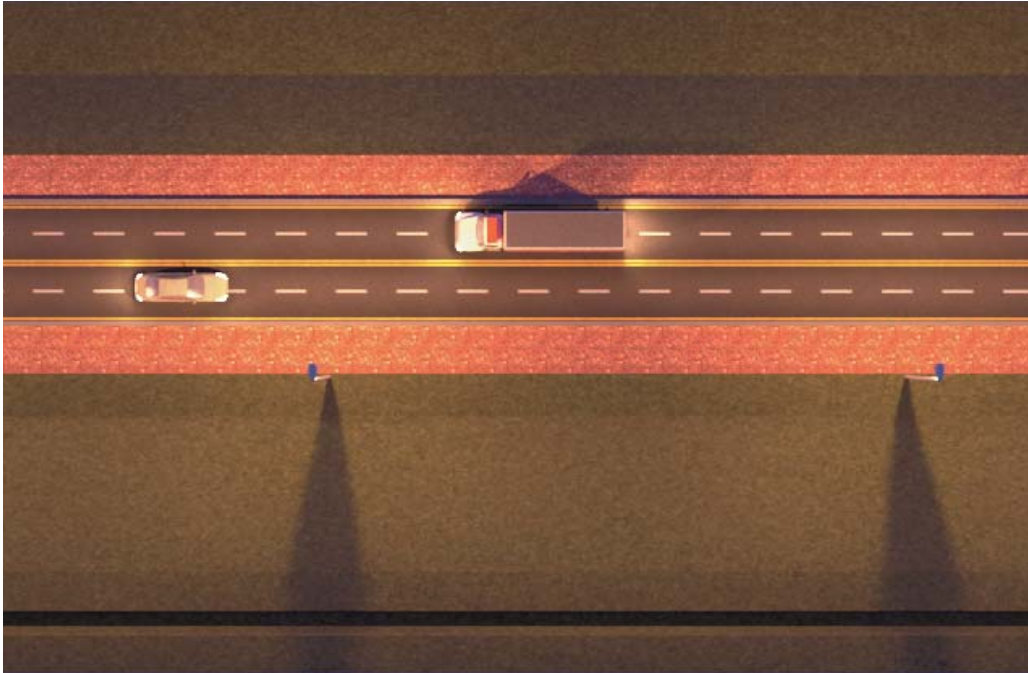


Figura 6.18 Vista en planta de la carretera tipo A2 con sistemas de iluminación

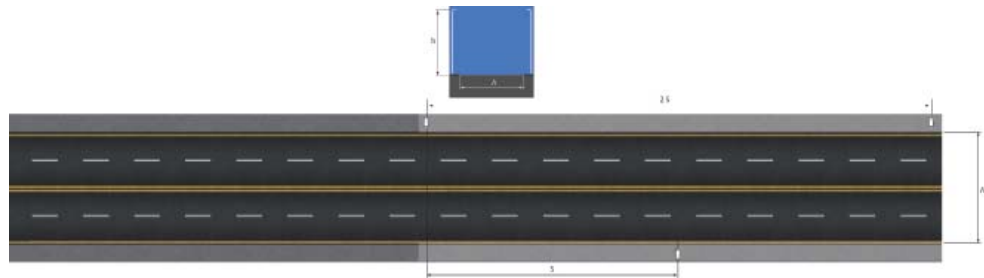


Colocación de postes en "tresbolillo", ésta disposición de postes de alumbrado resulta costosa por la doble instalación que presenta el sistema en carreteras.

Figura 6.19 Perspectiva de instalación denominada "Tresbolillo"



Figura 6.20 Vista de planta



h = Altura de poste

A = Ancho de calzada

S = Distancia interpostal

$A1$ = Ancho de carretera

$2S$ = Distancia Interpostal a tresbolillo

Tabla 6.16 Tipo de distribución de puntos de cruz en función de la reacción (h/A)
(Fuente: CIE)

Disposición	Relación h/A	
	Valor Mínimo	Valor Máximo
Unilateral	0.85	1
Tresbolillo	0.5	0.66
Frente-Frente	0.33	0.5
Axial	0.85	1

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

6.8 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 acondicionará 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.

$$E_{\text{prom}} = \frac{E_1 + E_2 + E_3 + \dots + E_{21}}{21} = [\text{Lux}]$$

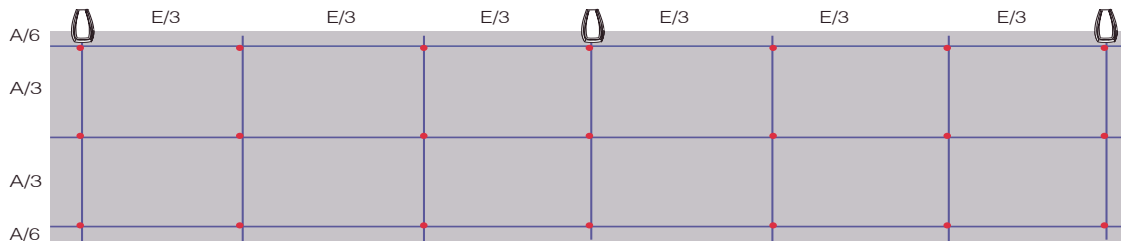
$$\text{Coeficiente de Uniformidad general} = \frac{E_{\text{min}}}{E_{\text{prom}}} \leq 0.50 \text{ min}$$

$$\text{Coeficiente de Uniformidad longitudinal} = \frac{E_{\text{min}}}{E_{\text{max}}} \leq 0.50 \text{ min}$$

[en los tres ejes]

$$\text{Coeficiente de Uniformidad transversal} = \frac{E_{\text{min}}}{E_{\text{max}}} \leq 0.40 \text{ min}$$

Figura 6.21 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)



6.9 Ejemplo de cálculo de iluminación y sistema eléctrico

Tramo de carretera (1 km) tipo 2A

1. Generalidades

Al diseñar un sistema de iluminación se deben de considerar los costos iniciales con los de operación y mantenimiento por ser importantes para las entidades gubernamentales.

El diseño de iluminación de carreteras debe estar constituido con luminarias de máxima eficiencia del tipo cut-off o semi cut-off.

Es prohibitivo el uso de luminarias con sistema óptico a base de refractores, ya que éstos operan como una segunda fuente luminosa causando deslumbramientos, tanto en carreteras como en vías de alta velocidad, las fuentes luminosas deben ser instaladas fuera del ángulo visual del conductor.

La altura de los postes para este tipo de vías debe ser de 12 a 14 metros, para obtener mayores distancias interpostales, siempre y cuando los carriles de circulación tengan un ancho mayor de 7 metros.

2. Memoria de cálculo

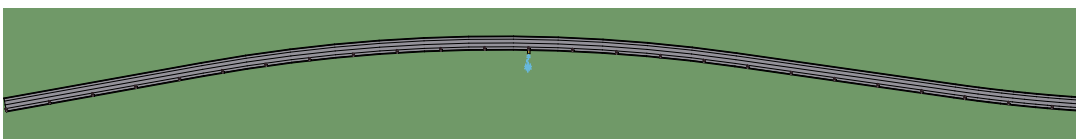
- a) Cálculo de niveles de iluminación
- b) Cálculo de cargas por circuito
- c) Cálculo de la capacidad del transformador
- d) Cálculo de protecciones
- e) Cálculo de calibre de conductores

La ventaja que tiene el utilizar lámparas de VAPOR DE SODIO DE ALTA PRESIÓN en alumbrado público, es que en tiempo de lluvia y niebla se distinguen perfectamente los obstáculos que se encuentran sobre la carpeta asfáltica, es un grave error sustituir estas lámparas por las de ADITIVOS METÁLICOS (Luz Blanca), ya que en algunas avenidas, boulevares y carreteras la visibilidad en los arroyos de circulación con la lluvia y niebla es casi nula, poniendo en riesgo la seguridad de los usuarios.

Figura 6.22 Peatón cruzando una avenida con bajo nivel de iluminación, con lluvia y niebla



Figura 6.23 Nivel de luminancia



En este ejemplo, la instalación eléctrica está formada por 1 circuito por km, conformados cada uno con 25 postes de alumbrado dotados con luminarias de 400 w con lámparas de V.S.A.P.

Para el cálculo de alimentadores se tomó la información de los fabricantes de reactores, el reactor auto regulado de A.F.P. para operar una lámpara de vapor de sodio de alta presión de 400 w, tiene una carga total de 452 w, con un factor de potencia de 0.92 por lo tanto:

$$VA = 452 / 0.92 = 491 \text{ VA}$$

$$I = 491 / 1.73 \times 380v = 0.75 \text{ Amp.}$$

Se diseñó 1 circuito eléctrico por km alimentados por un transformador de 15 KVA 13200 / 380 V Delta-Estrella (fase a neutro 220 V).

Las grandes ventajas del uso de estos transformadores para alumbrado público son:

a).- Eliminación de armónicas de las líneas de energía eléctrica alimentadoras, que perjudican altamente a los equipos de iluminación del tipo de descarga como son; reactores y lámparas de vapor de sodio de alta presión acortando su vida útil.

b).- Mayor longitud de los circuitos eléctricos, con conductores de diámetro menor que los usados en las instalaciones a 220 V, logrando un menor costo en las instalaciones de alumbrado.

c).- Excelente regulación de voltaje a lo largo de los circuitos eléctricos, obteniendo con ello, que los equipos de alumbrado trabajen a su máxima eficiencia.

d).- Que los transformadores son exclusivamente para el funcionamiento del sistema de alumbrado, evitando que los habitantes del lugar se “cuelguen” de las líneas de alimentación para el robo de la energía eléctrica.

Con la aplicación de este tipo de transformadores, se obtiene una máxima calidad, eficiencia y economía reflejada en el costo de las instalaciones, consumo de energía eléctrica y de mantenimiento.

Las instalaciones eléctricas se diseñaron de acuerdo a las Normas NOM-001-SEMP-2004 vigentes y las Normas de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (Manual de Alumbrado Vial).

En el diseño del sistema de iluminación de esta carretera, se tomaron en cuenta los puntos de mayor importancia requeridos para obtener la máxima seguridad y eficiencia para los usuarios:

a).- Evitar el uso de luminarias con refractores, los cuales producen deslumbramiento y la mayor parte del flujo luminoso emitido por las lámparas, se pierde en el espacio.

b).- Colocar las luminarias fuera del acotamiento de la carretera en postes de 12 m de altura fuera del ángulo visual del conductor a una distancia interpostal de 40 m.

c).- Tener el nivel de iluminación que permita observar los posibles obstáculos sobre la carpeta asfáltica, así como tener la visibilidad suficiente en tiempos de lluvia y niebla, utilizando lámparas de vapor de sodio de alta presión de 400 w.

El sistema de alumbrado está conformado con luminarias de alto factor de eficiencia, del tipo "Milenium" que contienen un sistema óptico basado en reflectores interiores, eliminando los tradicionales refractores que ocasionaban fuerte deslumbramiento para los conductores.

NOTA IMPORTANTE: Al seleccionar el tipo de luminaria con la cual se proyectará el sistema de alumbrado, el fabricante de luminarias entregará al proyectista todos los datos fotométricos:

1) CURVAS ISOLux, de cada tipo de luminaria mostrando los niveles de iluminación en lux, tanto transversales como longitudinales a piso de cada una de las alturas de montaje propuestas en el proyecto, indicando el tipo de lámpara utilizada, su potencia en watts y flujo luminoso inicial.

2.- MEMORIA DE CÁLCULO

- a) Cálculo de niveles de iluminación
- b) Cálculo de cargas por circuito
- c) Cálculo de la capacidad del transformador
- d) Cálculo de protecciones
- e) Cálculo de calibre de conductores

a) Cálculo de niveles de iluminación

El cálculo de nivel de iluminación (NI) está relacionado con el tipo de luminaria Milenium seleccionada y su potencia 400 w, así como con la altura de montaje 12 m de las mismas y sus distancias interpostales 40 m, dependientes del ancho de la vialidad 12 m.

Nivel de iluminación en carril central.

NI = Nivel de iluminación promedio.

A = Ancho arroyo = 7m (2.5 m acotamiento + 7.00 m arrollo + 2.5 m) = 12 m.

D = Distancia interpostal = 40 m.

H = Altura de montaje = 12 m.

@= Flujo luminoso de lámpara de 400 w V.S.A.P. = 50,000 lumen

Luminaria tipo MILENUM 400 de 400 w.

R = Coeficiente de reflexión del asfalto = 18

Vla = factor de envejecimiento de lámpara a un año = 0.9

V_{lu} = factor de suciedad de la luminaria a un año = 0.9

F_u = factor de utilización = A / H = al valor en la curva de la luminaria = $12.00/12 = f_u 0.45$

F_m = factor de mantenimiento = $V_{la} \times V_{lu} = 0.81$

Fórmula: $NI = (@ \times F_u \times F_m) / (A \times D) = NI \text{ prom. a un año}$

Nivel de luminancia = $NI / R = [cd / m^2]$

$$NI = 50,000 \times 0.45 \times 0.81 / 12.00 \times 40 = 37.96 \text{ [Lux]}$$

$$NL = 37.96 / 18 = 2.10 \text{ [cd / m}^2 \text{]}$$

b) Cálculo de cargas por circuito

Circuito tipo.- Tiene una longitud de 1 km y está formado por 25 postes metálicos de 12 m. de altura provistos c/u con 1 luminaria tipo "MILENIUM" de 400 w con lámparas de vapor de sodio de alta presión (V.S.A.P.) colocados a una distancia interpostal de 40 m fuera del acotamiento.

Carga total del circuito:

Luminaria con reactor autorregulado de 400 w. (más pérdidas de 52 w).

El circuito esta compuesto de:

$$25 \text{ Postes con 1 luminaria de } 491 \text{ VA} = 491 \text{ VA} \times 25 = 12,282 \text{ VA}$$

c) Cálculo de la capacidad del transformador

El Transformador será de 15 KVA 13200/380 V Delta-Estrella

d) Cálculo de protección

$$\text{La corriente } I = 12,282 / 1.73 \times 380 = 18.66 \text{ Amp.}$$

Aplicando el Factor de Protección de 1.25

$$18.66 \times 1.25 = 23.32 \text{ Amp.}$$

Por lo que la protección será con un contactor trifásico de 3x 30 Amp equipado con fotocelda.

Caída de tensión: Ver Tabla 4.8:

El circuito se divide en 2 ramas ; la primera se encuentra a la izquierda de la acometida alimentando 13 postes de 1 x 400 w. V.S.A.P.

La corriente en esta rama es de :

$$13 \text{ luminarias de } 491 \text{ VA} = 6,383 \quad I = 6,383 / 1.73 \times 380 = 9.697 \text{ Amp.}$$

e) Cálculo de iluminación de conductores

El centro de carga se localiza a 240 m de la acometida, tomando los datos de fábrica de los conductores, el conductor calibre N° 6 THW en sistema trifásico es de:

$$\% \Delta V = \frac{F_c \times L \times I}{10 \times V}$$

$$\% \Delta V = \frac{2.92 \times 240 \times 9.697}{10 \times 380} = 1.78\%$$

La rama derecha alimenta 12 postes de 1 x 400 W. V.S.A.P.

La corriente en esta rama es de:

$$12 \text{ luminarias de } 491 \text{ V.A.} = 5,892 \text{ VA} \quad I = 5,892 / 1.73 \times 380 = 8.96 \text{ Amp.}$$

El centro de carga se localiza a 220 m de la acometida con los conductores calibre N° 6 THW

$$\% \Delta V = \frac{F_c \times L \times I}{10 \times V}$$

$$\% \Delta V = \frac{2.92 \times 220 \times 8.96}{10 \times 380} = 1.514\%$$

donde:

$\% \Delta V$ = Caída de voltaje, expresada en por ciento.

- L = Longitud del conductor (circuito) en metros.
- I = Corriente en el circuito de Amperes.
- V = Voltaje de alimentación en Volts.
- Fc = Factor de caída de tensión unitaria en mili-Volts/Ampers-metro.

El valor 2.4 Milivolts está tomado de la Tabla 4.8

Nota: Se recomienda utilizar conductores de calibre número 6 AWG, por los esfuerzos mecánicos a los que éstos están sujetos al ser instalados, sin correr el riesgo de su ruptura.

6.10 Análisis comparativo de costos

Análisis comparativo de energía eléctrica mensual considerado un km de longitud:

El costo del Kw-h de tarifa de CFE al mes de noviembre de 2012 es de 3 pesos

a) Con 25 luminarias de 400 w de V.S.A.P. a una distancia interpostal de 40 m utilizando transformadores:

1).- TRIFÁSICOS 23,000 o 13,200 / 380 Delta / Estrella (Recomendados por la SCT)

(considerando pérdidas en el reactor de 13% para lámparas de 400 w de V.S.A.P.)

Cálculo de corriente por circuito: $400 \text{ w} \times 1.13 = 452 \text{ w}$, F.P. = 0.92

$VA = 452 / 0.92 = 491 \text{ VA}$ $491 \text{ VA} \times 25 \text{ luminarias} = 12,275 \text{ VA}$ $I = 12,275 / 1.73 \times 380 = 18.67 \text{ Amp}$.

Calibre del conductor igual a 14 AWG.

2).- BIFÁSICOS 23,000 o 13,200 / 220

(considerando pérdidas en el reactor de 13% para lámparas de 400 w de V.S.A.P.)

Cálculo de corriente por circuito: $400 \text{ w} \times 1.13 = 452 \text{ w}$, F.P. = 0.92

$VA = 282.5 / 0.92 = 491 \text{ V A}$ $491 \text{ VA} \times 25 \text{ luminarias} = 12,275 \text{ VA}$ $I = 12,275 / 220 = 55.79 \text{ Amp}$.

Calibre del conductor igual a 6 AWG.

b) Con 29 luminarias de 250 w de V.S.A.P. a una distancia interpostal de 35 m utilizando transformadores:

1).- TRIFÁSICOS 23,000 o 13,200 / 380 Delta / Estrella (Recomendados por la SCT)

(considerando pérdidas en el reactor de 13% para lámparas de 250 w de V.S.A.P.)

Cálculo de corriente por circuito: $250 \text{ w} \times 1.13 = 282.5 \text{ w}$, F.P. = 0.92

$VA = 282.5 / 0.92 = 307 \text{ VA}$ $307 \text{ VA} \times 29 \text{ luminarias} = 8,904 \text{ VA}$ $I = 8,904 / 1.73 \times 380 = 13.54 \text{ Amp}$.

Calibre del conductor igual a 14 AWG.

2).- BIFÁSICOS 23,000 o 13,200 / 220

(considerando pérdidas en el reactor de 13% para lámparas de 250 w de V.S.A.P.)

Cálculo de corriente por circuito: $250 \text{ w} \times 1.13 = 282.5 \text{ w}$, F.P. = 0.92

$VA = 282.5 / 0.92 = 307 \text{ VA}$ $307 \text{ VA} \times 29 \text{ luminarias} = 8,904 \text{ VA}$ $I = 8,904 / 220 = 40.47 \text{ Amp.}$

Calibre del conductor igual a 8 AWG.

Tabla 6.17 Resumen tabla comparativa

CON TRANSFORMADOR TRIFÁSICO 13,200 / 380				
Circuito	Luminaria	V.A.	Corriente	Calibre del conductor (AWG)
1	25	12,275	18.67	14

CON TRANSFORMADOR BIFÁSICO 13,200 / 220				
Circuito	Luminaria	V.A.	Corriente	Calibre del conductor (AWG)
1	25	12,275	55.79	6

Conclusión: Con un sistema bifásico se tienen conductores de mayor calibre, protección con valor de corriente más alta y baja regulación, por lo que se recomienda utilizar sistemas trifásicos para un ahorro económico.

Tabla 6.18 TABLAS COMPARATIVAS DE COSTOS DE OPERACIÓN DE LOS SISTEMAS DE ALUMBRADO UTILIZANDO TRANSFORMADORES CONVENCIONALES CON SECUNDARIO A 380 V CONTRA TRANSFORMADORES CON SECUNDARIO A 220 V

SISTEMA DE ILUMINACION DE 1km DE CARRETERA CON LUMINARIAS DE 400 w V.S.A.P. DISTANCIA INTERPOSTAL 40 m (inst. unilateral) TRANSFORMADOR TRIFASICO 15 KVA DE 23,000 ó 13,200/380 V.								
CIRCUITO	POSTE H = 12 m LUMINARIA 400 w V.S.A.P 491 VA	LAMPARA SONT-PIA PLUS 400 w Lumen 56,500	VOLT AMP	CORRIENTE AMP.	ALIMENTACION CONDUCTOR CALIBRE N°	PROTECCION	CONSUMO Kw-h por mes	COSTO DE ENERGIA MENSUAL
1	25	25	12,275	18.65	4 - 14	3 x 30	4,068	\$ 12,204
El costo del Kw-h tarifa de CFE = \$ 3.00 al mes de noviembre de 2012								
CON TRANSFORMADOR BIFASICO SECUNDARIO 220 V.								
1	25	25	12,275	55.79	2 - 6	2 x 70	4,068	\$ 12,204

Tabla 6.19 TABLAS COMPARATIVAS DE COSTOS DE OPERACIÓN DE LOS SISTEMAS DE ALUMBRADO, UTILIZANDO TRANSFORMADORES CONVENCIONALES CON SECUNDARIO A 380 V CONTRA TRANSFORMADORES CON SECUNDARIO A 220 V

SISTEMA DE ILUMINACION DE 1km DE CARRETERA CON LUMINARIAS DE 250 w V.S.A.P. DISTANCIA INTERPOSTAL 35 m (inst. unilateral) TRANSFORMADOR TRIFÁSICO 15 KVA DE 23,000 ó 13,200/380 V.								
CIRCUITO	POSTE H = 12m LUMINARIA 250 w V.S.A.P 307 VA	LAMPARA MASTER SONT-PIA PLUS 250 W Lumen 33,200	VOLT. AMP	CORRIENTE AMP.	ALIMENTACION CONDUCTOR CALIBRE N°	PROTECCION	CONSUMO Kw-h por mes	COSTO DE ENERGIA MENSUAL
1	29	29	8,904	13.53	4 - 14	3 x 20	2,949.3	\$ 8,847.9
El costo del Kw-h tarifa de C.F.E = \$ 3.00								
CON TRANSFORMADOR BIFÁSICO SECUNDARIO 220 V.								
1	29	29	8,904	40.47	2 - 8	2 x 60	2,949.3	\$ 8,847.9

6.11 Iluminación de puentes

Generalidades

Puente es una estructura integrada a una carretera destinada a salvar obstáculos ya sean naturales o artificiales tales como: ríos, lagos, barrancos, brazos de mar, vías férreas, carreteras, etc.

La infraestructura de un puente está formada por estribos o pilares extremos, pilas o apoyos centrales y los cimientos que forman la base de ambos. La super-estructura consiste en el tablero o parte que soporta directamente las cargas y las armaduras constituidas por vigas, cables, bóvedas y arcos que transmiten las cargas del tablero a las pilas y los estribos. En el diseño estructural, se consideran la velocidad del viento, así como el peso de postes y tuberías para los sistemas de alumbrado.

Iluminación de puentes

Para el diseño de los sistemas de alumbrado de puentes integrados a carreteras provistas con sistemas de iluminación, se deben considerar los "CRITERIOS DE CALIDAD", siendo el nivel de iluminación del puente superior al nivel de iluminación de la carretera a la que está integrado, como medida de seguridad se recomienda que los postes de alumbrado sean colocados en la parte exterior de los barandales o guarniciones metálicas que van en ambos lados del puente, dejando la zona central de circulación libre de obstáculos, logrando con ello dar mayor seguridad a los conductores de automotores, y al mismo tiempo se evita que las luminarias queden fuera del ángulo visual de los usuarios, logrando así mayor confort visual al conductor.

Figura 6.24 Perspectiva de puente carretero

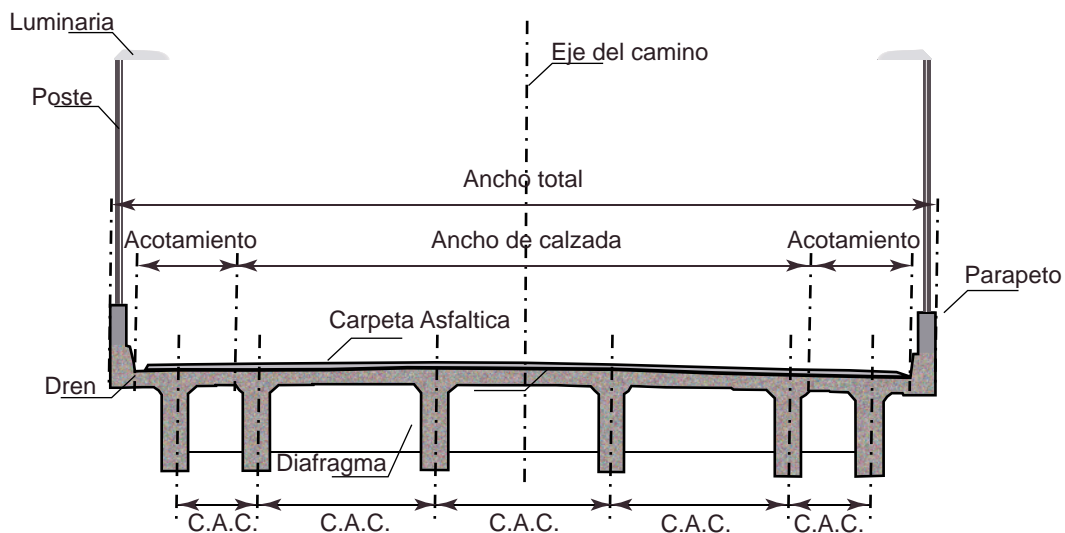


Ejemplo de cálculo de iluminación de un tramo de puente carretero

Cálculo de iluminación promedio sobre los carriles del puente:

Cálculo de iluminación sobre el carril derecho, teniendo en cuenta la ubicación lateral de los postes de alumbrado en el carril izquierdo, se suma el resultado con el carril del lado derecho y se promedia el resultado entre los dos carriles.

Figura 6.25 Corte transversal de puente



Datos:

Altura de Montaje = H = 12 m.

Distancia Interpostal = D = 42 m.

Ancho del Arroyo = A1 = 10 m = A2

@ = Flujo luminoso de lámpara de 400 w de vapor de sodio de alta presión = 48 000 lumen.

Luminaria tipo "A" = Fm (Factor de mantenimiento) = 0.95

FD = Factor de depreciación = 0.95

$$\text{RELACIÓN} = \frac{\text{ANCHO}}{\text{ALTURA}} = \frac{10}{12} = 0.8$$

De la curva Fu para 0.8 corresponde Fu = 0.42

$$E_p = \frac{48\,000 \times 0.42}{10 \times 42} = 48 \text{ lux}$$

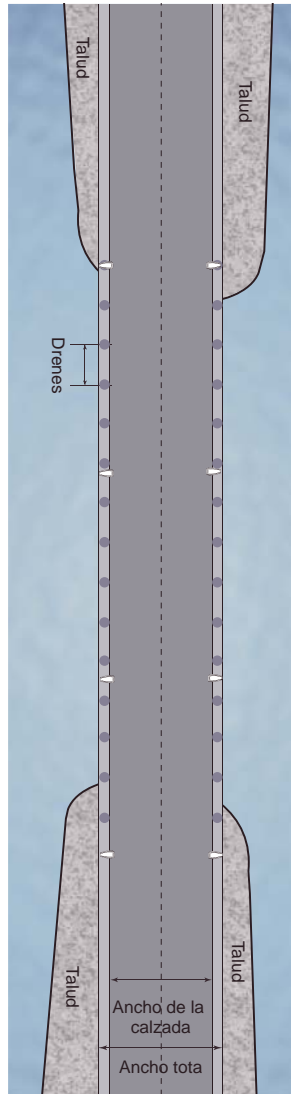
Como Ep del CARRIL DERECHO ES IGUAL A Ep del CARRIL IZQUIERDO, igual a 48 lux

$$E_p \text{ total} = \frac{48 + 48}{2} = 48 \text{ lux}$$

Por lo tanto Eprom a los 10 meses = 48 x 0.95 x 0.95 = 43.3 lux

$$\text{Nivel de luminancia} = \frac{43.2}{16} = 2.7 \text{ cd/m}^2$$

Figura 6.26 Planta de puente



6.12 Aplicación del método de los 21 puntos

Aplicación del método de los 21 puntos para verificar los niveles de luminancia uniforme en los ejes longitudinales y transversales.

Dibujando un tramo de puente y trasladando las Curvas Isolux de la luminaria marca "A" tipo semi cut-off con niveles de iluminación en lux a piso (Fig 6.25), a una altura de montaje de 12 m y una distancia interpostal de 42 m con ajuste focal N° 4 y una inclinación de luminaria de 10 grados arriba de la horizontal, con lámpara de vapor de sodio 400 w de flujo luminoso inicial de 47,000 lumen, se tienen las siguientes lecturas :

A1=84 B1=42 C1=42 D1=84 E1=42 F1=42 G1=84

A2=33 B2=34 C2=34 D2=33 E2=34 F2=34 G2=33

A3=84 B3=42 C3=42 D3=84 E3=42 F3=42 G3=84

$$E_{\text{prom}} = (84+42+42+84+42+42+84+33+34+34+33+34+34+33+84+42+42+84+42+42+84)/21 = 51 \text{ lux}$$

$$\text{Coeficiente de uniformidad general} = \frac{E_{\text{min}}}{E_{\text{prom}}} = \frac{33}{51} = 0.6$$

Coeficiente de uniformidad longitudinal:

$$\text{Coeficiente de uniformidad longitudinal (eje A1)} = \frac{E_{\text{min}}}{E_{\text{max}}} = \frac{42}{84} = 0.5$$

$$\text{Coeficiente de uniformidad longitudinal (eje A2)} = \frac{E_{\text{min}}}{E_{\text{max}}} = \frac{33}{34} = 0.9$$

$$\text{Coeficiente de uniformidad longitudinal (eje A3)} = \frac{E_{\text{min}}}{E_{\text{max}}} = \frac{42}{84} = 0.5$$

Coeficiente de uniformidad transversal:

$$\text{Coeficiente de uniformidad transversal (eje B1)} = \frac{E_{\text{min}}}{E_{\text{max}}} = \frac{34}{42} = 0.8$$

$$\text{Coeficiente de uniformidad transversal (eje C1)} = \frac{E_{\text{min}}}{E_{\text{max}}} = \frac{34}{42} = 0.8$$

$$\text{Coeficiente de uniformidad transversal (eje D1)} = \frac{E_{\text{min}}}{E_{\text{max}}} = \frac{33}{84} = 0.39$$

Niveles de iluminación a piso en lux sobre los carriles de alta velocidad del puente

En el plano del proyecto se sobreponen las curvas Isolux para H=12 m de la luminaria A Tipo semi cut-off (Fig 6.23) y traslapándose una con otra como se indica en la Fig 6.25.

Figura 6.27 Curva Isolux para una altura de montaje $H=12$ m. Niveles de iluminación a piso en lux

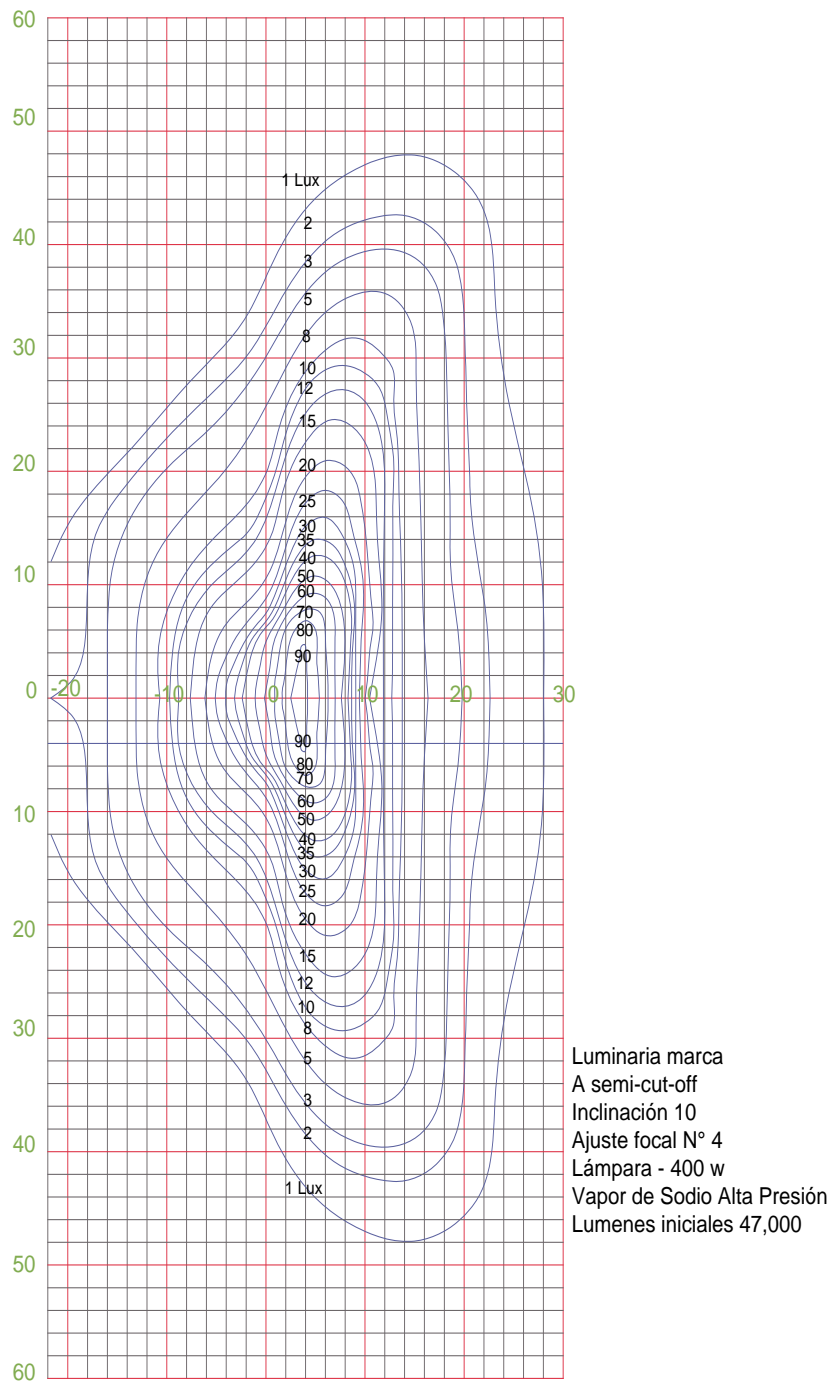
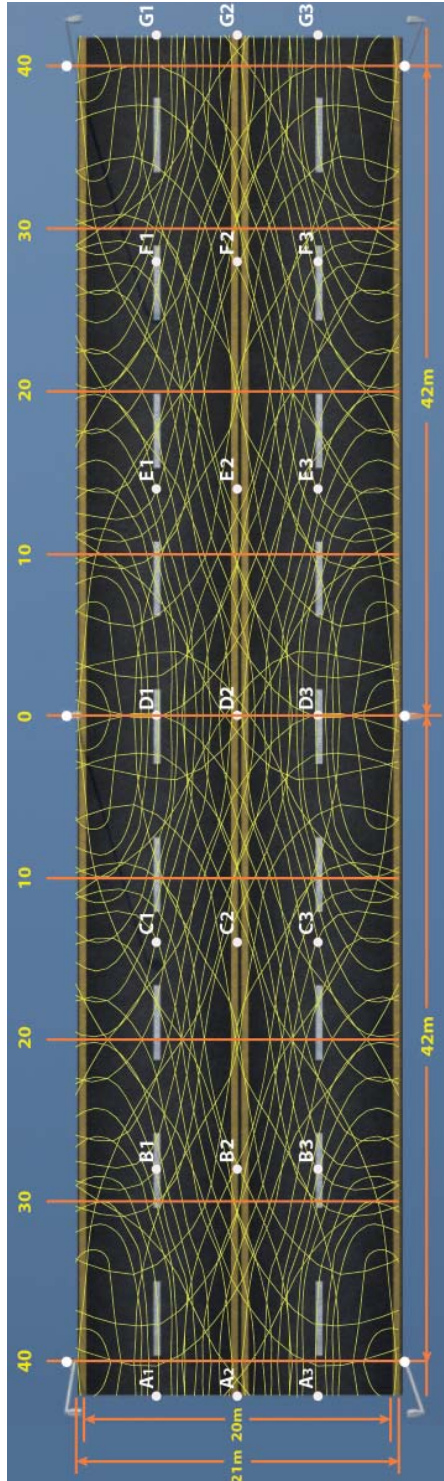


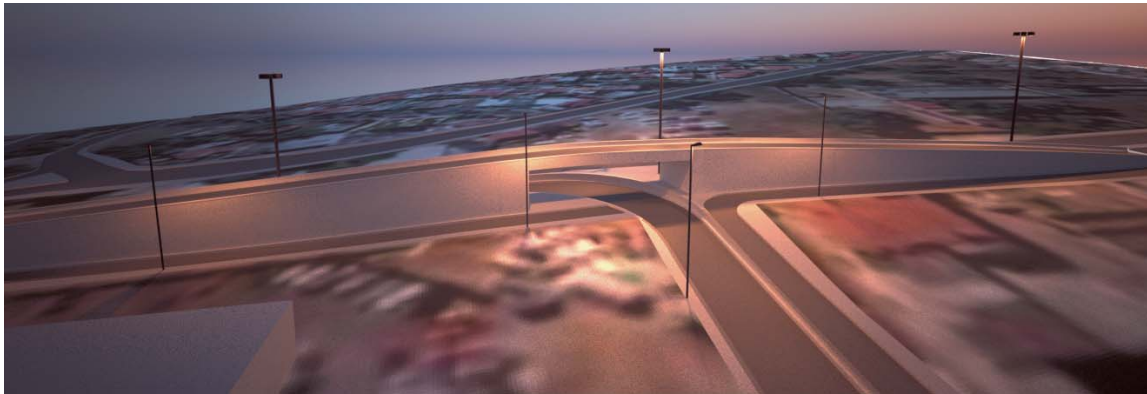
Figura 6.28 Traslape de curvas isolux de H=12 m Niveles horizontales sobre piso en lux



6.13 Entronques carreteros

Entronque PSV (Paso superior vehicular)

Figura 6.29 Iluminación en entronque PSV



En el diseño del sistema de iluminación de los entronques carreteros, es de suma importancia evitar al máximo la colocación de postes de alumbrado sobre los carriles de los pasos superiores, para dar mayor seguridad al conductor y dejar libres de obstáculos los carriles de circulación, para ello, se utilizarán postes de 20 m de altura equipados con coronas de 6 luminarias tipo Cut-off, colocados como se muestran en las figuras.

En los entronques diseñados con tres niveles de pasos superiores, se pondrán postes de 25 a 30 m de altura, de forma que el flujo luminoso emitido por las lámparas sea dirigido hacia los arroyos de circulación de dichos puentes, siempre evitando el uso de proyectores de alta potencia, cuyo flujo luminoso se pierde en gran porcentaje en el espacio, además de causar graves deslumbramientos a los conductores que circulan en la zona.

En las gazas, donde no alcanza el flujo luminoso de los postes de 20 m, se colocarán fuera del acotamiento de las mismas, postes de 9 a 12 m de altura con distancias interpostales según el caso, siempre evitando el efecto de escalera (manchas brillantes, alternadas con manchas oscuras).

Los niveles de iluminación promedio recomendados por la CIE, en este tipo de entronques sobre los carriles superiores serán de 40 a 50 lux; en las gazas serán de 20 a 30 lux de iluminación promedio, se utilizarán lámparas de vapor de sodio de alta presión, (las lámparas de aditivos metálicos, no son recomendadas en vías de alta circulación, por la inseguridad que causan en tiempos de lluvia y niebla por la nula visibilidad sobre el pavimento).

Figura 6.30 Peatón cruzando una avenida con bajos niveles de iluminación en lluvia y niebla



Entronque PIV (Paso Inferior Vehicular)

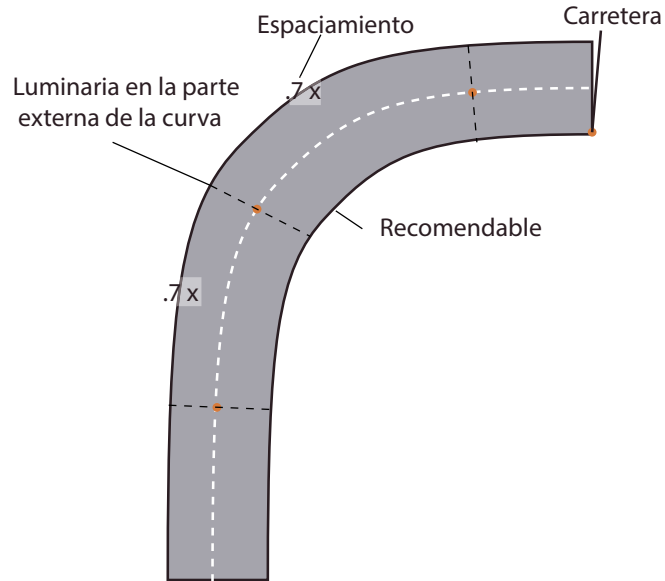
Figura 6.31 Iluminación en entronque PIV



Un paso inferior vehicular es aquel que cruza por debajo de otra vía considerada de mayor afluencia vehicular

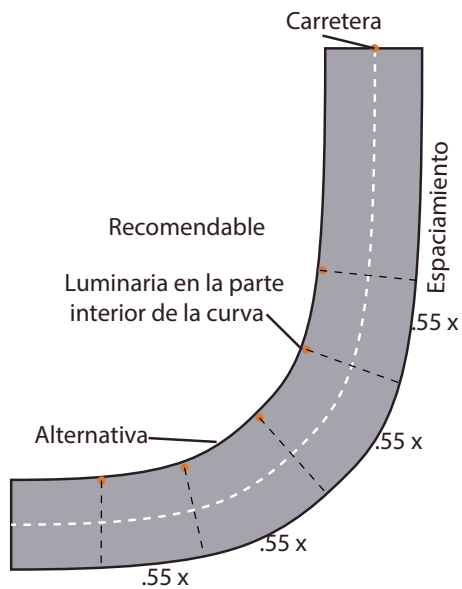
Los niveles de iluminación promedio deben ser de 40 a 50 luxes en el entronque, ya que en él se derivan las diferentes direcciones de carreteras, por lo que los conductores deben tener la máxima visibilidad en sus accesos.

Figura 6.32 Diagrama_A (Fuente: Recomendaciones para la iluminación de carreteras y túneles. Gobierno de España)



X = Interdistancia

Figura 6.33 Diagrama_B (Fuente: Recomendaciones para la iluminación de carreteras y túneles. Gobierno de España)



6.14 Iluminación en boulevard

Los boulevares como los corredores industriales son de máxima importancia en el desarrollo comercial e industrial de los Estados, siendo los sistemas de iluminación los que proporcionan la seguridad y el atractivo turístico en ellos, por estar colocados en las entradas de las ciudades en desarrollo.

De acuerdo a la fisonomía de cada boulevard se deben estudiar detenidamente los sistemas de iluminación, para evitar el sembrado excesivo de postes de alumbrado, lo que causa contaminación visual y elevados costos de instalación y mantenimiento.

En la siguiente figura se muestra un ejemplo.

Figura 6.34 Perspectiva de sección de boulevard iluminado con equipos Semicut-off

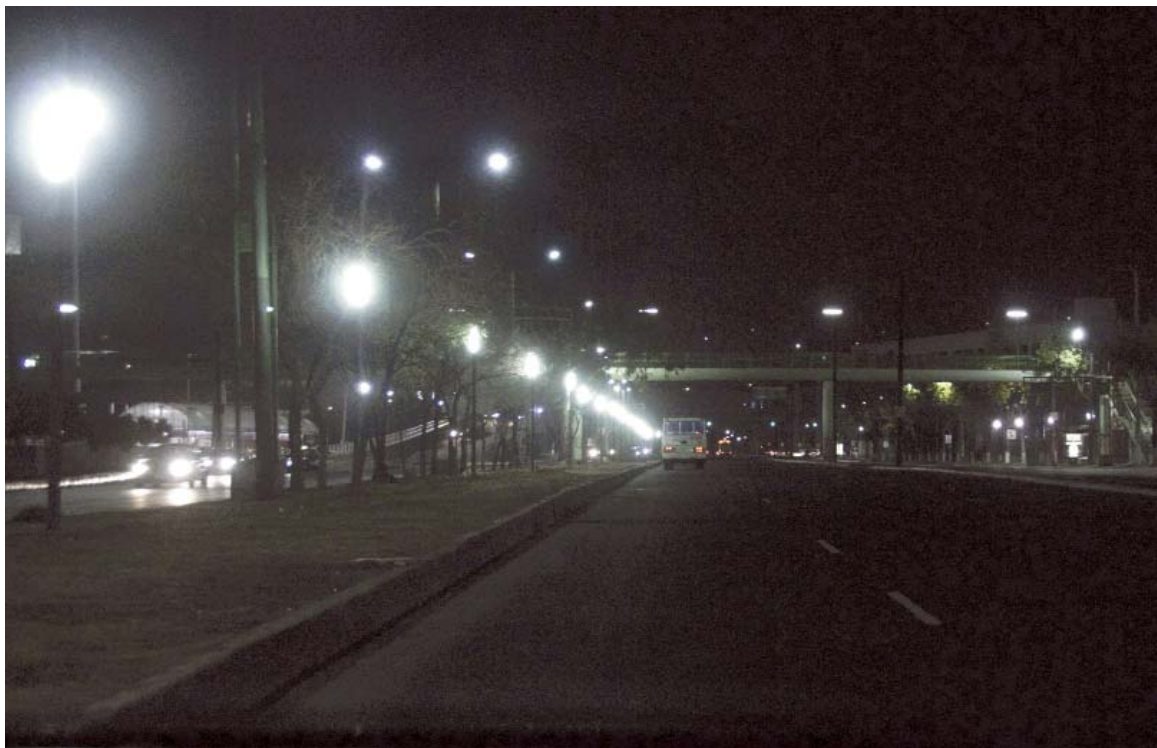


Figura 6.35 Vista en planta



Los boulevares que se encuentran en el interior de las ciudades, así como sus avenidas principales, no deben abusar de instalaciones costosas e ineficientes, en las que los consumos de energía no se justifican, así como el frecuente mantenimiento.

Figura 6.36 Ejemplo de instalación excesiva e ineficiente



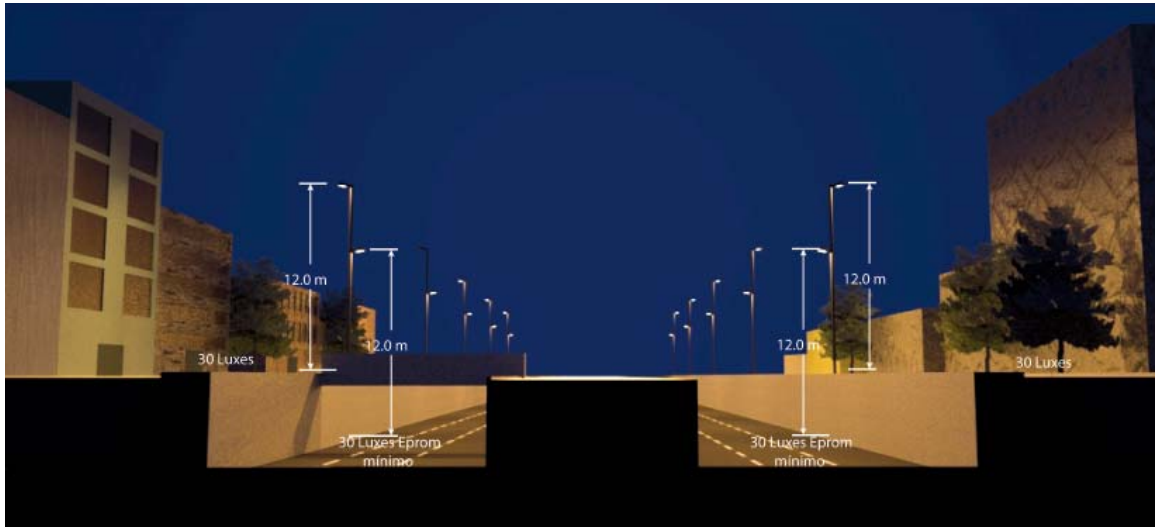
6.15 Iluminación en viaducto

La iluminación en viaductos se considera como iluminación de vías rápidas, por lo que la SCT recomienda el uso de luminarias tipo Semi cut-off equipadas con lámparas de Vapor de Sodio de Alta Presión de 250 o 400 w con alturas de montaje de 12 m como se muestra en las figuras 6.37 y 6.38 (dependiendo de la profundidad del arroyo de circulación inferior).

Figura 6.37 Perspectiva de viaducto, nivel de luminancia de 1.5 a 2 cd/m²



Figura 6.38 Corte tipo viaducto



6.16 Iluminación en zonas urbanas

Como se ha mencionado en los capítulos anteriores, la iluminación en estas zonas debe proporcionar al peatón y automovilista seguridad y confort visual, teniendo en cuenta el aspecto de alumbrado tanto en banquetas como en los carriles de circulación.

Se recomienda, que las luminarias no produzcan deslumbramiento ni a los peatones ni a los automovilistas y que se evite el deslumbramiento en las fachadas de casas y edificios habitacionales, como se indica en la siguiente figura.

Figura 6.39 Foto representativa



Los niveles de iluminación promedio están indicadas en la tabla 6.14 del capítulo 6.

Ubicación de postes de alumbrado

Ubicación de postes de alumbrado en los diferentes tipos de vialidades urbanas.

Altura de postes recomendada de 9 a 12 m, dependiendo del ancho de la vialidad, con luminarias semi cut-off.

Figura 6.40 Ubicación de postes de alumbrado en una vialidad tipo "T" (Fuente: Recomendaciones para la iluminación de carreteras y túneles. Gobierno de España)



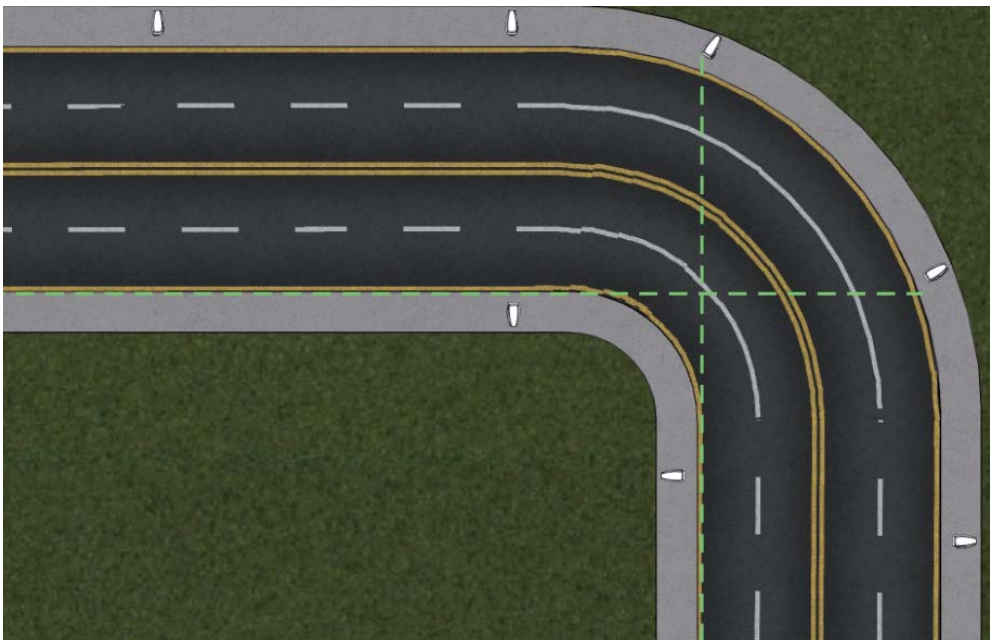
Figura 6.41 Ubicación de postes de alumbrado en crucero (Fuente: Recomendaciones para la iluminación de carreteras y túneles. Gobierno de España)



Figura 6.42 Ubicación de postes de alumbrado en glorieta (Fuente: Recomendaciones para la iluminación de carreteras y túneles. Gobierno de España)



Figura 5.43 Ubicación de postes de alumbrado en curva (Fuente: Recomendaciones para la iluminación de carreteras y túneles. Gobierno de España)



6.17 Recomendaciones de poda de árboles

Recomendaciones de poda de árboles para obtener eficiencia en el sistema de iluminación.

Figura 6.44 Distancia y altura de luminarias respecto a los árboles (Fuente: Recomendaciones para la iluminación de carreteras y túneles. Gobierno de España)

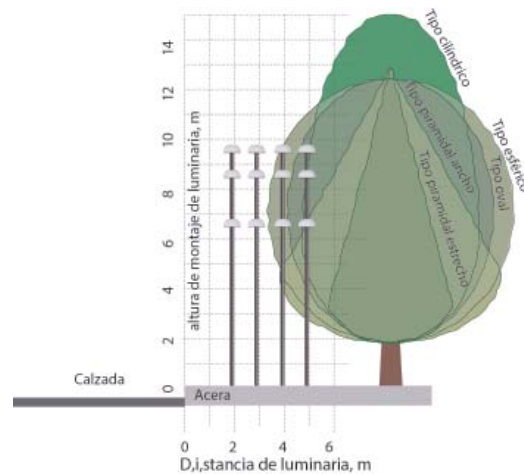


Figura 6.45 Distancia y altura de luminarias respecto a los árboles (planta) (Fuente: Recomendaciones para la iluminación de carreteras y túneles. Gobierno de España)

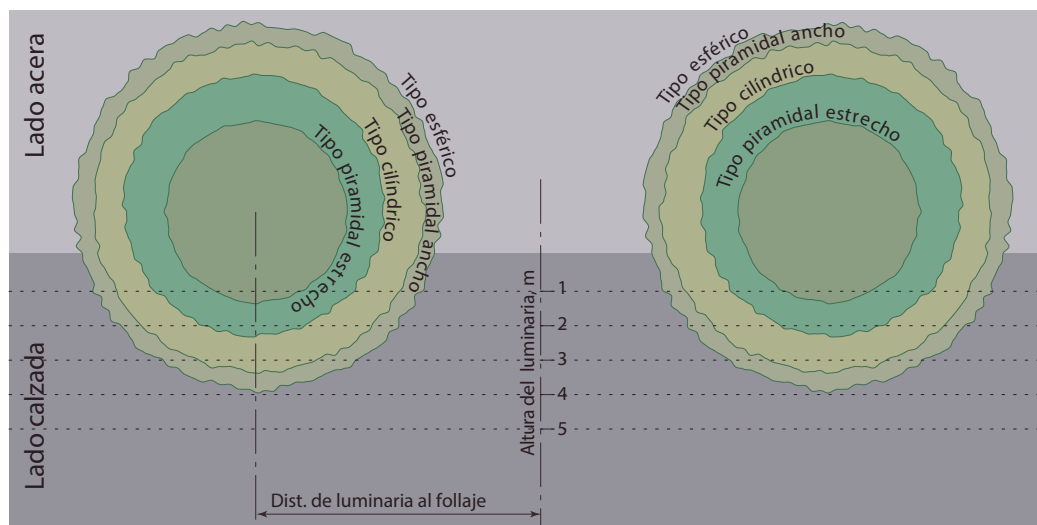
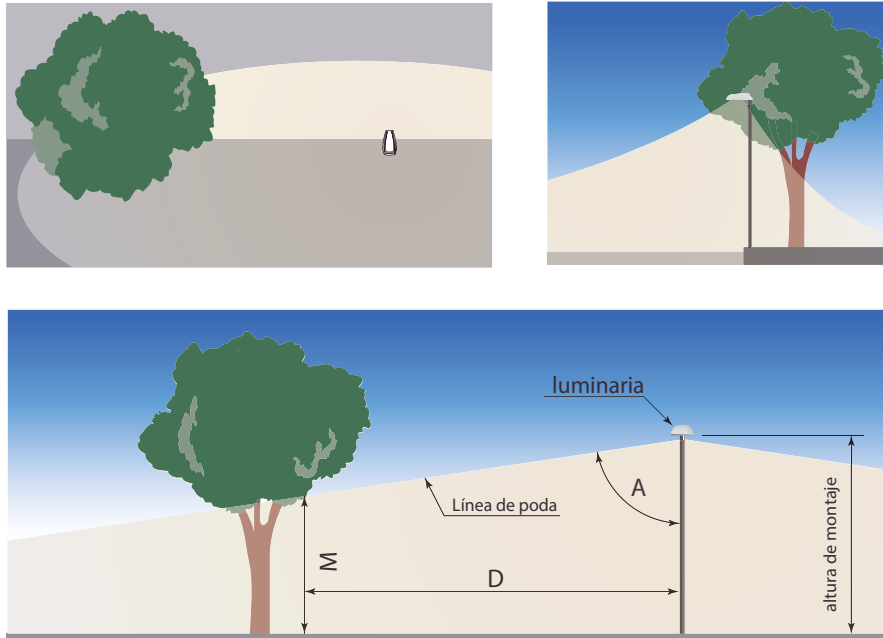


Figura 6.46 Ángulo de poda (Fuente: Recomendaciones para la iluminación de carreteras y túneles. Gobierno de España)



Ángulo de línea de poda "A"	Altura de montaje "H"	Altura de poda del árbol
70°	9.10 m	$M = 0.36 D$
75°	12 m	$M = 0.26 D$
80°	16 m	$M = 0.17 D$

6.18 Análisis de costos de operación y mantenimiento

Análisis de costos de operación y mantenimiento de sistemas de alumbrado.

Los costos de operación y mantenimiento dependen de varios factores:

1).- De la calidad del proyecto de la instalación eléctrica, en el que se tomará en cuenta el estado climatológico de la zona, para determinar la especificación de los materiales y equipos de alumbrado a instalar.

2).- De la regulación de voltaje de las líneas alimentadoras de energía eléctrica de la zona.

- 3).- Del tipo de transformador que alimentará el sistema eléctrico.
- 4).- De la ejecución de la obra eléctrica de acuerdo a las especificaciones de los materiales indicados en el proyecto.
- 5).- De la estricta supervisión de la ejecución de la obra.

Análisis comparativo de costos de energía eléctrica mensual por km.

Con 25 luminarias de 400 w de V.S.A.P.

A una distancia interpostal de 40 m utilizando transformadores:

1).- TRIFÁSICOS 23,000 o 13,200 / 380 Delta / Estrella (recomendados por la SCT)

(considerando pérdidas en el reactor de 16% para lámparas de 400 w de V.S.A.P.)

Cálculo de corriente por circuito: $400 \text{ w} \times 1.16 = 464 \text{ w}$ F.P. = 0.92

$VA = 464 / 0.92 = 504 \text{ VA}$ $504 \times 25 = 12,600 \text{ VA}$ $I = 12,600 / 1.73 \times 380 = 19.17 \text{ Amp.}$

$w = 19.17 \times 220 = 4,217.40$ $w = 4,217 \text{ Kw}$ COSTO DE Kw-h = \$ 3.00

Consumo diario de 12 horas = $4,217 \text{ Kw} \times 12 \times 3.00 = \$ 151.83$ al mes = \$ 4,554.79

COSTO DE CONSUMO ANUAL DE ENERGÍA ELÉCTRICA = \$ 54,657.50

2).- BIFÁSICOS 23,000 o 13,200 / 220

(considerando pérdidas en el reactor de 16% para lámparas de 400 w de V.S.A.P.)

Cálculo de corriente por circuito: $400 \text{ w} \times 1.16 = 464 \text{ w}$ F.P. = 0.92

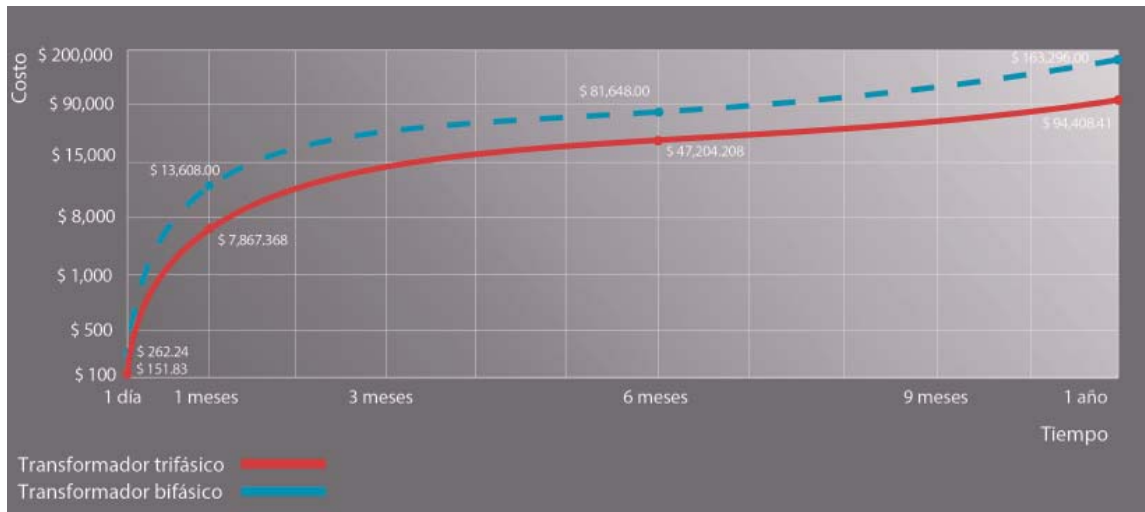
$VA = 464 / 0.92 = 504 \text{ VA}$ $504 \times 25 = 12,600 \text{ VA}$ $I = 12,600 / 220 = 57.27 \text{ Amp.}$

$w = 57.27 \times 220 = 12,599.4$ $w = 12.6 \text{ Kw}$ COSTO DE Kw-h = \$ 3.00

Consumo diario de 12 horas = $12.6 \text{ Kw} \times 12 \times 3.00 = \$ 453.60$ Al mes = \$ 13,608.00

COSTO DE CONSUMO ANUAL = \$ 163,296.00

Figura 6.47 Gráfica comparativa de transformador bifásico vs. trifásico



Con 29 luminarias de 250 w de V.S.A.P.

Con luminarias de 250 w de V.S.A.P a una distancia interpostal de 35 m utilizando transformadores:

1).- TRIFÁSICOS 23,000 o 13,200 / 380 Delta / Estrella (recomendados por la SCT)

(considerando pérdidas en el reactor de 16% para lámparas de 250 w de V.S.A.P.)

Cálculo de corriente por circuito: $250 \text{ w} \times 1.16 = 290 \text{ w}$ F.P. = 0.92

$VA = 290 / 0.92 = 315 \text{ VA}$ $315 \times 29 = 9,135 \text{ VA}$ $I = 9,135 / 1.73 \times 380 = 13.90 \text{ Amp.}$

$w = 13.90 \times 380 = 5,282 \text{ w} = 5.282 \text{ Kw}$ COSTO DE Kw-h = \$ 3.00

Consumo diario de 12 horas = $5.282 \text{ Kw} \times 12 \times 3.00 = \$ 190.152$ al mes = \$ 5,704.56

COSTO ANUAL DE ENERGÍA ELÉCTRICA = \$ 68,454.72

2).- BIFÁSICOS 23,000 ó 13,200 / 220

(considerando pérdidas en el reactor de 16% para lámparas de 250 w de V.S.A.P.)

Cálculo de corriente por circuito: $250 \text{ w} \times 1.16 = 290 \text{ w}$ F.P. = 0.92

$VA = 290 / 0.92 = 315 \text{ VA}$ $315 \times 29 = 9,135 \text{ VA}$ $I = 9,135 / 220 = 41.52 \text{ Amp.}$

$w = 41.52 \times 220 = 9134.4 \text{ w} = 9.13 \text{ Kw}$ COSTO DE Kw-h = \$ 3.00

Consumo diario de 12 horas = $9.13 \text{ Kw} \times 12 \times 3.00 = \$ 328.68$ al mes = $\$ 9,860.40$

COSTO ANUAL DE ENERGÍA ELÉCTRICA = $\$ 118,324.80$

Figura 6.48 Gráfica comparativa

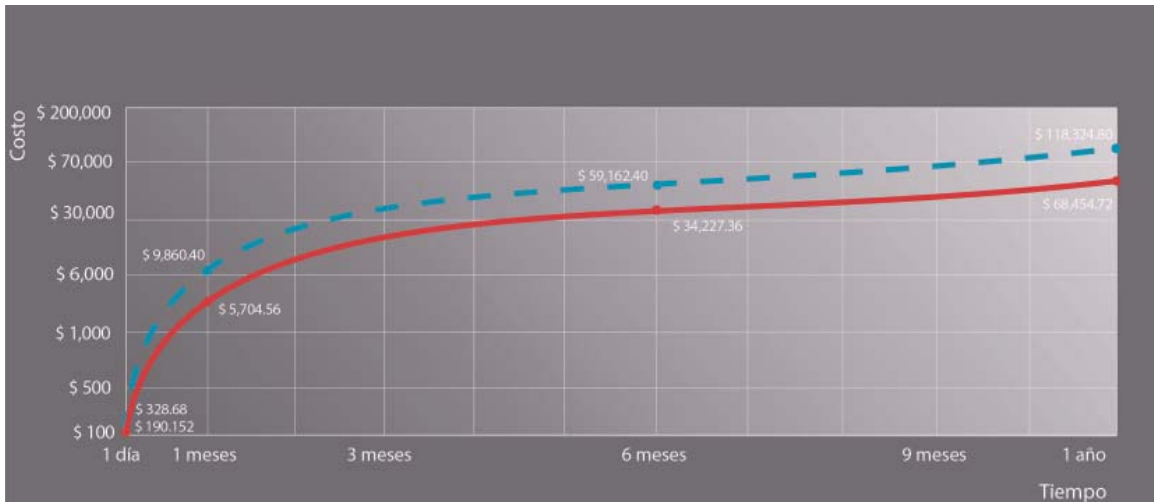


Tabla 6.20 Tablas comparativas de costos de operación y mantenimiento de los sistemas de alumbrado utilizando transformadores convencionales con secundario a 3800 V. Con transformadores con secundario a 220 V

Ejemplo: El costo de Kw-h tarifa de CFE al mes de noviembre de 2009 = $\$1,726.00$

SISTEMA DE ILUMINACIÓN DE 1 km DE CARRETERA CON LUMINARIAS DE 400 w V.S.A.P. DISTANCIA INTERPOSTAL 40 m (ints. unilateral) TRANSFORMADOR TRIFÁSICO 15 KVA DE 23,000 o 13,200/380 V. NIVEL DE ILUMINACIÓN PROMEDIO 43 lux								
CON TRANSFORMADOR TRIFÁSICO 15 KVA DE 23,000 o 13,200/380 V								
DURACIÓN DE VIDA ÚTIL DE LÁMPARA 22,000 horas								
CIRCUITO	POSTE H=12 m LUMINARIA 400 w V.S.A.P. 504VA	LÁMPARA SONT-PIA PLUS 400 w Lumen 56,500	VOLT. AMP.	CORRIENTE AMP.	ALIMENTACIÓN CONDUCTOR CALIBRE N°	PROTECCIÓN	CONSUMO Kw-h por mes	COSTO ENERGÍA ANUAL
1	25	25	12,600	19.17	4-6	3 X 30	2,622.46	\$54,280.80
Costo de 2 años de consumo de energía Vapor de Sodio A. P. 400 w								
NI prom. = 43 lux \$108,561.60 (cambio de 25 lámparas cada 5 años)								
TOTAL = \$ 108,561.60								

Figura 6.49 Eficiencia de lámpara de 400 w (Fuente: Phillips, catálogo 2008)

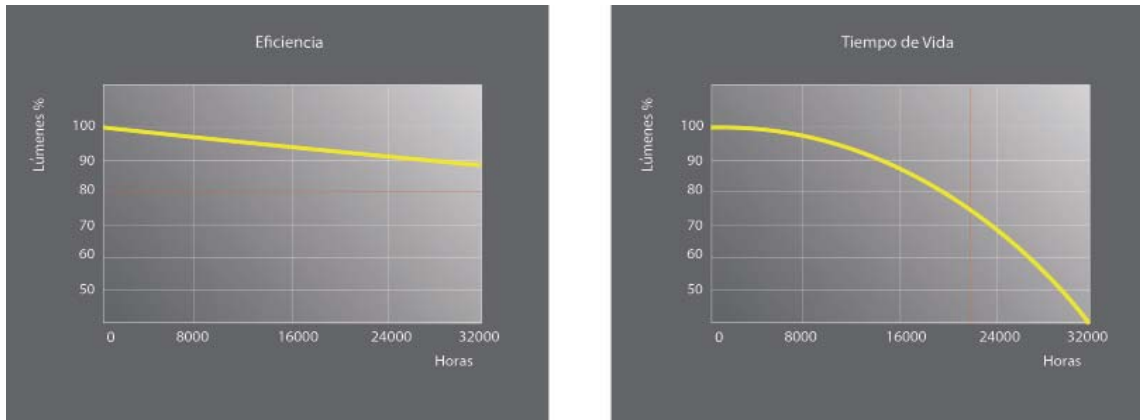


Tabla 6.21 Comparativa de costos de operación y mantenimiento de los sistemas de alumbrado utilizando transformador bifásico con secundario a 220 V

CON TRANSFORMADOR BIFÁSICO SECUNDARIO 220 V								
DURACIÓN DE VIDA ÚTIL DE LÁMPARA 17,600 horas								
1	25	25	12,600	57.27	2-0	3 X 75	4,535.78	\$93,949.20
Costo de 2 años de consumo de energía vapor de sodio A. P. 400 w								
NI prom. = 43 lux \$187, 898.40 (cambio de 25 lámparas cada 3.5 años)								
TOTAL = \$187,898.40								

Figura 6.50 Eficiencia de lámpara de 250 w (Fuente: Phillips, catálogo 2008)

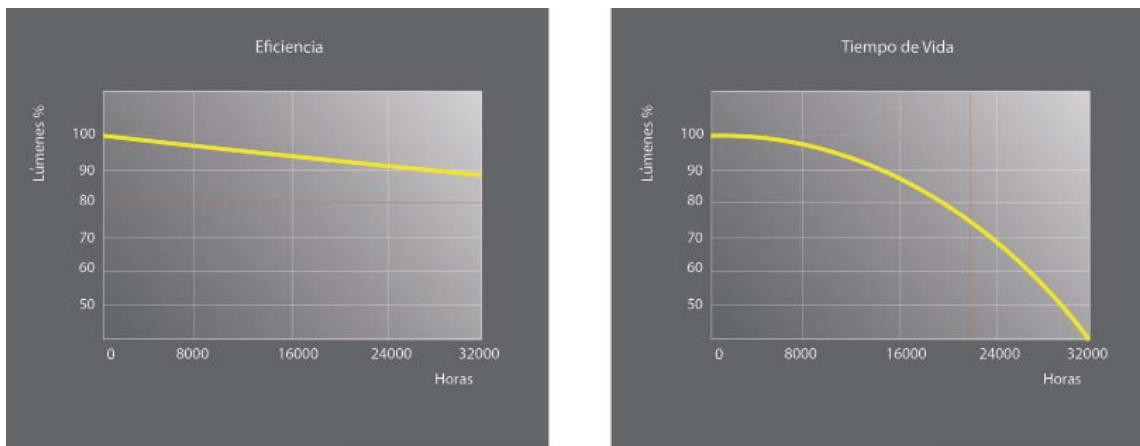


Tabla 6.22 Comparativa de costos de operación y mantenimiento de los sistemas de alumbrado utilizando transformados bifásico con secundario a 220 V

Sistema de iluminación de 1 km de carretera con luminarias de 400 w aditivos metálicos, distancia interpostal 40 m (inst. unilateral). nivel de iluminación promedio 26 lux								
CON TRANSFORMADOR TRIFÁSICO 15 KVA DE 23,000 o 13,200/380 V								
DURACIÓN DE VIDA ÚTIL DE LÁMPARA 8,000 horas								
CIRCUITO	POSTE H=12m LUMINARIA 400 w ADITIVOS	LÁMPARA HQI-E 400 w	VOLT. AMP.	CORRIENTE AMP.	ALIMENTACIÓN CONDUCTOR CALIBRE N	PROTECCIÓN	CONSUMO Kw-h por mes	COSTO ENERGÍA ANUAL
1	25	25	12,600	19.17	4-6	3 X 30	2,622.46	\$54,280.80
Costo de 2 años de consumo de energía aditivos metálicos 400 W (luz blanca)								
NI prom. = 26 lux \$108,561.60 (cambio de 25 lámparas cada 2 años)								
TOTAL = \$ 133,861.60								

Figura 6.51 Eficiencia de lámpara de 400 w (Fuente: Phillips, catálogo 2008)

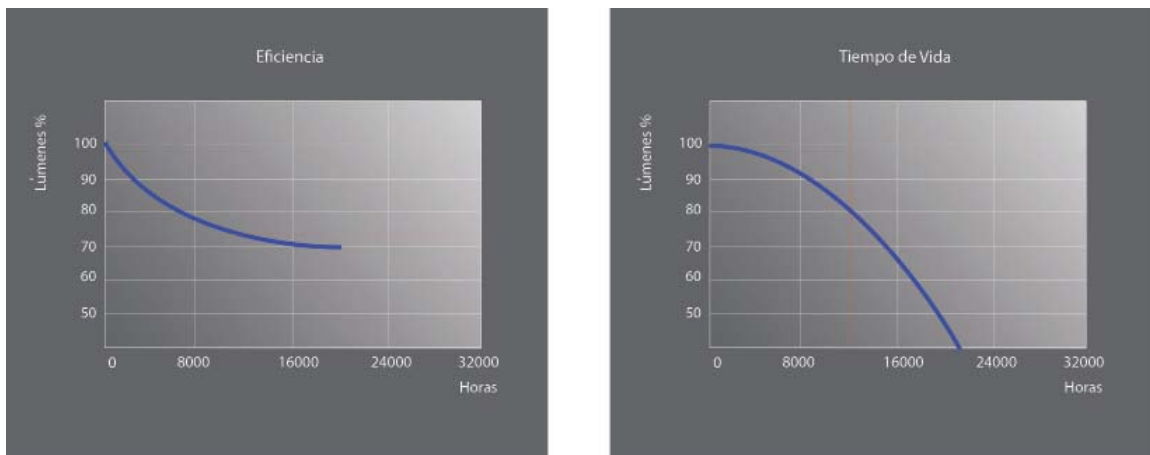
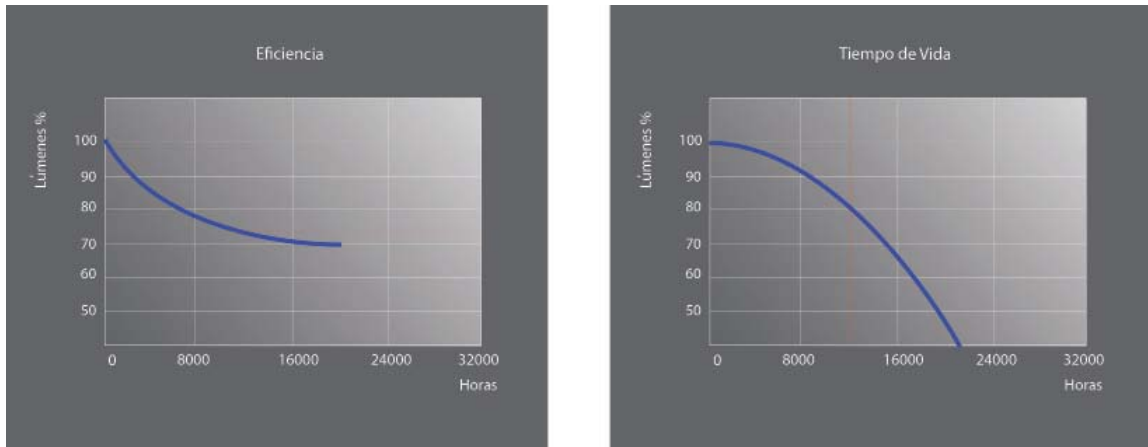


Tabla 6.23 Comparativa de costos de operación y mantenimiento de los sistemas de alumbrado utilizando transformador bifásico con secundario a 220 V

DURACIÓN DE VIDA ÚTIL DE LÁMPARA 6,400 horas								
1	25	25	12,600	57.27	2-0	3 x 75	4,535.78	\$93,949.20
Costo de 2 años de consumo de energía aditivos metálicos 400 w								
NI prom.= 26 lux \$187,898.40 (cambio de 25 lámparas cada 1.5 años)								
TOTAL = \$213,198.40								

Sistema de iluminación de 1 km de carretera con luminarias de 250 w Aditivos Metálicos, distancia interpostal 35 m (inst. unilateral) nivel de iluminación promedio 23 lux								
CON TRANSFORMADOR TRIFÁSICO 10 KVA DE 23,000 o 13,200/380 V								
DURACIÓN DE VIDA ÚTIL DE LÁMPARA 8,000 horas								
	POSTE H012 m LUMINARIA 250 w ADITIVOS	LÁMPARA HQI-E 250 w	VOLT. AMP.		ALIMENTACIÓN CONDUCTOR CALIBRE		CONSUMO Kw-h por mes	COSTO ENERGÍA ANUAL
1	29	29	9,135	13.90	4-6	3 X 30	1,901.52	\$39,384.00
Costo de 2 años de consumo de energía aditivos metálicos 250 w (luz blanca)								
NI prom.= 23 lux \$78,768.00 (cambio de 25 lámparas cada 2 años)								
material y mano de obra								
TOTAL = \$104,068.00								

Figura 6.52 Eficiencia de lámpara de 250 w (Fuente: Phillips, catálogo 2008)



CON TRANSFORMADOR BIFÁSICO SECUNDARIO 220 V								
DURACIÓN DE VIDA ÚTIL DE LÁMPARAS 6,400 horas								
1	29	29	9,135	41.52	2-4	3 X 50	3,288.38	\$68,108.88
Costo de 2 años de consumo de energía aditivos metálicos 250 w								
NI prom.= 23 lux \$136,217,76 (cambio de 25 lámparas cada 1.5 años)								
material y mano de obra \$25,300.00								
TOTAL = \$161,517.76								

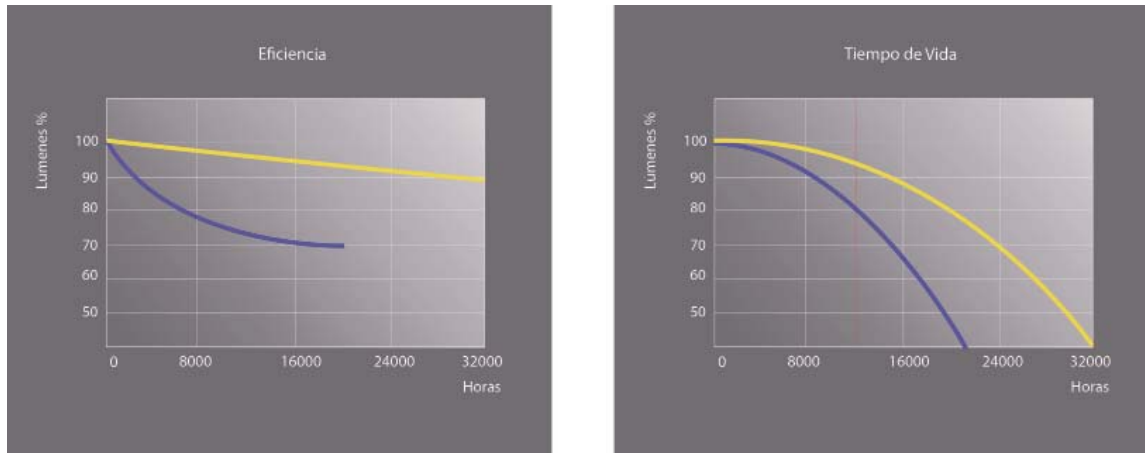
Nota: Las variaciones de voltaje en un transformador bifásico son mayores que en un transformador trifásico, afectando estas variaciones la vida útil de la lámpara.

CONCLUSIÓN DE ANÁLISIS DE COSTOS

CONCLUSIÓN DE ANÁLISIS DE COSTOS DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DE LOS SISTEMAS DE ILUMINACIÓN EN 1 km UTILIZANDO LÁMPARAS DE ADITIVOS METÁLICOS Y LÁMPARAS DE VAPOR DE SODIO DE ALTA PRESIÓN, ALIMENTADOS CON TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS CON SECUNDARIO A 380 V.

Es menor la vida útil de la lámpara en sistemas bifásicos por la mayor variación de voltaje que en los sistemas trifásicos a 380 V.

Figura 6.53 Eficiencia de lámpara de 250 w (Fuente: Phillips, catálogo 2008)



Franja amarilla = Lámpara de V.S.A.P.

Franja azul = Lámpara de aditivos metálicos.

Costo de 2 años de consumo de energía aditivos metálicos 250 w NI prom. 23 lux \$ 78,768.00
 + cambio de 29 lámparas material y mano de obra \$25,300.00 TOT. = \$ 104,068.00

Costo de 2 años de consumo de energía vapor de sodio A.P. 250 w NI prom. 36 lux \$ 78,768.00
 (cambio de 29 lámparas cada 5 años) TOT. = \$ 78,768.00

Costo de 2 años de consumo de energía aditivos metálicos 400 w NI prom. 26 lux \$ 108,561.60
 + cambio de 25 lámparas material y mano de obra \$ 25,300.00 TOT.= \$ 133,861.60

Costo de 2 años de consumo de energía vapor de sodio A. P. 400 w NI prom. 43 lux \$ 108,561.60
 (cambio de 25 lámparas cada 5 años) TOT.= \$ 108,561.60

Los sistemas de iluminación con luminarias equipadas con lámparas de vapor de sodio de alta presión, tienen una eficiencia 35% mayor al mismo costo de operación que las luminarias equipadas con lámparas de aditivos metálicos.

Figura 6.54 Costos de operación y mantenimiento por año



6.19 Norma aplicable

Eficiencia energética para sistemas de alumbrado en vialidades y áreas exteriores públicas:
Norma Oficial Mexicana NOM-013-ENER-2004

Especificaciones:

Los valores máximos de Densidad de Potencia Eléctrica para Alumbrado (DPEA) con los cuales deben cumplir los sistemas para alumbrado público en vialidades indicados en el apartado 5.1 (Vialidades de la NOM-013), no deben exceder los niveles establecidos en la Tabla 6.24.

En caso de usar superpostes para alumbrado de vialidades cubiertas bajo el apartado 5.1 (Vialidades de la NOM-013), los valores máximos de densidad de potencia para alumbrado (DPEA) no deben exceder lo indicado en la Tabla 6.25. Estos valores se consideran solamente para el área de vialidad.

Los valores máximos de DPEA con los cuales deben cumplir los estacionamientos públicos abiertos, no deben exceder los niveles establecidos en la Tabla 6.26. Para el caso de estacionamientos públicos cerrados o techados, la DPEA no debe ser mayor a 3 w/m².

Tabla 6.24 Valores máximos de DPEA para vialidades (w/m^2) (Fuente: NOM-013)

Nivel de iluminancia lux (lx)	Ancho de calle m			
	7.5	9.0	10.5	12.0
3	0.26	0.23	0.19	0.17
4	0.32	0.28	0.26	0.23
5	0.35	0.33	0.30	0.28
6	0.41	0.38	0.35	0.31
7	0.49	0.45	0.42	0.37
8	0.56	0.52	0.48	0.44
9	0.64	0.59	0.54	0.50
10	0.71	0.66	0.61	0.56
11	0.79	0.74	0.67	0.62
12	0.86	0.81	0.74	0.69
13	0.94	0.87	0.80	0.75
14	1.01	0.95	0.86	0.81
15	1.06	1.00	0.93	0.87
16	1.10	1.07	0.99	0.93
17	1.17	1.12	1.03	0.97

Nota: El nivel de iluminación a utilizar dependerá del tipo de vialidad a iluminar, de acuerdo con lo establecido en el artículo 930 "Alumbrado Público de la Norma NOM-001-SEDE-1999 vigente o la que la sustituya.

Tabla 6.25 Valores máximos de DPEA para sistemas de iluminación en vialidades con superpostes (Fuente: NOM-013)

Área a iluminar m^2	Densidad de potencia w/m^2
< 2,500	0.52
de 2,500 a < 5,000	0.49
de 5,000 a 12,500	0.46
> 12,500	0.44

Tabla 6.26 Valores máximos de DPEA para estacionamientos abiertos (Fuente: NOM-013)

Área a iluminar m ²	Densidad de potencia w/m ²
< 300	1.80
de 300 a < 500	0.90
de 500 a < 1,000	0.70
de 1,000 a < 1,500	0.58
de 1,500 a 2,000	0.54
> 2,000	0.52

Método de cálculo

Consideraciones generales

Una vez que un sistema para alumbrado público se ha diseñado y construido, se considera para fines de aplicación de la presente Norma Oficial Mexicana que la DPEA máxima permisible no exceda lo establecido en la Tabla 6.24, y que además cumple con lo indicado en el artículo 930 "Alumbrado Público" NOM-001-SEDE-1999 vigente o la que la sustituya.

La determinación de la DPEA se calcula a partir de la carga total concretada para alumbrado y del área total para iluminar, de acuerdo a la metodología indicada a continuación.

La Expresión genérica para el cálculo de la DPEA, es:

$$DPEA = \frac{\text{Carga total conectada para alumbrado}}{\text{Área total iluminada}}$$

Donde la DPEA está expresada en w/m², la carga total conectada para alumbrado está expresada en watts y el área total iluminada está expresada en metros cuadrados.

Cuando se tengan anchos de calle menores, mayores o diferentes a los mostrados en la Tabla 6.24, se deben adoptar las siguientes consideraciones:

- Para anchos de calle menores de 7.5 m se toman los valores de la columna de 7.5 m
- Para anchos de calle mayores de 12 m se toman los valores de la columna de 12 m
- Para anchos diferentes a los mostrados en la Tabla 6.24, se toman los valores de ancho de calle de la columna inmediata que le antecede.

Lo anterior, sin incluir las áreas destinadas a aceras o camellones.

La eficacia en el caso de alumbrado para áreas exteriores públicas se calcula dividiendo el flujo luminoso de la fuente luminosa entre la suma de la potencia nominal de la misma fuente luminosa más las pérdidas del dispositivo auxiliar para el arranque y correcto funcionamiento de dicha fuente.

Metodología

A partir de la información contenida en los planos del proyecto de la instalación eléctrica y de los valores de potencia real nominal obtenidos de los fabricantes de los diferentes equipos para alumbrado considerados en dicha instalación, se cuantifica la carga total conectada, así como el área total iluminada a considerarse en el cálculo para la determinación de la DPEA del sistema para alumbrado.

En el caso de los equipos para alumbrado que requieran el uso de balastos u otros dispositivos para su operación, se considera para fines de cuantificar la carga conectada el valor de la potencia nominal del conjunto balastro-lámpara-dispositivo.

Una vez terminada la instalación y de acuerdo con los planos aprobados del proyecto, se debe verificar la instalación a partir de un cálculo de la DPEA con los datos reales mostrados en lámparas o equipos auxiliares y el área cubierta por el sistema para alumbrado.

Asimismo, se debe verificar que todo el equipo instalado cumpla con los requisitos de seguridad y funcionamiento, de acuerdo a las normas oficiales mexicanas en vigor.

7.1 Introducción

Acorde con el desarrollo tecnológico que las vías de comunicación han tenido en nuestro país, los túneles carreteros son de gran importancia en la intercomunicación de carreteras, dando mayor fluidez al tráfico de automotores, por lo que dichos túneles deben tener la máxima seguridad en su funcionamiento.

Figura 7.1 Alumbrado de túnel (Túnel Cartagena, España) (Dominio Público)



Los sistemas de alumbrado son parte esencial en las instalaciones de seguridad de los túneles; por ello los responsables del proyecto y construcción de los mismos deben tener pleno conocimiento de la actualización y modernización de dichos sistemas para lograr una máxima seguridad, confort visual, eficiencia y bajo costo de operación y mantenimiento.

Tomando en consideración los altos niveles de iluminación de la luz natural del día en el exterior de los túneles, para evitar el contraste de iluminación los niveles que se deben tener a la entrada del túnel (zona de umbral) serán altos para evitar el fenómeno de agujero negro.

Figura 7.2 Entrada de túnel en el día y en la noche (Dominio Público)



Los niveles de iluminación naturales durante el día pueden alcanzar hasta 100,000 lux; esta iluminación deberá tomarse en cuenta para el estudio de iluminación de los túneles, ya que los cambios de niveles altos de iluminancia a niveles bajos producen los efectos denominados de inducción y adaptación, así como la influencia de las luminancias de velo.

La iluminación del túnel tiene que evitar estos efectos como el excesivo contraste de luminosidad entre la zona exterior de acceso y la zona interior inicial del túnel, eliminando el efecto de “agujero negro” y por otro lado, proporcionar la visión suficiente en la zona interior de forma que se puedan distinguir todos los objetos que se encuentren en el campo visual del conductor reduciendo al mínimo el tiempo de adaptación.

Figura 7.3 Túnel iluminado (Túnel en Suiza) (Dominio Público)



7.2 Clasificación de Túneles

Se clasifican de acuerdo a su longitud, en túneles cortos, medianos y largos, éstos a su vez pueden ser unidireccionales o bidireccionales.

Por su longitud se clasifican en:

- TÚNELES CORTOS. Con longitud menor o igual a la distancia mínima de seguridad de frenado.
- TÚNELES MEDIANOS. Con longitud mayor de 200 metros y menor de 400 metros.
- TÚNELES LARGOS. Con longitud mayor de 400 metros.

En función del flujo de tráfico:

Túnel unidireccional. Consiste en dos túneles separados, cada uno de los cuales está diseñado para el flujo de tráfico en una sola dirección. Este tipo de túnel puede ser de uno o varios carriles.

Túnel Bidireccional. Consiste de un solo túnel común diseñado para el flujo de tráfico en ambas direcciones. En este tipo de túnel, el nivel de luminancia en la zona interior debe ser mayor que la correspondiente al túnel unidireccional.

Túnel Corto

Se clasifica como túnel corto o PIV el que tiene una longitud igual o menor a la distancia mínima de seguridad de frenado (ver tabla 7.1). Un túnel corto puede tener hasta 25m de largo sin necesidad de iluminación diurna.

Túnel corto, se considera por longitud hasta una distancia de 200 m.

En este tipo de túneles se pueden distinguir los objetos por contraste contra el fondo claro del lado de salida del túnel durante el día.

Figura 7.4 Túnel Corto (Dominio Público)



Túnel Mediano y Largo

Túnel mediano, se considera por su longitud mayor a 200 m y menor a 400 m.

Túnel largo, se considera por su longitud mayor a 400 m.

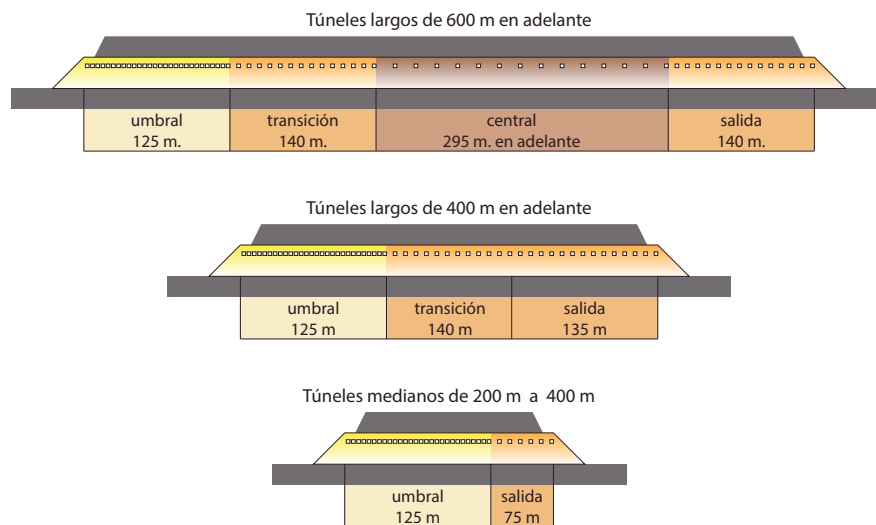
En ambos casos la longitud total es mayor a la distancia mínima de seguridad de frenado. En los túneles medianos se debe considerar la alineación o curvatura que impida la visibilidad del conductor de la salida del túnel.

En los túneles medianos y largos existen zonas de umbral, transición, central y salida.

Figura 7.5 Túnel Mediano y Largo (Túnel en Austria) (Dominio Público)



Figura 7.6 Ejemplos de túneles de acuerdo a su longitud (Dominio Público)



7.3 Efecto Visual

El sistema visual del ojo se puede adaptar en forma escalonada reduciendo los niveles de iluminación tal y como ocurre cuando se pasa de la luz del día a la oscuridad del túnel, no siendo estos ajustes instantáneos; el proceso de adaptación del ojo requiere de cierto tiempo dependiendo de la diferencia de luminosidad, ya que a mayor diferencia, mayor tiempo de adaptación.

Existen varios fenómenos visuales que se presentan al conductor en el exterior e interior de los túneles, los cuales se deben de tener en cuenta para mantener la seguridad del conductor denominado uno de inducción y otro denominado adaptación, así como la influencia de las luminancias de velo. Todo lo cual exige tener en cuenta la distancia mínima de seguridad de frenado en función de la velocidad del tráfico del túnel.

Efecto de inducción

Es el producido por la influencia de las partes contiguas de la retina en la que se forma la imagen del objeto que se está visualizando. Cuando los ojos del conductor se encuentran en estado de adaptación a un determinado nivel de luminancia únicamente se pueden ver los objetos de luminancia similar.

El efecto de inducción es un nivel de iluminancia (iluminación natural diurna de la carretera), que no permite ver un objeto si su luminancia es inferior al del nivel de la entrada del túnel.

Durante el día los ojos del conductor, específicamente la pupila junto con la retina, están adaptadas a una iluminancia elevada que puede alcanzar hasta los 100,000 lux. Al acercarse al túnel se observa que la boca de entrada tiene una iluminancia menor y da apariencia de un agujero negro en el que no se ve ningún detalle. Este cambio extremo entre niveles altos y bajos de iluminación produce una ceguera momentánea que es peligrosa.

Un claro ejemplo se tiene cuando al mirar un objeto con niveles altos de iluminancia y ver una zona oscura queda la sensación de seguir viendo el objeto iluminado.

Figura 7.7 Agujero negro (Dominio Público)



Efecto de adaptación

Es el tiempo que tarda la pupila y la retina en sensibilizarse al cambio de luminancias, el cual se conoce como tiempo de adaptación. A mayor diferencia, mayor tiempo de adaptación.

Los cambios rápidos de la distribución de luminancias en el campo visual del conductor no son instantáneos, en cierto tiempo la capacidad de visión disminuye llegando a producir una ceguera momentánea a la entrada del túnel, dando origen a un posible accidente al no disponer de tiempo para la adaptación del ojo humano.

Luminancia de velo

Es el conjunto de luces parásitas presentes sobre el ojo del conductor debido a los reflejos del parabrisas, la luminancia atmosférica (polvo, contaminantes, humedad, etc.), los cuales combinan para formar un velo luminoso que reduce la visibilidad de los obstáculos a la entrada del túnel.

Los tres primeros fenómenos: de inducción, adaptación y luminancia de velo afectan la visibilidad del conductor reduciendo la visibilidad de los obstáculos que se presentan al frente como un objeto o vehículos, etc.

Esta visibilidad se logra por contraste de objetos contra el fondo de los mismos.

El contraste se expresa con la siguiente ecuación:

$$C = (L_o - L_f) / L_f$$

Donde:

L_o = Luminancia del obstáculo.

L_f = Luminancia de fondo.

El contraste C puede ser positivo o negativo:

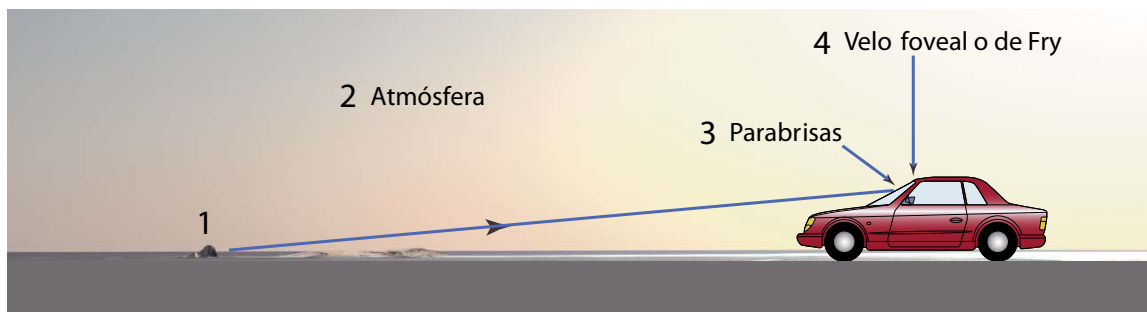
Si $L_o > L_f$, $C > 0$ entonces es un contraste positivo (obstáculo más claro que el fondo)

Si $L_o < L_f$, $C < 0$ entonces es un contraste negativo (obstáculo más oscuro que el fondo)

Para el caso de túneles se deben distinguir dos tipos de contraste: el denominado intrínseco C_{int} medido junto al obstáculo y el contraste de retina C_R medido desde el ojo del conductor del vehículo.

En la Figura 7.8 se muestra el contraste intrínseco C_{int} que es medido junto al obstáculo (1), mientras que el contraste de retina C_R es evaluado desde el ojo del observador (4), interponiéndose entre ambos contrastes un conjunto de luminancias de velo denominadas atmosférica L_{atm} , de parabrisas L_{pb} y foveal L_v , que provocan un deslumbramiento de velo en el ojo del conductor el cual perturba la visión.

Figura 7.8 Velos parásitos atmosféricos (L_{atm}), de parabrisas (L_{pb}) y velo foveal (L_v) (Fuente: Recomendaciones para la iluminación de carreteras y túneles. Gobierno de España)



$$C_{int} = L_o - L_f / L_f \quad C_R = L_{or} - L_{fr} / L_{fr}$$

Las capas de aire en la atmósfera contienen partículas iluminadas por la luz solar dando lugar a la luminancia atmosférica L_{atm} . Esto es debido a que la refracción de la luz en dichas capas de aire dependen de las condiciones atmosféricas y de la posición del sol.

La luminancia del parabrisas L_{pb} provoca efectos de difracción o reflexión de acuerdo a la posición del sol en el campo visual y curvatura e inclinación del parabrisas del vehículo.

La luminancia de velo foveal L_v es causada por la perturbación en la visión que provoca una luminancia ajena al objetivo visual dificultando la percepción de las imágenes.

Las luminancias de velo atmosférico, del parabrisas y foveal, representadas en la Figura 7.8, se interponen entre el obstáculo y el conductor reduciendo el contraste intrínseco C_{int} del obstáculo ($C_R < C_{int}$), disminuyendo la visibilidad de los obstáculos a la entrada de los túneles.

Las luminancias de velo se producen en el parabrisas aunadas a las de la atmósfera perturbando la visión del conductor a la entrada del túnel, éstas son variables dependiendo de la región, orientación, y zona donde se encuentra el túnel, así como la estación del año, etc.

La iluminación del túnel, tiene que evitar los efectos antes mencionados, así como el excesivo contraste de niveles altos de luminancia entre la zona exterior de acceso y la zona interior inicial del túnel eliminando el efecto de “agujero negro”. La sensibilidad se logra por el contraste de los objetos contra el fondo de los mismos (figura 7.9), teniendo la suficiente visión en la zona interior de forma que se puedan distinguir los objetos que se encuentren en el campo visual, reduciendo al mínimo el tiempo de adaptación de una luminancia menor a otra mayor, la cual es más rápida en el ojo como se ve a la salida del túnel (figura 7.10).

Figura 7.9 Estudio de contraste por luminancias (Dominio Público)

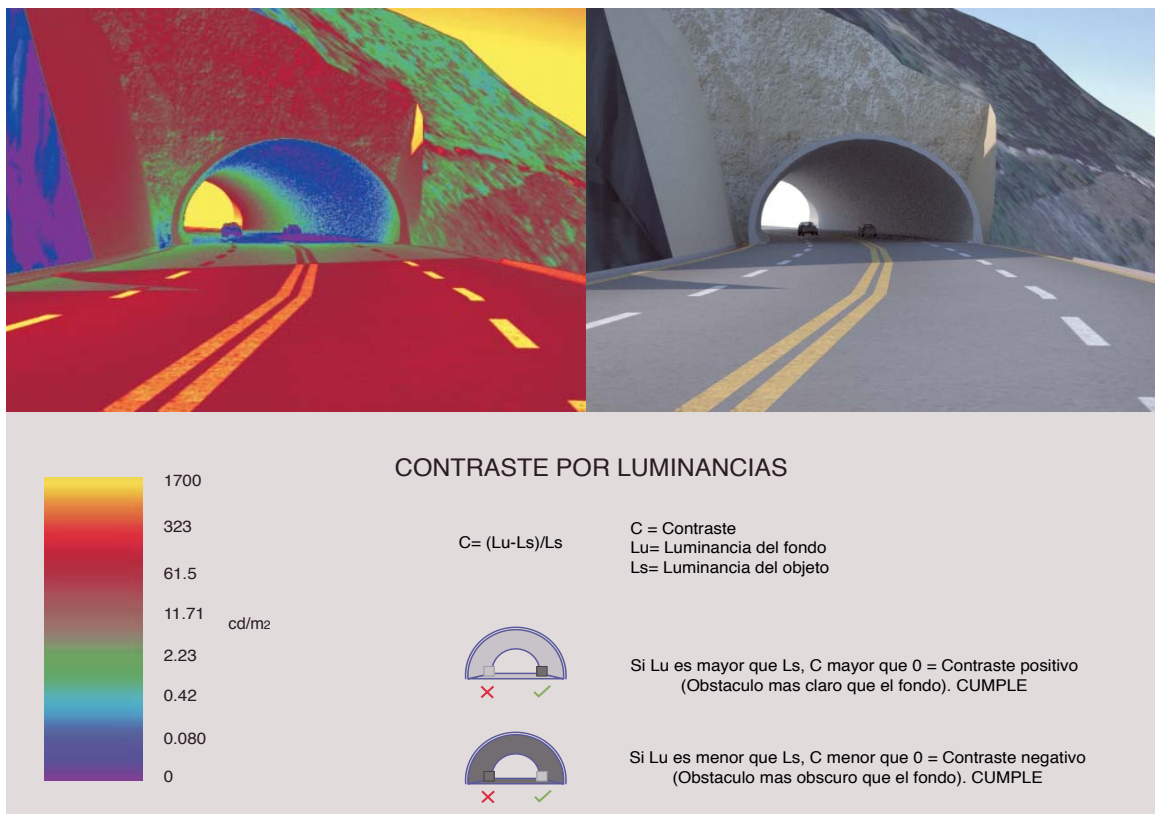


Figura 7.10 Salida de túnel (Dominio Público)



Efecto Flicker

Las variaciones periódicas de luminancias en el campo de visión producen una impresión molesta dando una sensación de parpadeo o efecto Flicker. Estas sensaciones se experimentan cuando se conduce un vehículo a través de cambios constantes de luminancia (efecto escalera o efecto cebra) producidos por la separación incorrecta de las luminarias instaladas en las paredes de los túneles.

Esta incomodidad visual depende fundamentalmente de los siguientes factores:

- Cantidad de cambios de la luminancia por segundo (frecuencia de parpadeo o Flicker)
- Duración
- Velocidad de cambio de claro a oscuro en un solo ciclo
- Relación de pico-luz a valle-oscuridad dentro de cada periodo

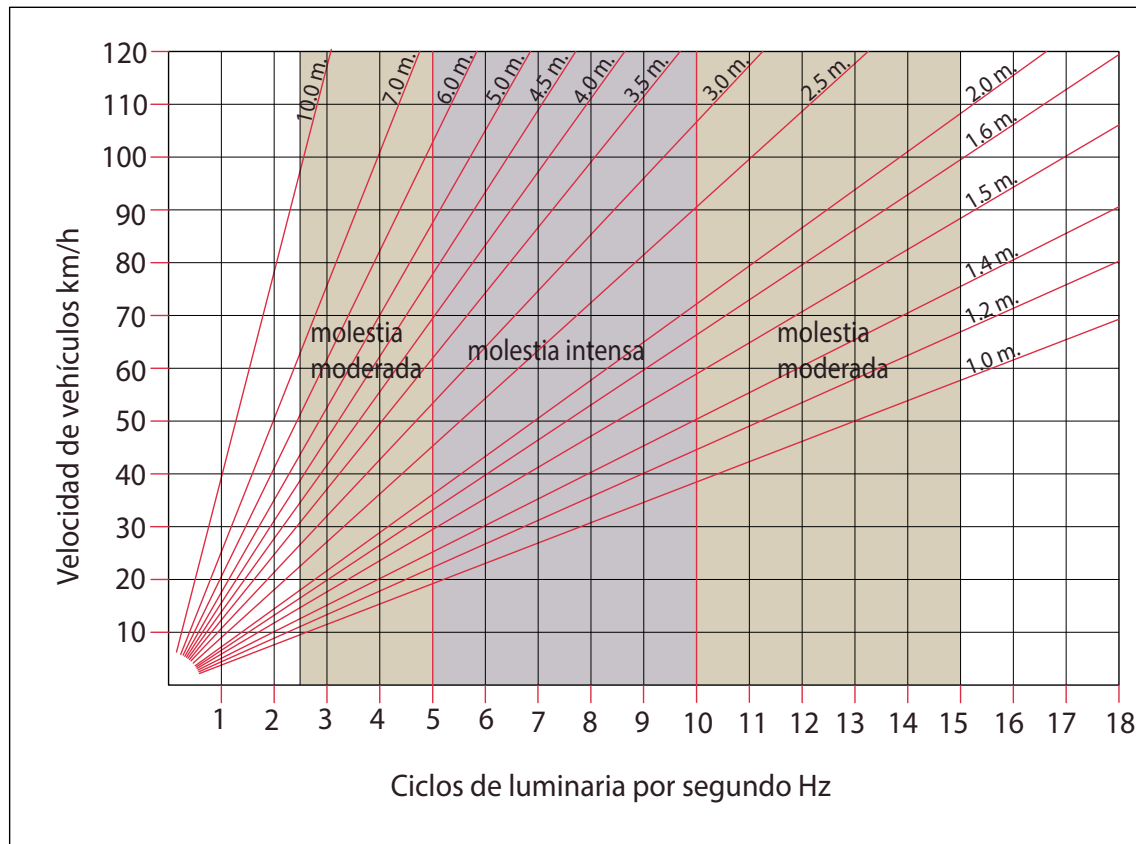
Los tres primeros factores dependen de la velocidad del vehículo y la distancia de separación entre luminarias. El último factor depende de las características fotométricas y la separación entre luminarias.

Figura 7.11 Efecto Flicker (Túnel en España) (Dominio Público)



En la figura 7.12 Se indica la relación del número de luminarias que se observan por segundo en relación a la velocidad del vehículo. El diseñador debe evitar espaciamientos de luminarias dentro de la zona de molestia indicada, que corresponde a 2.5 a 15 ciclos de luminarias por segundo.

Figura 7.12 Efecto de parpadeo (Fuente: CIE 31-1976)



Deslumbramiento (TI)

El deslumbramiento reduce la visibilidad, por tanto se deben eliminar las luminarias provistas de refractores en las instalaciones de túneles.

Efectos de impedimento de deslumbramiento son cuantificados por el Incremento de Umbral TI como es descrito en el CIE^{REF23} "Deslumbramiento y uniformidad en la iluminación de las calles".

El incremento de umbral TI debe ser menor del 15 % para zonas de umbral, transición y zona interior del túnel en día y noche. Para la zona de salida durante el día no existe limitación en el deslumbramiento perturbador. Así mismo, el deslumbramiento molesto o índice de confort, debe ser igual o superior a 5.

7.4 Factores para el diseño de alumbrado

Distancia de seguridad de frenado (DSF)

Se denomina distancia de seguridad de frenado (DSF) a la distancia que se requiere para que el conductor de un vehículo que circula a determinada velocidad pueda detenerse antes de alcanzar cualquier obstáculo situado en la vía de circulación.

Al aproximarse un vehículo a un túnel, los efectos de inducción, adaptación y la influencia de las luminancias de velo, están relacionadas directamente con la distancia que el conductor tiene hacia la boca del túnel denominada zona de acceso, con una longitud igual a la distancia mínima de seguridad de frenado (DSF, Tabla. 7.1).

A mayor velocidad corresponden mayores distancias de seguridad de frenado (DSF), lo que obliga una mayor longitud de la zona de umbral y transición del túnel.

La distancia varía de acuerdo a la velocidad de circulación permitida indicada en la tabla 7.1

Tabla 7.1 Distancia mínima de seguridad de frenado de la NOM-001-SEDE

Velocidad de Tráfico km/h	Distancia mínima de seguridad de frenado (m)
50	80
65	90
80	140
90	165
95	200
105	220

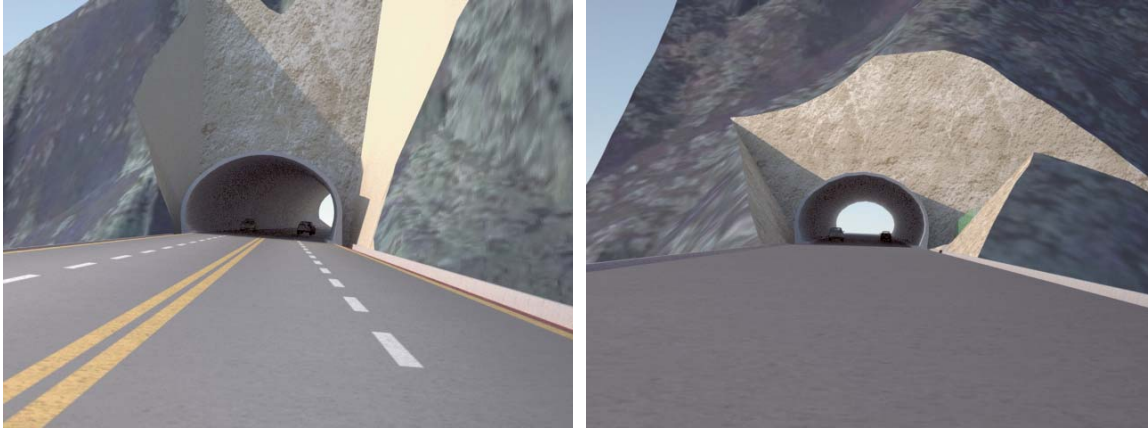
A mayor distancia de las zonas al interior del túnel, el obstáculo se observa con un ángulo más pequeño en el ojo del conductor y por tanto, es menos visible. La capa de aire entre el conductor situado en la zona de acceso y la entrada del túnel es mayor, lo que significa mayor luminancia atmosférica, reducción del contraste intrínseco y consecuentemente, disminución de la visibilidad de los obstáculos. Todo ello exige mayores niveles de iluminación en la zona de umbral del túnel.

Características del túnel

Los túneles cortos rectos relativamente a nivel con una longitud igual o menor a 25m deberán de tener una visibilidad sin iluminación diurna. En este caso, la visibilidad se obtiene por medio de contraste negativo con altos valores de luminancia a la salida del túnel.

En túneles curvos donde la salida del túnel no es visible, se requiere de iluminación suplementaria.

Figura 7.13 Túnel corto curvo, túnel corto recto (Dominio Público)



En estos casos se debe considerar un solo sistema de iluminación que será igual al de la zona de umbral. Para túneles largos se deben considerar diferentes zonas de iluminación.

Luminancia en Túnel

La luminancia del túnel en zona la de entrada o umbral durante las horas del día debe ser alta para proporcionar visibilidad al conductor durante el tiempo de adaptación a la entrada del mismo.

Figura 7.14 Luminancia en zona de umbral (Túnel en Barcelona, España) (Dominio Público)



La luminancia requerida en la zona de umbral dependerá de las características propias del túnel además del volumen de tráfico y la velocidad del mismo. De acuerdo a la tabla 7.2, los niveles de luminancia son los siguientes:

Tabla 7.2 Luminancia en la zona de umbral (NOM 2005)

Características del túnel	Velocidad del tránsito km/hr	Volumen de tránsito diario anual en ambas direcciones			
		<25,000	25,000 -90,000	90,001 -150,000	>150,000
Candelas por metro cuadrado (cd/m ²)					
Túneles de montaña con declive gradual donde la nieve puede acomodarse.	81	210	250	290	330
Túneles con pocos edificios en su alrededor.	61-80	180	220	260	300
	60	140	140	230	270
Orientación de túnel Este-Oeste					
Túneles de montaña con pendiente, con taludes oscuros o condiciones climáticas donde la nieve no puede acumularse.	81	145	175	205	235
	61-80	130	160	190	220
	60	105	140	170	200
El entorno alrededor de la entrada tiene brillantez media durante todo el año.					
Entrada del túnel oculta, con superficies oscuras o edificios alrededor de la entrada del túnel.	81	80	100	115	130
	61-80	70	90	105	120
	60	60	80	95	110
Orientación del túnel Norte-Sur					

Zona de transición

Un requisito durante el día en la zona de transición es que debe ir disminuyendo desde la zona de umbral hasta la zona interior en forma gradual a lo largo de una longitud igual a la distancia mínima de seguridad de frenado. Dependiendo del largo del túnel pueden existir varias zonas de transición.

7.5 Tipos de alumbrado

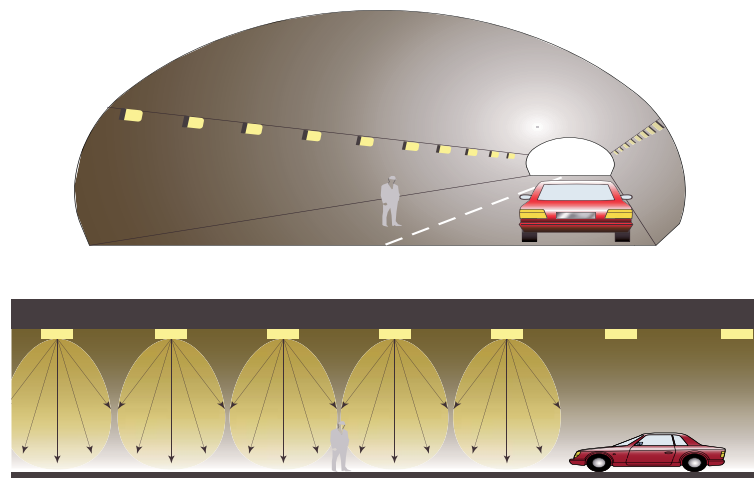
El alumbrado utilizado en túneles carreteros se divide en dos tipos: simétrico y asimétrico.

Simétrico

El sistema de alumbrado simétrico es aquel en el que las luminarias tienen una distribución de la intensidad luminosa simétrica (Figura 7.15).

Los contrastes de los obstáculos pueden ser negativos o positivos de acuerdo a las propiedades de reflexión de la superficie. A través de este sistema se asegura una visión en contraste positivo, es decir, que los obstáculos se destacan claros sobre el fondo oscuro de la calzada y paredes del túnel.

Figura 7.15 Tipo de alumbrado simétrico (Fuente: Recomendaciones para la iluminación de carreteras y túneles. Gobierno de España)



El sistema de alumbrado simétrico se utiliza en todos los casos en la zona del interior de los túneles con luminarias con combinación de lámparas de vapor de sodio a alta presión y aditivos metálicos.

Permite una buena visibilidad de los obstáculos y ausencia de deslumbramiento, siendo aconsejable fotométricamente que el pavimento de la vía y las paredes del túnel sean superficies difusoras y claras (coeficiente de luminancia medio Q_0 alto). En este sentido, es conveniente que el pavimento sea de la Clase R1, R2 o C1, según recomendaciones de la CIE, con alto grado de claridad o luminosidad (Q_0 lo más elevado posible).

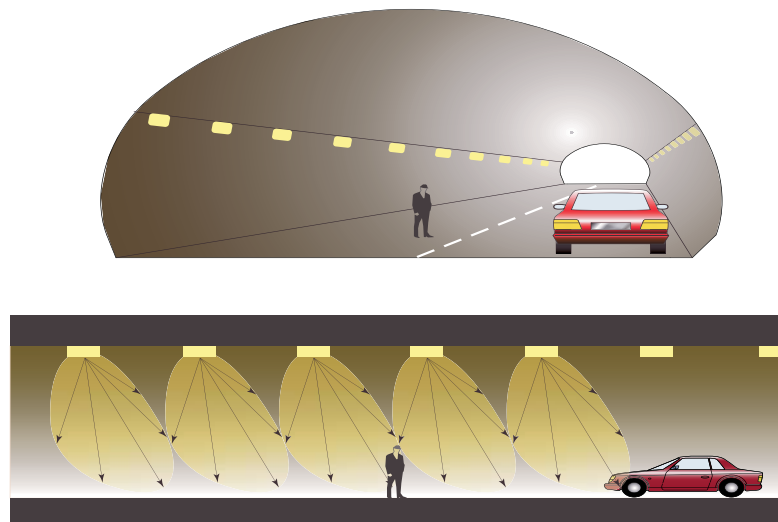
Asimétrico

El tipo de alumbrado en el que las luminarias tienen una distribución de la intensidad luminosa asimétrica que está dirigida en contra del sentido de circulación del tráfico de vehículos, tal y como se representa en la figura 7.16.

El sistema de alumbrado asimétrico favorece la visión de obstáculos por contraste negativo, provocando que los obstáculos se destaquen oscuros sobre el fondo claro de la calzada y paredes del túnel, debido a que la iluminación vertical en los planos que están mirando a los conductores que se aproximan es muy baja.

La visión en contraste negativo se consigue reduciendo la luminancia del obstáculo (L_o), limitando sensiblemente la iluminación vertical del mismo (E_v) y aumentando la luminancia de la vía.

Figura 7.16 Tipo de alumbrado asimétrico (Fuente: Recomendaciones para la iluminación de carreteras y túneles. Gobierno de España)



7.6 Luminarias

Las luminarias deben tener alta eficiencia de distribución luminosa para obtener una luminancia uniforme en los carriles de circulación.

Las luminarias deben estar provistas de rejillas antideslumbrantes y la carcasa debe ser de poliamida para evitar la corrosión y tener mejor dispersión de calor. Los reflectores interiores serán de aluminio anodizado y la cubierta de vidrio termotemplado plano a prueba de alto impacto.

Las luminarias deben estar colocadas en las paredes del túnel a una altura mínima de 5.5 metros con objeto de evitar el deslumbramiento, así como de facilitar las operaciones de mantenimiento de las instalaciones de alumbrado sin entorpecer el tráfico de vehículos.

Las luminarias deben ser herméticas a prueba de chorro de agua a presión –utilizado normalmente para su limpieza, su cierre proporcionará total hermetismo. Deben ser de fácil acceso a la fuente de luz y a sus accesorios para un eficiente y fácil mantenimiento.

La luminaria debe contar con un sistema de ventilación para mantener bajas temperaturas y obtener un máximo rendimiento de sus componentes (lámparas y reactores).

Balizar con sistemas de vialetas, marcadores de plástico y dispositivos con diodos luminosos para marcar perfectamente los límites de la calzada y la línea o líneas divisorias del pavimento, lo que contribuye a aumentar notablemente la seguridad y comodidad del conductor.

Se deben implementar sistemas de balizamiento con tecnología Led's para una mayor visión de conducción en el interior del túnel.

7.7 Alumbrado Diurno de Túneles largos

Respecto a la iluminación en túneles largos, éstos se clasifican en función de la intensidad, velocidad, composición del tránsito y el confort visual en la conducción.

Iluminación de túneles largos

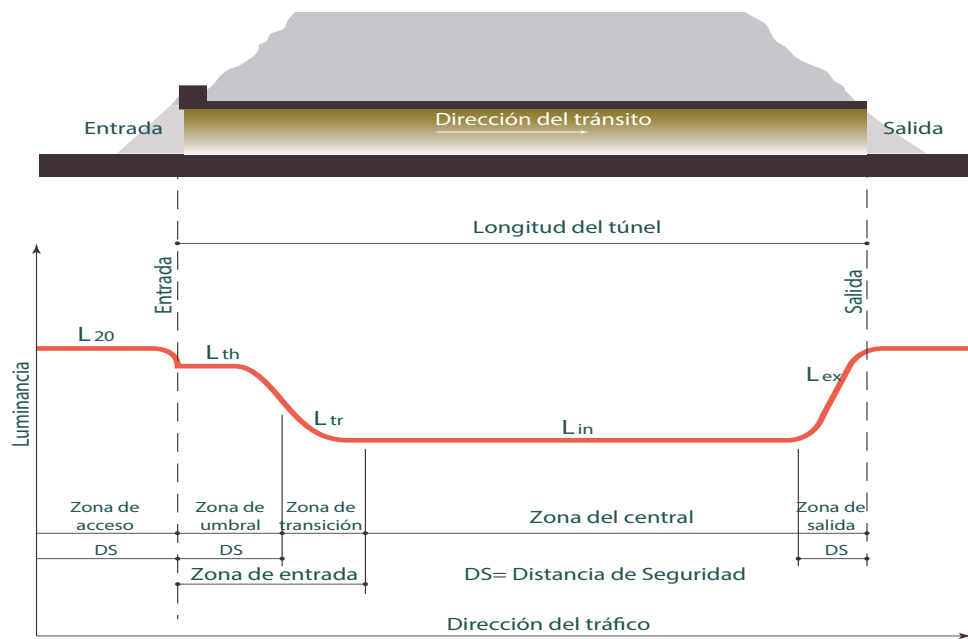
Los parámetros fotométricos para establecer la calidad de iluminación de un túnel son los siguientes:

- Nivel de luminancia de la vía.
- Nivel de luminancia de las paredes, hasta una altura de 2 m.
- Uniformidad de distribución de luminancia en la vía y las paredes.

- Limitación del deslumbramiento.
- Control sobre el efecto Flicker.

La Figura 7.17 representa una sección longitudinal de un túnel largo unidireccional, detallando las longitudes y niveles de luminancia de las diferentes zonas del mismo.

Figura 7.17 Niveles de luminancia en las diferentes zonas del túnel (Fuente: CIE 88-2004)



La nomenclatura y definición correspondiente de los niveles luminotécnicos son las siguientes:

L_{20} = Luminancia en la zona de acceso.

L_{th} = Luminancia en la zona de umbral.

L_{tr} = Luminancia en la zona de transición.

L_n = Luminancia en la zona central.

L_{ex} = Luminancia en la zona de salida.

Luminancia en las diferentes zonas del túnel

En el diseño de iluminación de un túnel se deben de tomar en cuenta las siguientes zonas:

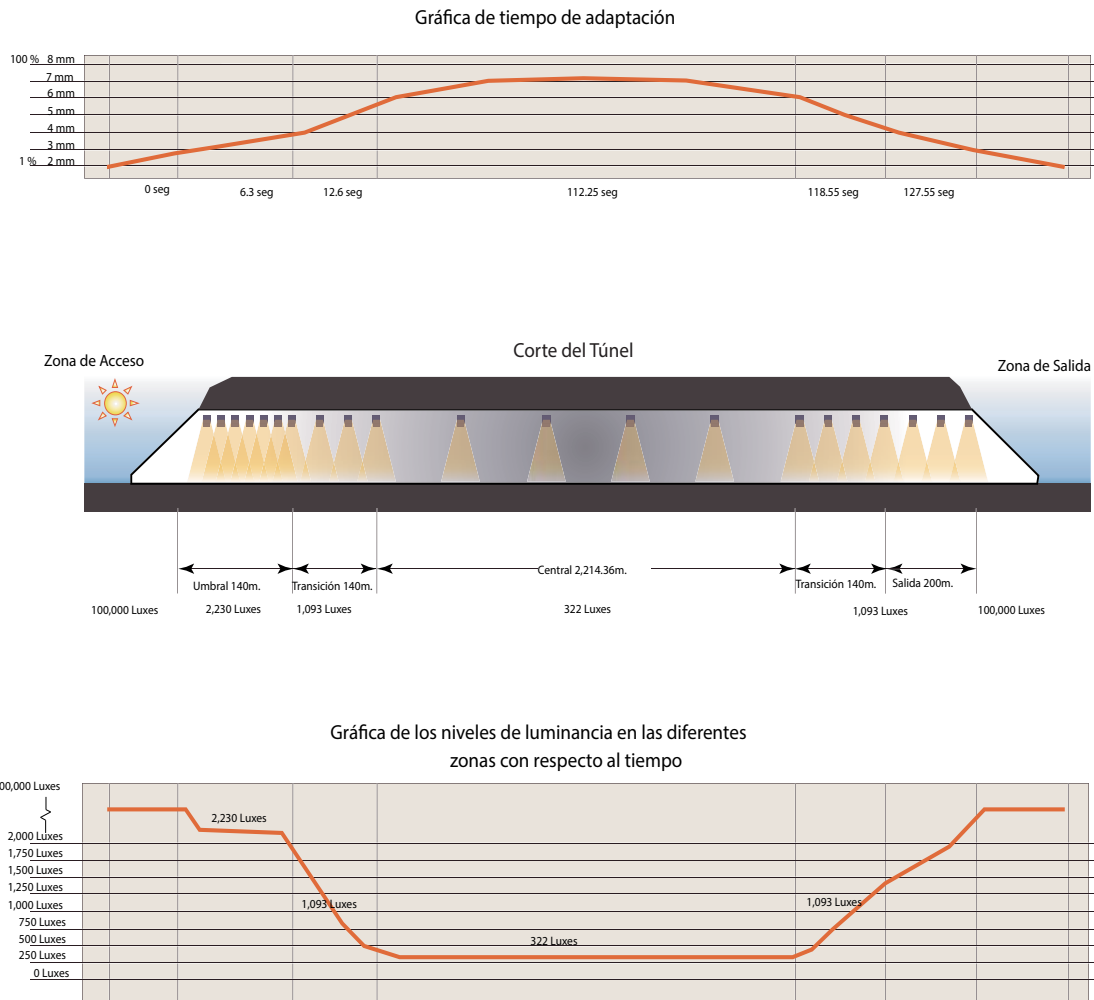
Zonas de acceso o de entrada constituida por las zonas de umbral, transición, central, transición y finalmente de salida (ver Figura 7.17).

Es imposible tener en la zona de entrada de los túneles un nivel de iluminación idéntico al existente en el exterior durante el día, el cual alcanza un nivel de iluminación hasta de 100,000 lux.

El diseño de iluminación de un túnel se calcula en varias zonas de forma que el contraste de iluminancias vaya disminuyendo progresivamente desde el exterior al interior, consiguiendo así la adaptación visual del ojo en el menor tiempo posible, estas zonas de iluminación son: zona de acceso, zona de umbral, zona de transición, zona central y zona de salida.

Ejemplo de adaptación de la pupila en las diferentes zonas del túnel:

Figura 7.18 Gráfica de adaptación de la pupila en el día (Fuente: CIE 88-2004)



Zona de acceso - Es la zona de la carretera a cielo abierto que se encuentra delante del portal del túnel y que abarca la distancia en que el conductor al aproximarse podrá ver el interior del túnel. La zona de acceso comienza en el punto de distancia mínima de seguridad de frenado por delante del portal y termina en el portal. La longitud de esta zona es de 100 a 200 m.

Zona de Umbral - Es la zona de entrada al túnel en la que el nivel de iluminación se debe aproximar en lo posible al nivel exterior para evitar el efecto de “agujero negro”.

La longitud de esta zona depende de la velocidad de diseño del túnel, del deslumbramiento de velo, del tiempo de adaptación del ojo y de la distancia mínima de seguridad de frenado.

Zona de transición - Es la zona siguiente a la de umbral donde paulatinamente van disminuyendo los niveles de iluminación hasta conseguir la adaptación del ojo del conductor. Su longitud es variable dependiendo también de la velocidad de circulación en el interior del túnel.

Zona Central - Esta es la zona siguiente a la de transición donde el nivel de iluminación se mantiene constante hasta la zona de salida al haberse acomodado la adaptación del ojo a las condiciones de iluminación interior del túnel. La longitud de esta zona es también variable y esta condicionada a la longitud total del túnel y al tipo de circulación de una o dos direcciones, pudiendo ocurrir que esta zona no exista al sobreponerse las zonas de transición de los dos carriles en túneles de doble dirección.

Zona de salida - Es el último tramo del túnel donde las condiciones de iluminación se tienen que adaptar a la luminosidad de la boca de salida, por lo que necesita un mayor nivel de iluminación que la zona central para evitar el excesivo contraste de luminancias con el exterior. La longitud de esta zona depende también de la velocidad de circulación en el interior del túnel y su longitud es de aproximadamente 200 m.

En las zonas de acceso y salida del túnel se debe considerar una longitud de por lo menos unos 100 a 200 m que se deben iluminar por la noche.

Luminancia en la zona de acceso

La zona de acceso es la parte de la carretera a cielo abierto que se encuentra frente a la entrada o portal del túnel y abarca la distancia a la que un conductor que se aproxima debe ser capaz de ver en el interior del túnel. La longitud de la zona de acceso debe ser igual a la distancia de seguridad de frenado, (Figuras 7.19 y 7.20.).

El valor de luminancia necesario al inicio de la zona de umbral (L_{th}) debe de basarse en el valor de la luminancia en la zona de acceso L_{20} .

Estos factores representan la reducción permitida en los valores de la luminancia (L_{th}) debido a la luminancia resultante de la configuración del portal. Las diferentes escenas se indican en la Figura 7.21.

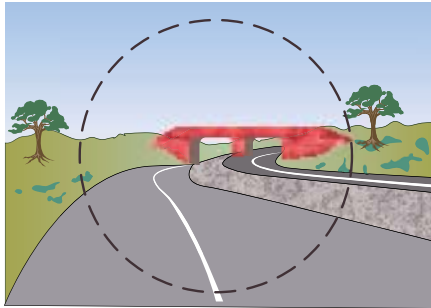
Figura 7.19 Zona de acceso (Túnel en Oviedo, España) (Dominio Público)



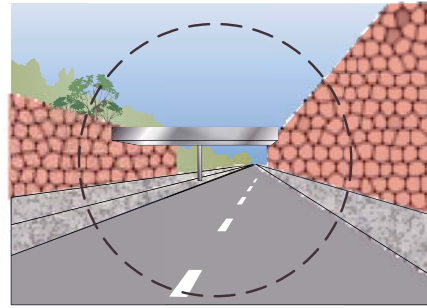
Figura 7.20 Zona de acceso igual a la distancia mínima de seguridad de frenado (Túnel al sur de Francia) (Dominio Público)



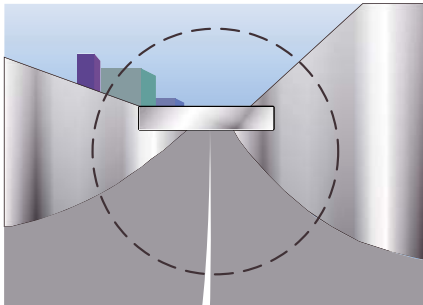
Figura 7.21 Tipos de escenas para obtener el valor "L" y para realizar la definición del % de cielo que contribuye al valor L_{20} en la instalación a calcular (Fuente: 88-2004)



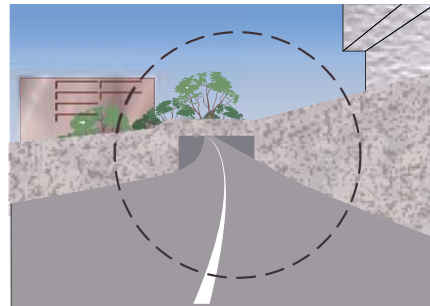
1.-Distancia de seguridad 160 m. Cielo 35%



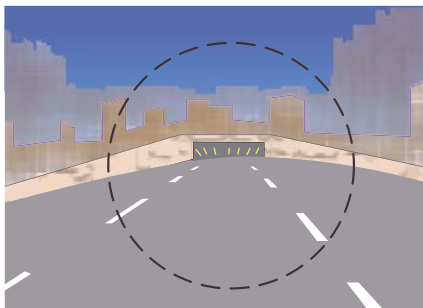
2.-Distancia de seguridad 100 m. Cielo 27%



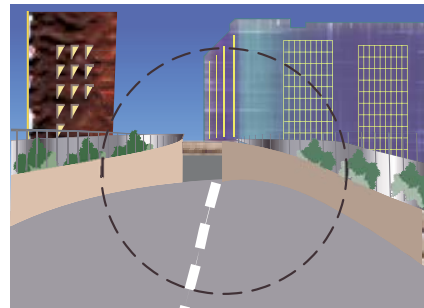
3.-Distancia de seguridad 60 m. Cielo 14%



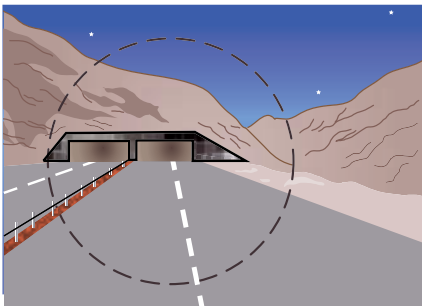
4.-Distancia de seguridad 100 m. Cielo 18%



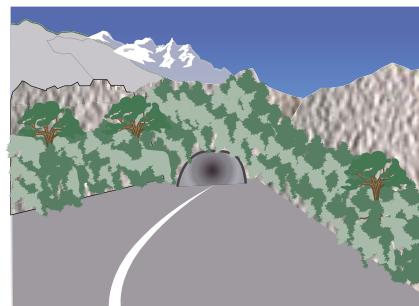
5.-Distancia de seguridad 160 m. Cielo 14%



6.-Distancia de seguridad 100 m. Cielo 3%



7.-Distancia de seguridad 100 m. Cielo 18%



8.-Distancia de seguridad 100 m. Cielo 4%

Luminancia en zona de umbral

La zona de umbral es la primera parte del túnel ubicada directamente después del portal, comenzando por tanto, en la boca del mismo.

Figura 7.22 Zona de umbral (Dominio Público)



El nivel de luminancia L_{th} (luminancia media en servicio de la superficie de la calzada con mantenimiento de la instalación) será proporcionado por el alumbrado durante el día al inicio de la zona de umbral es un porcentaje de la luminancia de la zona de acceso L_{20} , de forma que se verifica:

$$L_{th} = k \cdot L_{20}$$

El factor k se determina en la Tabla 7.4 considerando el sistema de alumbrado adoptado (contra flujo o simétrico) y la distancia de seguridad de frenado (DSF).

Tabla 7.3 Valores de $k \times 10^3$ para la zona de umbral (Fuente: CIE 88-2004)

SISTEMA DE ALUMBRADO	CONTRA FLUJO			SIMÉTRICO		
	Distancia de Seguridad (DS)			Distancia de Seguridad (DS F)		
Clase de alumbrado	60 m	100 m	160 m	60 m	100 m	160 m
1	10	15	30	15	20	35
2	15	20	40	20	25	40
3	20	30	45	25	35	45
4	25	35	50	30	40	50
5	30	40	55	35	50	65
6	35	45	60	40	55	80
7	40	50	70	50	60	100

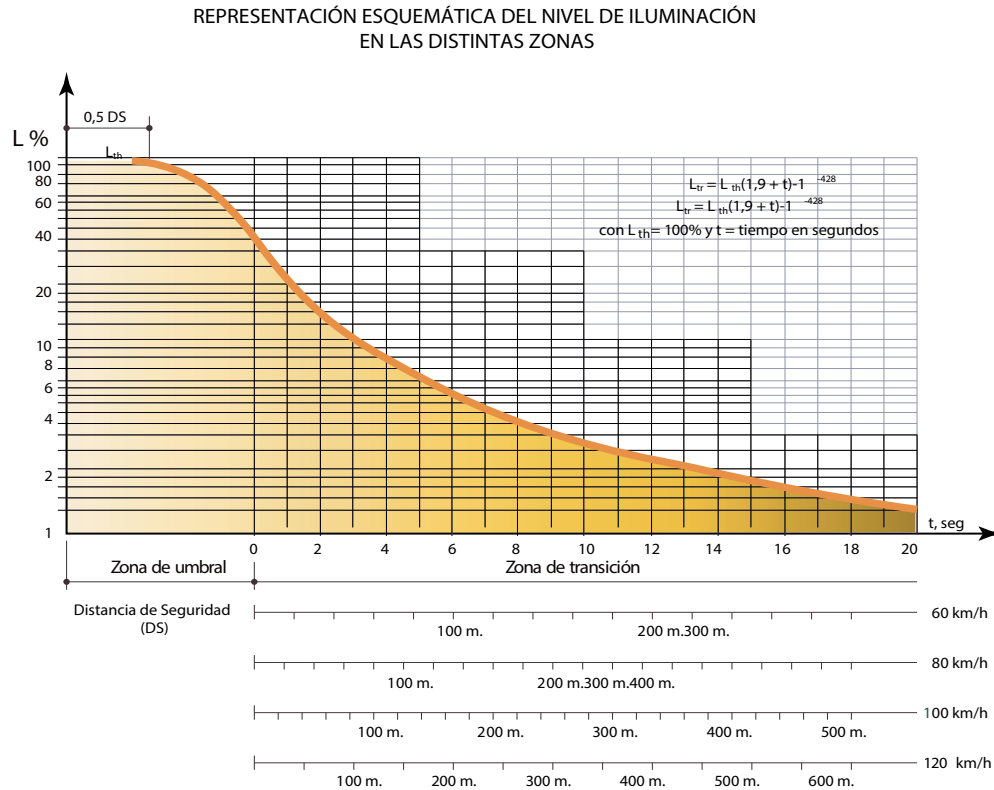
Nota: Para distancias de seguridad de frenado (DSF) comprendidas entre las señaladas (60, 100 y 160 m.) los valores del factor (k) se obtienen por interpolación lineal entre las cifras establecidas en la tabla 7.3. Los valores del factor (K) para sistemas de alumbrado a contra flujo se han determinado para garantizar, en la mayor parte de las circunstancias, un grado de seguridad y comodidad la menos comparable al logrado con el sistema de simétrico.

Las distancias de seguridad de 60, 100 y 160 m, equivalen respectivamente a velocidades de diseño del túnel de 60, 80 y 100 km/h.

Luminancia y longitud de la zona de transición

La zona de transición es la parte del túnel que sigue a la zona de umbral, tal y como se muestra en la Figura 7.23. En este sentido, comienza al final de la zona de umbral y termina al inicio de la zona central.

Figura 7.23 Representación esquemática del nivel de iluminación en las distintas zonas (Fuente: CIE 88-2004)



Esta curva puede ser sustituida por una curva intensificada con niveles que nunca deberían caer debajo de la curva continua. La máxima proporción de luminancia permitida en el transcurso de un paso a otro es tres. El último paso no debería ser mayor que dos veces la luminancia de la zona interior.

Cuando el campo de vista del conductor está hecho por el interior de túnel, una zona de transición más larga puede ser aconsejable a fin de contrarrestar un segundo efecto de agujero negro.

Para mayor comodidad de conducción, en caso de la curva intensificada, la longitud de la zona de transición, en su final, puede ser ampliada de 1 a 2 segundos sobre la longitud que sigue de la curva CIE de la Figura 7.23

De acuerdo a la Figura 7.17, la longitud de la zona de transición es la distancia que debe recorrer un vehículo para adaptarse visualmente, desde el nivel de luminancia del final de la zona de umbral, hasta el valor de la luminancia en el comienzo de la zona central. En consecuencia, para cada velocidad del vehículo la reducción permisible de la luminancia en la zona de transición L_{tr} , es función de la distancia recorrida en la mencionada zona.

La luminancia media en servicio de la calzada con mantenimiento de la instalación de la zona de transición L_{tr} disminuye gradualmente, desde la luminancia de la zona de umbral hasta la luminancia de la zona central. En cualquier posición en la zona de transición, la luminancia de la superficie de la calzada debe ser igual o exceder a la luminancia establecida en la Figura 7.23.

En la práctica, el descenso de la luminancia en la zona de transición puede llevarse a cabo mediante una serie de escalones que deben ser menores que la relación 3:1 y la luminancia no puede alcanzar valores inferiores a los de la curva de la Figura 7.23, alcanzando el final de la zona de transición cuando su luminancia es igual a tres veces el nivel de la zona central del túnel.

Figura 7.24 Zona de transición (Dominio Público)



Luminancia en la zona central

Es la zona en el túnel que sigue directamente a la zona de transición. Su longitud esta determinada por la distancia existente entre el final de la zona de transición y el inicio de la zona de salida. Los niveles de la luminancia L_{in} de la zona central del túnel son constantes a lo largo de dicha zona ya que finaliza la adaptación del ojo desde los altos valores luminosos del exterior.

Figura 7.25 Zona central (Túnel en España) (Dominio Público)



El promedio de luminancia del camino en la zona interior del túnel es dada abajo como una función de la distancia de frenado SD y del flujo de tráfico. En el túnel muy largo hay dos sub-zonas diferentes; la primer sub-zona corresponde a la longitud que es cubierta en 30 segundos y debería ser iluminada con los niveles de "túneles largos". La segunda sub-zona corresponde a la longitud restante y debería ser iluminada niveles de "túneles muy largos".

Tabla 7.4 Valores de luminancia en cd/m^2 en la zona interior de túneles largos (Fuente: CIE 88-2004)

Distancia de frenado	Flujo de vehículos x hora x carril	
	Bajo	Pesado
160 m	6	10
60 m	3	6

Luminancia en la zona de salida

La zona de salida es la parte del túnel en la que durante el día la visión del conductor está influida predominantemente por la elevada luminancia exterior del túnel. La zona de salida comienza al final de la zona central y termina en la boca de salida del túnel.

A fin de asegurar la iluminación directa adecuada de pequeños vehículos y visión trasera suficiente vía espejos, la zona de salida debería ser iluminada del mismo modo que la zona interior del túnel.

En situaciones donde se esperen los riesgos adicionales cerca de la salida del túnel y en túneles donde la zona interior es larga, es recomendado que la luminancia de día en la zona de salida incremente linealmente sobre una longitud igual a la distancia de seguridad de frenado DSF (antes del portal de salida) del nivel de la zona interior a un nivel cinco veces que el de interior de la zona a una distancia de 20 metros del portal de salida.

En la zona de salida del túnel debe establecerse un nivel de luminancia L_{ex} en la calzada para iluminar directamente los vehículos, de forma que los más pequeños resulten visibles en la zona de salida del túnel, dado que sin reforzamiento del alumbrado por encima de los niveles de la zona central L_{in} , permanecerían ocultos detrás de los vehículos grandes, debido al deslumbramiento originado por la luz diurna de salida del túnel.

Figura 7.26 Zona de salida (Dominio Público)



7.8 Alumbrado Diurno de Túneles Cortos y Pasos Inferiores

La exigencia de iluminación artificial diurna depende del grado en que la salida del túnel corto o paso inferior sea visible para el conductor situado en frente de la entrada a la distancia de seguridad de frenado (DSF), es decir, la visión a través del túnel depende de los siguientes factores:

- Longitud del túnel.
- Existencia de curvas en el interior del túnel.
- Presencia de pendientes o rampas en el túnel.

Los pasos inferiores y túneles cortos menores de 25 metros de longitud normalmente no requieren la instalación de alumbrado diurno. Cuando la longitud del túnel corto es superior a 25 metros, el fondo oscuro constituido por las paredes y techo del túnel, así como por la propia calzada, puede ocultar la visión de los vehículos y en su caso, de los peatones que lo atraviesan (Figura 7.27), lo que impide su percepción. Para este caso debe instalarse alumbrado diurno en el túnel o paso inferior.

Figura 7.27 Vista de un túnel corto con un marco o fondo oscuro (Túnel en España) (Dominio Público)



Alumbrado diurno

Básicamente los túneles cortos que se asemejan a túneles largos deben ser iluminados como éstos últimos. En consecuencia, el alumbrado diurno será constante a lo largo de toda la longitud del túnel con los niveles de luminancia requeridos en la zona de umbral de los túneles largos, deducidos por el factor k establecido en la Tabla 7.3, de conformidad con la clase de alumbrado que le corresponda (Tabla 7.5).

Tabla 7.5 Determinación del alumbrado en túneles cortos y pasos inferiores
(Fuente: CIE 88-2004)

1. Longitud del túnel	< 25 m	25 m - 75 m	75 m - 125 m	> 125 m
2. Si la salida del túnel está completamente visible desde la distancia de frenado enfrente del túnel		si / no	si / no	
3. Si la penetración de la luz es buena o pobre		buena / pobre	buena / pobre	
4. Si la reflectancia de las paredes es alta (>0.4) o es baja (<0.2)		alta / baja	alta / baja	
5. Si el tráfico es ligero o es pesado (o incluye ciclistas y peatones)		ligero / pesado	ligero / pesado	
Alumbrado de día para diferente largo de túneles	no hay alumbrado de día	50% del nivel de iluminación normal en la zona de umbral	nivel de iluminación normal en la zona de umbral	

7.9 Alumbrado nocturno

Si el túnel está en una sección de un camino iluminado, la calidad de la iluminación dentro del túnel deberá ser al menos igual al nivel de uniformidad y deslumbramiento de la carretera de acceso. La uniformidad en el alumbrado nocturno de túneles tendrá que cumplir los mismos requerimientos que la iluminación de día.

Si el túnel es una parte de un camino no iluminado, el promedio de luminancia de superficie del camino dentro no debe ser mayor de 20 cd/m^2 , la uniformidad total al menos de 40% y la uniformidad longitudinal al menos de 60%.

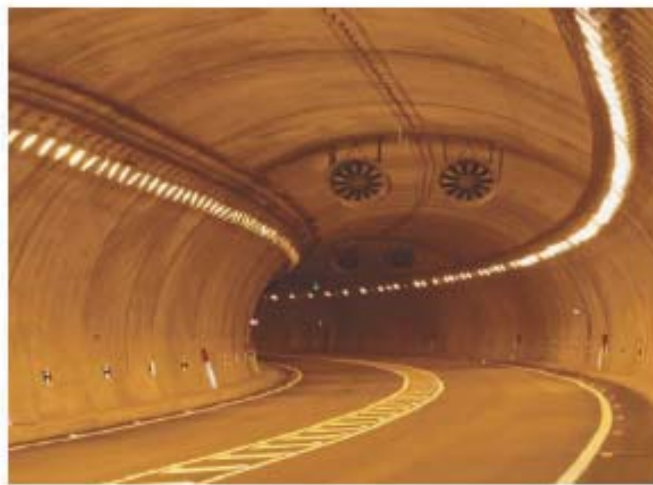
Dicho de otra forma, si el túnel se encuentra en un tramo de carretera iluminado, el alumbrado nocturno del túnel debe ser al menos igual al de la carretera de acceso, recomendándose de 1.5 a 2 veces los valores del tramo exterior, en lo que respecta al nivel de luminancia de la superficie de la carretera.

Las uniformidades de luminancia por la noche deberán satisfacer las mismas exigencias que en el caso del alumbrado diurno, ajustándose por tanto, a los valores mínimos establecidos en la Tabla 7.4. Todo lo anterior será igualmente aplicable para túneles de 100m de longitud que no estén iluminados durante el día.

Figura 7.28 Iluminación nocturna de túnel (Dominio Público) Túnel en Colombia



Túnel en España



En la siguiente gráfica se muestra el comportamiento de la pupila a lo largo de un túnel iluminado de noche, en donde el impacto por la diferencias de luminancias exteriores e interiores son mínimas, por lo que prácticamente el tiempo de adaptación de la pupila entre el exterior y el interior del túnel es mínimo.

Figura 7.29 Gráfica de adaptación de la pupila de noche (Fuente: CIE 88-2004)

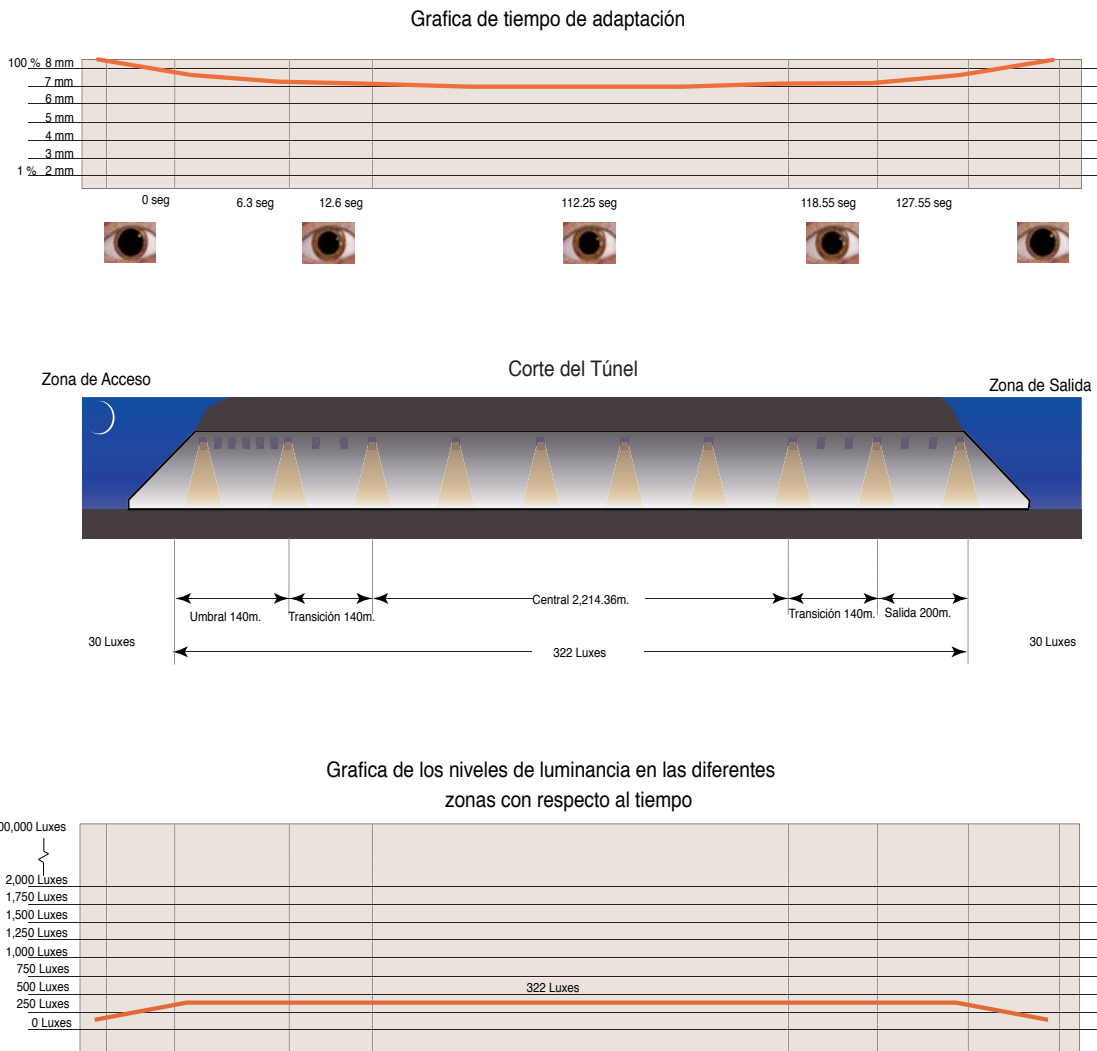


Figura 7.30 Diferencia entre acceso de día y de noche (Dominio Público)



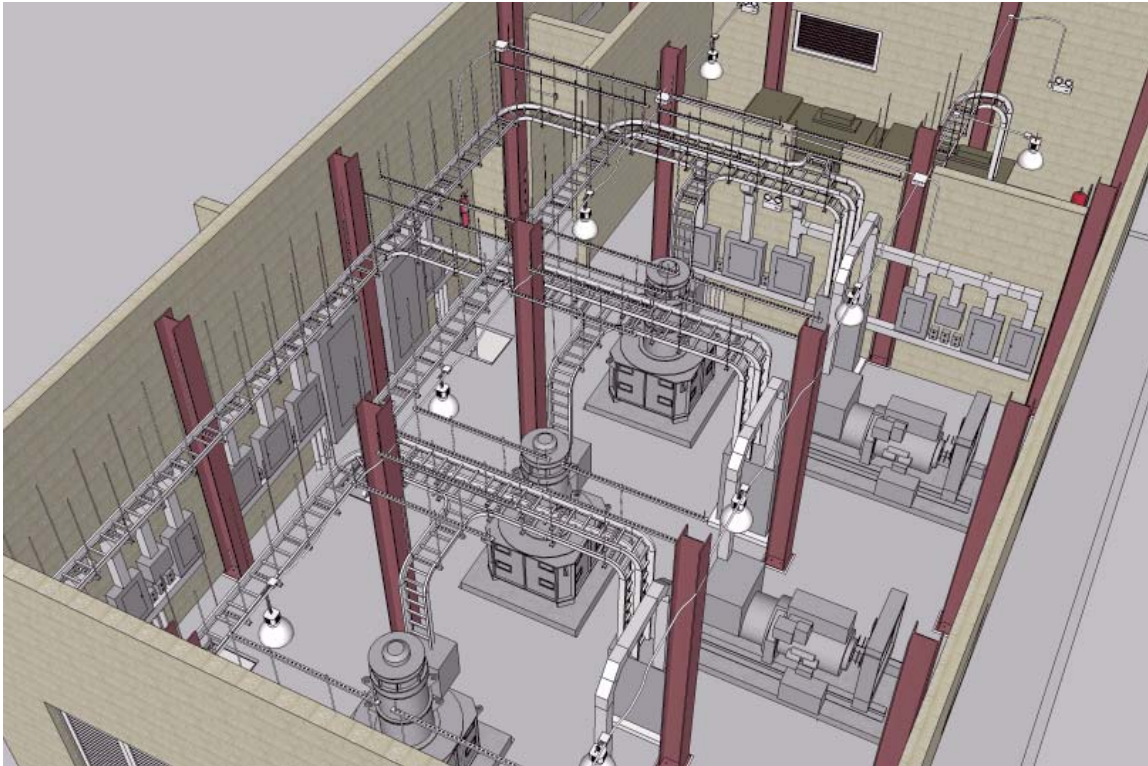
7.10 Casa de máquinas

Se nombra casa de máquinas, al local destinado para alojar tableros de distribución, equipos de control, sistemas de energía ininterrumpida ASTRONIC NO BREAK, planta de emergencia, transformador, subestación y tanque de combustible en la parte externa de la casa.

Figura 7.31 Casa de máquinas (Dominio Público)



Figura 7.32 Interior de casa de máquinas (Dominio Público)



Sistema Dinámico de Energía Ininterrumpida Sin Baterías

Con nueva tecnología actual se ha eliminado el alumbrado de emergencia en túneles cortos y largos, al ser instalados los sistemas de energía ininterrumpida; los cuales mantienen una constante operación de todos los sistemas interconectados, a dicho equipo sin el empleo de baterías (que ocasionan contaminación y altos costos de mantenimiento), se le denomina “ASTRONIC NO BREAK”.

Con la instalación de estos equipos, se logra un mínimo de mantenimiento y además, se mantiene constante el voltaje en todos los sistemas de iluminación, control, ventilación, etc. y en caso de que haya cortes en el suministro de energía por parte de CFE, la energía en el interior del túnel se mantiene constante al 100% evitando los peligrosos “apagones”.

Un ejemplo es la autopista México-Veracruz, en la cual están instalados cuatro túneles, las inmediaciones de Esperanza y que durante 14 años a la fecha de la edición de este manual, ha tenido magníficos resultados sin interrupción de los sistemas electromecánicos y de iluminación.

7.11 Sistemas Auxiliares

Control de incendios

Para este tipo de instalaciones es importante contar con un sistema de control automático, considerando que los niveles de la zona de umbral y de transición están establecidos en función de la luminancia de la zona de acceso.

Cuando las condiciones externas (diurnas) son variables, es preciso modificar los niveles de estas zonas para mantener la calidad de los criterios de diseño utilizados en un estudio de iluminación. Se requiere la instalación de un sistema de alumbrado como guía de conducción a las salidas de emergencia en caso de incendio.

En dicha instalación la separación entre luminarias deberá ser inferior a 50 m y se situarán en la pared del túnel a una altura aproximadamente de 0.5 m por encima de la superficie de la calzada.

Cuando desde cualquier lugar del interior del túnel sea visible al menos una de las salidas, no será necesario la instalación de un sistema de alumbrado para guía de conducción a la salida de emergencia en caso de incendio.

Requerimientos de túneles carreteros

Para los túneles mayores de 400 m, es indispensable que éstos estén dotados de los siguientes sistemas:

- Alumbrado
- Ventilación
- Sistemas contra incendio
- Megafonía
- Postes con telefonía de emergencia (SOS)
- Control de tráfico y circulación
- Circuito cerrado de televisión y sistema de incidencias DAI
- Equipos de señalización (semáforos, páneles, etc.), accionados desde un centro de monitoreo, para regular el tráfico en caso de accidentes, y sistemas fijos para evitar la entrada de vehículos de dimensiones mayores a su gálibo, tipo de carga, etc.

Los túneles a partir de 400m. requieren de un estudio completo de todos estos sistemas los cuales serán tratados en el " MANUAL DE SISTEMAS DE SEGURIDAD PARA TÚNELES CARRETEROS"

Figura 7.33 Señalizaciones de emergencia (Túnel en Austria) (Dominio Público)



7.12 Diseño de alumbrado de túnel

Términos de referencia para proyecto de túnel

1. CÁLCULO DE NIVELES DE ILUMINACIÓN CON NORMAS NOM-001-SEDE

- 1.1 Cálculo de niveles de iluminación diurna.
- 1.2 Cálculo de niveles de iluminación nocturna.
- 1.3 Cálculo de iluminación en zonas de acceso.

Los siguientes puntos se tratarán en el manual de Instalaciones Eléctricas:

2. CUADROS DE DISTRIBUCIÓN DE CARGAS

- 2.1 ALUMBRADO
- 2.2 FUERZA

3. CÁLCULO DE LA SUBESTACIÓN

4. SISTEMA DE ENERGÍA ININTERRUMPIDA

5. PLANTA DE EMERGENCIA

6. DIAGRAMA UNIFILAR

7. ESPECIFICACIONES DE EQUIPO

8. VENTILACIÓN

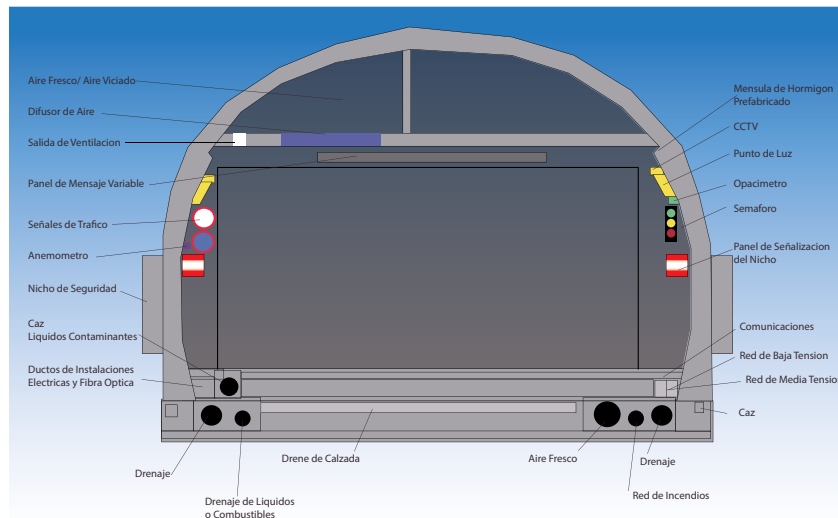
9. INSTALACIONES ESPECIALES EN TÚNEL

En túneles mayores de 600 m de longitud se requiere:

10. SISTEMA CONTRA INCENDIO (HIDRANTES, CISTERNA, EXTINTORES, ETC.)

11. EQUIPAMIENTO DE SEGURIDAD (teléfonos de emergencia, CCTV, paneles informativos, semaforización, megafonía, detectores de contaminantes, opacímetros y anemómetros).

Figura 7.34 Instalaciones requeridas en túneles largos (Dominio Público)



Ejemplo de iluminación de túneles

1. CÁLCULO DE NIVELES DE ILUMINACIÓN

El proyecto cuenta con un túnel unidireccional de 469 m

1.1 CÁLCULO DE NIVELES DE ILUMINACIÓN DIURNA

DATOS DEL TÚNEL:

Longitud promedio total en el interior del túnel = $L = 452$ m

Velocidad de proyecto = 80 km/h

$A = 7.77$ m = Ancho del túnel

$HM = 5.50$ m = ALTURA DE MONTAJE DE LA LUMINARIA

DIRECCIÓN: Norte - Sur.

Escena tipo 7

Nivel de iluminación promedio = 220 cd/m²

ZONA DE UMBRAL

Para el cálculo de iluminación de la ZONA DE UMBRAL se toma en cuenta la distancia mínima de seguridad de frenado de 140 metros, que corresponde a una velocidad de 80 km/h.

La NOM-001-SEDE, en su Artículo 930-3 (8) indica que a la distancia mínima de seguridad de frenado, menos 15 metros, corresponde, una longitud de 125 metros.

La longitud de la zona de umbral, lado "A" y "B" es de 125 metros, instalándose 86 luminarias, en ambos lados tipo Orión con carcasa de poliamida, provistas con una lámpara de V.S.A.P. de 250 w, sin refractor, cada una, colocadas a una interdistancia de 1.2 metros (Circuito Diurno), intercalando una luminaria cada 7.2 metros (Circuito Constante).

Circuito constante, con 17 luminarias, en ambos lados, provistas cada una con una lámpara de V.S.A.P. de 150 w, tipo Orión sin refractor.

DATOS LUMÍNICOS DE LUMINARIA

LUMINARIA CIRCUITO DIURNO:

$\Phi 1 = 33,200$ Lumen por lámpara de V .S. A .P. de 250 w.

TOTAL DE LUMEN POR LUMINARIA = 33,200 Lumen

LUMINARIA CIRCUITO CONSTANTE:

$\Phi 2 = 17,500$ Lumen por lámpara de V. S. A. P. de 150 w.

TOTAL DE LUMEN POR LUMINARIA = 17,500 Lumen

FÓRMULA PARA EL CÁLCULO DE ILUMINACIÓN PROMEDIO

$$NI = \Phi \times N^a \text{ LUMINARIAS} \times Fu \times FD \times Fm / L \times A$$

NI = NIVEL DE ILUMINACIÓN PROMEDIO EN LUX

Fu= FACTOR DE UTILIZACIÓN DEL LUMINARIA = 0.47

FD= FACTOR DE DEPRECIACIÓN DE LA LÁMPARA. = 0.9

Fm= FACTOR DE MANTENIMIENTO DE LUMINARIA =0.9

1.1.1 CÁLCULO DE NIVEL DE ILUMINACIÓN EN ZONA DE UMBRAL

Zona de Umbral = 125 m

A = 7.77 m = Ancho del túnel

HM = 5.50 m = ALTURA DE MONTAJE DE LUMINARIAS

Luminarias colocadas a cada 1.2 metros (Luminaria circuito diurno)

Luminarias colocadas a cada 7.2 metros (Luminaria Circuito Constante)

Luminarias colocadas del lado "A" en 125 metros = 86 de 33,200 lumen

= 17 de 17,500 lumen

Luminarias colocadas del lado "B" en 125 metros = 86 de 33,200 lumen

= 17 de 17,500 lumen

DE LA FÓRMULA: $NI = \Phi \times N^a \text{ LUMINARIAS} \times Fu \times FD \times Fm / L \times A$:

$$((172 \times 33,200) + (34 \times 17,500)) \times 0.47 \times 0.81 / (7.77 \times 125) = 2,471.52 \text{ LUX}$$

ZONA DE TRANSICIÓN

La longitud de la zona de transición, lado "A" y "B" es de 140 metros, instalándose 38 luminarias, en ambos lados, tipo Orión con carcasa de poliamida, provistas con una lámpara de V.S.A.P. de 250 w, sin refractor, cada una, colocadas a una interdistancia de 2.4 metros (Circuito diurno), intercalando una luminaria cada 7.2 metros (Circuito constante).

Circuito constante, con 19 luminarias, en ambos lados tipo Orión con carcasa de poliamida, provista con una lámpara de V. S. A .P. de 150 w, sin refractor.

1.1.2 CÁLCULO DE NIVEL DE ILUMINACIÓN EN ZONA DE TRANSICIÓN

Zona de transición = 140 m

A = 7.77 m = Ancho del túnel

HM = 5.50 m = ALTURA DE MONTAJE DE LA LUMINARIA

Luminarias colocadas a cada 2.4 m (Luminaria Circuito Diurno)

Luminarias colocadas a cada 7.2 m (Luminaria Circuito Constante)

Luminarias colocadas del lado "A" en 140 m = 38 de 33,200 lumen

= 19 de 17,500 lumen

Luminarias colocadas del lado "B" en 140 metros = 38 de 33,200 lumen

= 19 de 17,500 lumen

DE LA FÓRMULA: $NI = \Phi \times N^a \text{ LUMINARIAS} \times Fu \times FD \times Fm / L \times A$:

$$((76 \times 33,200) + (38 \times 17,500)) \times 0.47 \times 0.81 / (7.77 \times 140) = 1,115.78 \text{ LUX}$$

ZONA CENTRAL

La longitud de la zona central, lado "A" y "B" es de 47 metros, instalándose 6 luminarias, en ambos lados, tipo Orión con carcasa de pilaamida con una lámpara de V.S.A.P. de 150 w, sin refractor, colocadas a una interdistancia de 7.2 m (Circuito Constante).

1.1.3 CÁLCULO DE NIVEL DE ILUMINACIÓN EN ZONA CENTRAL

Zona de central = 47 m

A = 7.77 m = Ancho del túnel

HM = 5.50 m = ALTURA DE MONTAJE DE LA LUMINARIA

Luminarias colocadas a cada 7.2 metros de separación (Luminaria Circuito Constante)

Luminarias colocadas del lado "A" en 47 metros = 6 de 17,500 lumen

Luminarias colocadas del lado "B" en 47 metros = 6 de 17,500 lumen

DE LA FÓRMULA: $NI = \Phi \times N^a \text{ LUMINARIAS} \times Fu \times FD \times Fm / L \times A$:

$$12 \times 17,500 \times 0.47 \times 0.81 / (7.77 \times 47) = 218.91 \text{ LUX}$$

ZONA DE SALIDA

La longitud de la zona de salida, lado "A" y "B" es de 140 metros, instalándose 38 luminarias, en ambos lados tipo Orión con carcasa de poliamida, con una lámpara de V.S.A.P. de 250 w, sin refractor, colocadas a una interdistancia de 2.4 metros (Circuito Diurno), intercalando una luminaria cada 7.2 metros (Circuito onstante).

Circuito Constante, con 19 luminarias, en ambos lados, tipo Orión con carcasa de poliamida, con una lámpara de V.S.A.P. de 150 w, sin refractor.

1.1.4 CÁLCULO DE NIVEL DE ILUMINACIÓN EN ZONA DE SALIDA

Zona de Salida = 140 m

A = 7.77 m = Ancho del túnel

HM = 5.50 m = ALTURA DE MONTAJE DE LUMINARIAS

Luminarias colocadas a cada 2.4 m (Luminaria Circuito Diurno)

Luminarias colocadas a cada 7.2 m (Luminaria Circuito Constante)

Luminarias colocados del lado "A" en 140 m = 38 de 33,200 lumen

= 19 de 17,500 lumen

Luminarias colocados del lado "B" en 140 metros = 38 de 33,200 lumen

= 19 de 17,500 lumen

DE LA FÓRMULA: $NI = \Phi \times N^a \text{ LUMINARIAS} \times Fu \times FD \times Fm / L \times A$:

$((76 \times 33,200) + (38 \times 17,500)) \times 0.47 \times 0.81 / (7.77 \times 140) = 1,115.78 \text{ LUX}$

1.1.5 CÁLCULO DE NIVEL DE ILUMINACIÓN GENERAL EN EL INTERIOR DEL TÚNEL

Longitud promedio total en el interior del túnel = L = 452 metros

A = 7.77 m = Ancho del túnel

HM = 5.50 m = ALTURA DE MONTAJE DE LUMINARIAS

Luminarias colocadas del lado "A" en 452 metros = 162 de 33,200 lumen

= 61 de 17,500 lumen

Luminarias colocadas del lado "B" en 452 metros = 162 de 33,200 lumen

= 61 de 17,500 lumen

DE LA FÓRMULA: $NI = \Phi \times N^a \text{ LUMINARIAS} \times Fu \times FD \times Fm / L \times A$:

$((324 \times 33,200) + (122 \times 17,500)) \times 0.47 \times 0.81 / (7.77 \times 452) = 1,397.45 \text{ LUX}$

1.2 CÁLCULO DE NIVEL DE ILUMINACIÓN NOCTURNO

A lo largo del interior del túnel se colocaron en ambos lados, un total 122 luminarias (circuito constante) de 17,500 lumen, a una interdistancia de 7.2 metros.

$NI = 122 \times 17,500 \times 0.47 \times 0.9 \times 0.9 / (7.77 \times 452) = 231,43 \text{ LUX}$.

1.3 CÁLCULO DEL NIVEL DE ILUMINACIÓN NOCTURNO EN ZONA DE ACCESO

Zona de Acceso = Zona de preparación + Zona de aproximación.

Hay que tener en cuenta que aunque no se presente el efecto de “agujero negro” en la entrada, sí se puede dar en la salida. Por ello es recomendable iluminar la carretera a partir de la salida durante un mínimo de 140 m para ayudar a la adaptación visual, en este caso en particular en ambos lados del túnel.

Para las zonas de Aproximación (Z aprox.) de acuerdo al Art. 930.6 (a) 2, las vialidades de entrada y salida del túnel deberán tener un nivel de luminancia no menor a 1/3 del nivel del interior del túnel, al menos por una distancia mínima a la de seguridad de frenado (140 m), es decir:

$$Z_A = 8 \text{ cd/m}^2 / 3 = 2.66 \approx 3 \text{ cd/m}^2$$

$$Z_A = 3 \text{ cd/m}^2 / 0.07 = 42.857 \approx 43 \text{ lux. Para 140 metros mínimo.}$$

De acuerdo a la tabla 930-6(c). Valores mínimos mantenidos de iluminancia promedio (lux) para vialidades de acceso del tipo R2 es de 14 lux, puesto que la vialidad (Zpreparación) es unidireccional; entonces la iluminancia para ambos lados (carril izquierdo y derecho) es:

$$Z_{\text{acceso}} = 3 \times 14 \text{ lux} = 42 \text{ lux}$$

Este valor de iluminancia deberá mantenerse en forma distribuida en una distancia de 140 metros; es de notar que la relación entre la zona de preparación y la de aproximación es de 3 a 1 aproximadamente en dirección de salida en ambos portales y viceversa.

El material de poliamida es ligero, resistente a la corrosión en zonas de alta salinidad, propio para luminarias tipo exterior (aunbrado público) e interior (túneles).

Además, mediante este recubrimiento el riesgo de electrocución desaparece.

REFERENCIAS

- REF 1 Manual CIE 132 - (1999).
- REF 2 Manual CIE 132 - (1999).
- REF3 CIE 132 - (1999), pág. 6.
- REF 4 Reglamento de eficiencia energética en instalaciones de alumbrado exterior. (Abril 2009)
- REF 5 Luminotecnia, Iluminación de interiores y exteriores. <http://edison.upc.edu/curs/ilum>.
- REF 6 Philips. Outdoor Luminaries. Catalogue 2010 - 2011.
- REF 7 Philips. Outdoor Luminaries. Catalogue 2010 - 2011.
- REF 8 Philips. Outdoor Luminaries. Catalogue 2010 - 2011.
- REF 9 Philips. Outdoor Luminaries. Catalogue 2010 - 2011.
- REF 10 Clasificación CIE (1965).
- REF 11 Datos Fide 28 de agosto de 2012.
- REF 12 CIE - (1977) Pub 12.2.
- REF 13 CIE - (1977) Pub 12.2.
- REF 14 CIE - (1977) Pub 12.2.
- REF 15 CIE - (1977) Pub 12.2.
- REF 16 (1989) SCT Manual de Alumbrado Vial, pág. 30.
- REF 17 (1989) SCT Manual de Alumbrado Vial, pág. 45.
- REF 18 CIE (1977) Pub 12.2.
- REF 19 (1989) SCT Manual de Alumbrado Vial.
- REF 20 CIE No. 47 (1997)
- REF 21 CIE 30.2:1982.
- REF 22 CIE 115:1995.
- REF 23 CIE 31 - 1976 Deslumbramiento y uniformidad de las calles.

Nota: La información contenida en cuadros, gráficos e infográficos cuya fuente no se indica, es de elaboración propia.

BIBLIOGRAFÍA

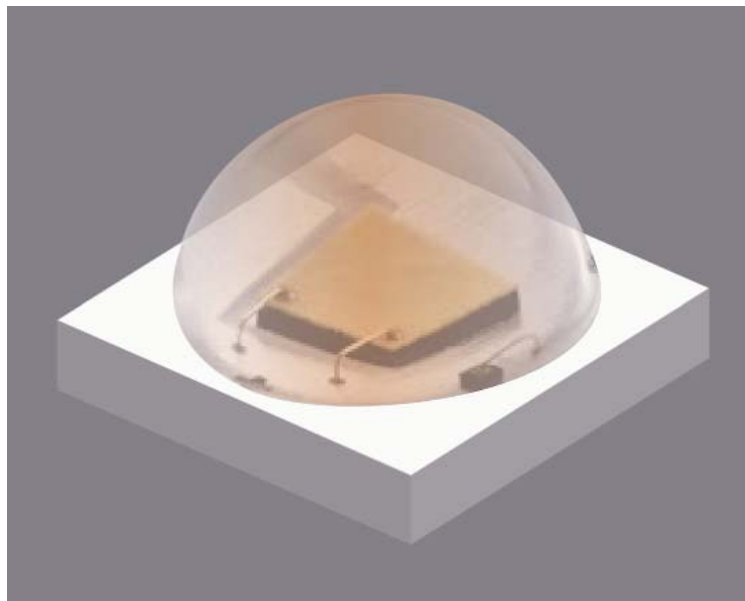
- CIE 61 (1984) *Tunnel entrance lighting: A survey of fundamentals for determining the luminance in the threshold zone.*
- CIE 88 (2004) *Guide for the lighting of road tunnels and underpasses,* Viena, Austria.
- CIE 115. (1995) *Recommendations for the lighting of roads for motor and pedestrian traffic,* Viena, Austria
- CIE 126 (1997) *Guidelines for minimizing sky glow.* Viena, Austria.
- CIE 132 (1999) *Design methods for lighting of roads,* Viena, Austria.
- CIE 140 (2000) *Road lighting calculations,* Viena, Austria.
- CIE 144 (2001) *Road surface and road marking reflection characteristics,* Viena, Austria.
- CIE 146 (2002) *CIE Equations for disability glare,* Viena, Austria.
- CIE 147 (2002) *Glare from small, large and complex sources,* Viena, Austria.
- CIE 180 (2007) *Road transport lighting for developing countries,* Viena, Austria.
- CIE 022 *Proceedings of the 2th CIE Expert Symposium on LED Measurement.* Viena, Austria.
- CIE (2005) *Expert Symposium, Vision and lighting in mesopic conditions,* Viena, Austria.
- AFE (2002) *Recommandations relatives à l'éclairage des voies publiques,* Paris, Francia: Editions Lux
- AFE (2006) *Éclairages extérieurs, Les nuisances dues à la lumière,* Paris, Francia: Editions Lux
- Ministerio de fomento, 2006. *Recomendaciones para la iluminación de carreteras y túneles.*
- MOVE (2004) *Mesopic Optimisation of Visual Efficiency Helsinki University of Technology.*
- Greg Ward 2005. *High Dynamic Range Image Encodigs.*
- Ing. Horacio López Díaz, 1976. *Tecnología del alumbrado en vialidades principales Edo de México,* México
- PHILIPS. *Outdoor Luminaries. Catalogue 2010-2011.* México.
- OSRAM *Catálogo 2009-2010.* México.

Tecnología de Drivers de LEDs

El color de la luz emitida depende de la composición química del material del semiconductor usado y puede ser cercano al ultravioleta, visible o infrarrojo. El uso de los LEDs hoy en día es más frecuente, sustituyen a las lámparas incandescentes tradicionales y tubos fluorescentes en muchas aplicaciones.

A diferencia de las lámparas incandescentes ordinarias, los LEDs tienen un filamento que no es propenso a fallar y tienden a funcionar a menos temperatura.

Figura 4.1 LED



Las lámparas incandescentes gastan un 95% de la energía que consumen en calor.

Los tubos fluorescentes son más eficientes, pero su color desagradable ha hecho que no hayan penetrado completamente en el mercado de la iluminación.¹

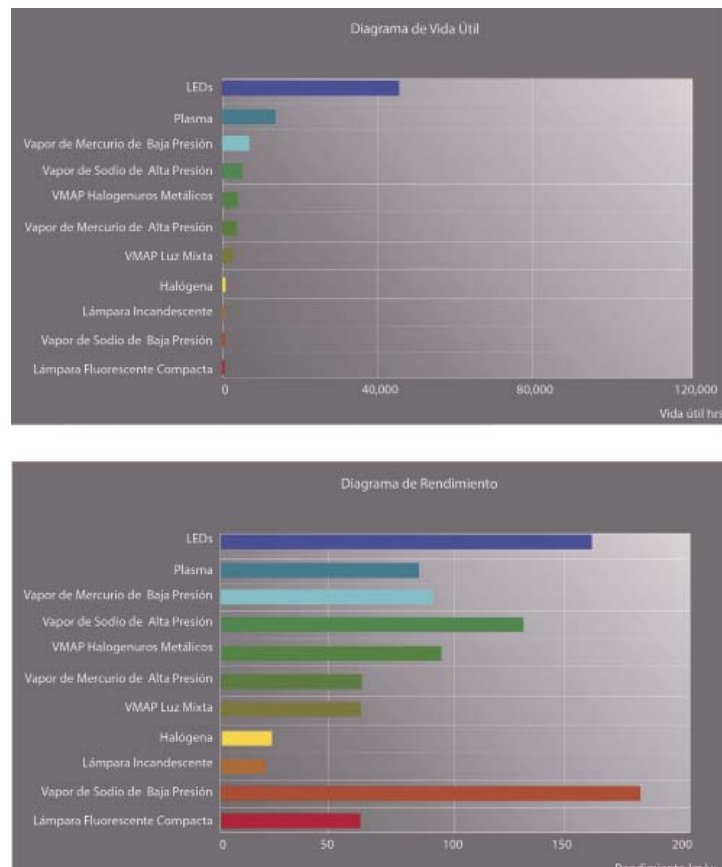
¹ UNE-EN 62031:2009. Módulos LED para alumbrado general. Requisitos de seguridad.

Tabla 4.1 Tiempos de vida rendimiento de las tecnologías de iluminación²

SISTEMA DE ALUMBRADO	VIDA ÚTIL	RENDIMIENTO
INCANDESCENCIA		
LÁMPARA INCANDESCENTE	1.000h	12-18lm/W
HALÓGENA	2.000h	18-22lm/W
LÁMPARA DE DESCARGA		
VAPOR DE MERCURIO DE BAJA PRESIÓN	5.000-15.000h	38-91lm/W
VAPOR DE MERCURIO DE ALTA PRESIÓN (VMAP)	8.000h	40-60lm/W
VMAP-luz de mixta	6.000h	20-60lm/W
VMAP-HALÓGENOS METÁLICOS	9.000h	60-95lm/W
VAPOR DE SODIO DE BAJA PRESIÓN	6.00-8.00h	160-180lm/W
VAPOR DE SODIO DE ALTA PRESIÓN	8.00-12.000h	130lm/W
LÁMPARA FLUORESCENTE COMPACTA	8.00h	60lm/W
PLASMA		
PLASMA	30.000h	85lm/W
ILUMINACIÓN DE ESTADO SÓLIDO		
LEDs	≥100.000h	≥160lm/W (y creciendo)

² GAGO CALDERÓN, FRAILE VILARRASA, ILUMINACIÓN CON TECNOLOGÍA LED, ED PARANINFO, S.A., PAG.66

Figura 4.2 Comparativa tiempo de vida fuentes luminosas



Características del LED

Los mejores LEDs logran 70 por ciento de mantenimiento de lúmenes en 50,000 horas de operación en condiciones de uso estándar. Que la luminaria remueva el calor excesivo del paquete manteniendo la unión de la matriz del LED debajo de la temperatura registrada más elevada durante la operación del sistema es el requisito crítico de un sistema de LED exitoso.

En LEDs de conversión de fósforo (fósforos añadidos al material encapsulante que convierten el color del LED de azul a blanco), el material en forma de domo en algunos paquetes puede eventualmente oscurecerse porque la luz azul afecta a la resina transparente. El oscurecimiento causa una degradación rápida en la salida de luz por lo que es importante entender qué tipo de LED de luz blanca está siendo usada en una aplicación para asegurar la vida útil del LED.

Se recomienda que el fabricante de la luminaria o del LED proporcione curvas de mantenimiento del lumen que claramente especifiquen el porcentaje medio de flujo luminoso inicial disponible de los LEDs siendo usados sobre los sistemas de las horas de operación esperadas del sistema de iluminación. La degradación del sistema de luz LED es extremadamente dependiente del diseño de manejo de calor, selección de los componentes de soporte, y control del proceso de fabricación.

En este sentido, también se debe de pedir una curva de la degradación total de la salida de luz del sistema.³

³ UNE-EN 62471:2009. Seguridad fotobiológica de lámparas y de los aparatos que utilizan lámparas.

Tabla 4.2 Rendimiento de una lámpara LED desde 2002 y datos objetivos proyectados⁴

Tecnología	LED AÑO 2002	LED AÑO 2007	LED AÑO 2012	LED AÑO 2020	Incandescente AÑO 2002	Fluorescente AÑO 2002
Eficacia Luminosa (lm/W)	25	75	150	200	16	>85
Duración (khr)	20	>20	>100	>100	1	>20
Flujo (lm/lamp)	25	200	1000	1500	1200	3000
Energía de entrada (W/lamp)	1	2.7	6.7	7.5	75	32
Costo de lúmenes (\$/klm)	300	20	<5	<20.4	1.5	
Costo de lámparas (\$/lamp)	5	4	<5	<3	0.5	5
Índice de reproducción Cromática (CRI)	75 - 90	80 - 90	80 - 90	80 - 90	100	>80
Temperatura del Chip (°C)	100	300-600	500-750	600-1000		
Densidad de la Energía de entrada (W/cm ²)	100	300-600	500-750	600-1000		

⁴ IESNA TM-16-05 Memorándum técnico en sistemas y fuentes de diodos emisores de luz (LEDs)

Ventajas de los LEDs¹

Los LEDs ofrecen varias alternativas de producción de energía luminosa.

- Eficiencia luminosa

Unas de las características fundamentales que hacen que los LEDs sean interesantes para la iluminación son su bajo consumo y su alta eficiencia por lo que una gran parte de la energía que consumen es transformada en luz. Esto mismo implica un ahorro económico de energía eléctrica. Supera en eficiencia a las lámparas fluorescentes, los “focos ahorradores” o a la lámpara de vapor de sodio. La eficiencia se mide en lumen/Watts (Cantidad de Luz/Energía eléctrica) e indica cuántos Watts cuesta producir un lumen de Luz.

- Mayor Resistencia a golpes y vibración

El chip del LED se recubre en un encapsulado de resina, el cual es resistente a caídas y golpes. Si un LED se cae no se rompe como una lámpara incandescente, un tubo fluorescente, una lámpara de vapor de sodio, y/o un tramo de neón.

- Mayor vida útil

El LED tiene una vida útil de entre 50,000 y 80,000 horas de uso. Esto contrasta en gran medida con las 1,000 -15,000 horas que proporciona una lámpara incandescente o una lámpara fluorescente, quedando por debajo de las prestaciones que nos ofrecen los LEDs.

- Bajo Voltaje de Trabajo

El mercado ofrece disponibilidad de productos que trabajan en voltajes estándar como son: 5V, 12V y 24V. Siendo la mayoría de una alimentación de 12V. Estos voltajes son muy bajos para poder ocasionar descargas accidentales debidas a humedad por ejemplo. No se manejan transformadores de alta tensión como son requeridos para las lámparas fluorescentes y el neón.

- Facilidad de Control

El LED es un elemento tan versátil que nos permite generar pantallas de visualización, tiras flexibles de LED, tiras de módulos. Los vehículos actualmente están sustituyendo sus luces por luz LED. Los actuales teléfonos celulares utilizan LEDs para proporcionar indicaciones, iluminar el teclado y para proporcionar la iluminación nocturna a la pantalla del mismo, por citar algunos ejemplos.

- Menor Mantenimiento

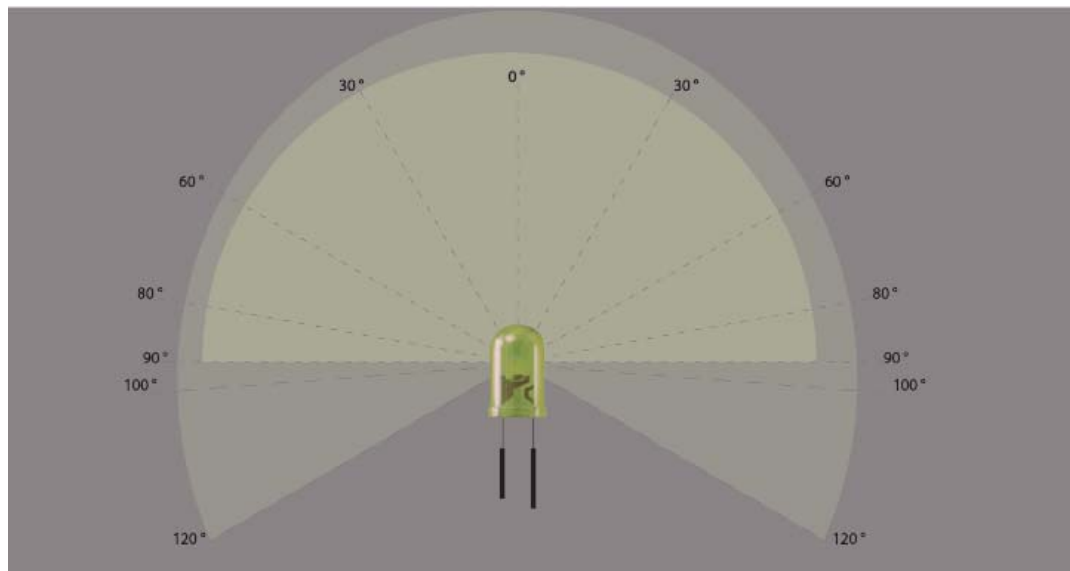
Su larga vida útil permite asegurar que durante la vida del producto, el componente operará regularmente. Con los cuidados básicos el producto LED no requiere mantenimiento durante su periodo de vida útil (en promedio 50,000 hrs.).

Parámetros más importantes en una luminaria de LED

- Ángulo de Emisión

Es el ángulo donde se emite la mayor cantidad de Luz. Se especifica generalmente el ángulo en el que la intensidad luminosa decae al 50%. Los valores más comunes encontrados son de 90 y de 120 grados.

Figura 4.3 Ángulos de emisión



- Flujo o intensidad luminosa

El flujo luminoso se refiere a la luz total disponible de un LED y es medido en lúmenes (lm). Esta cantidad varía de acuerdo al color del LED, y depende de la densidad de corriente de la matriz del LED que puede gestionar. Las propiedades del paquete también limitan la corriente eléctrica que puede ser conducido de forma segura a través de los ensambles LED. El dispositivo más actual de LED puede manejar, el flujo más luminoso que va a producir.

- Consumo de Energía

Otro punto importante y trascendental es el bajo consumo de energía que tiene el producto. Se sabe que entre menos energía consume un equipo, menor será el desembolso por concepto de electricidad por la operación de un letrero, y este es uno de los más grandes alicientes. Adicionalmente se tiene la ventaja ecológica, ya que al consumir menos energía, disminuye el CO₂ en la atmósfera.

Tiempo de vida y cuidados de los LEDs

El LED tiene condiciones de trabajo donde se puede desempeñar mucho mejor y de esta forma llegar a extender más su tiempo de vida y sufrir menor degradación en su capacidad para producir luz. Para ello indispensable cuidar dos parámetros:

■ Voltaje de Alimentación

Este parámetro es muy importante ya que si se alimentan deficientemente se provoca un deterioro prematuro del dispositivo.

Cuando se utiliza un producto de luz LED que funciona directamente al tomacorriente; todo el circuito electrónico necesario para su funcionamiento ya se encuentra incluido. La efectividad de la alimentación es producto y responsabilidad del fabricante y más específicamente de los involucrados en su diseño. En ocasiones, para tener productos baratos, se compromete el diseño electrónico, generando productos que no pueden obtener la larga vida que el LED tiene de manera inherente.

En caso de utilizar productos que requieren de alimentación externa, ésta debe de cumplir requerimientos de estabilidad y de ser posible de mayor eficiencia. Para los productos que trabajan a 12V se recomienda que el voltaje de alimentación se encuentre entre 11.8V a 12.2V. Un máximo de 12.4V aún se puede considerar pertinente.

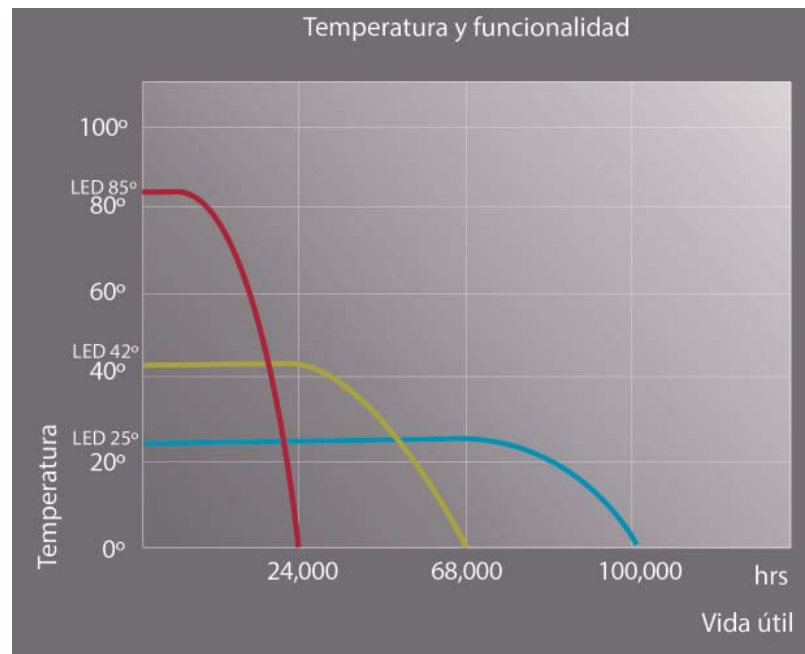
Se recomienda ampliamente el uso fuentes conmutadas. Estas fuentes tienen la ventaja de poder proporcionar alta eficiencia en la conversión de corriente alterna a corriente directa (se aproximan al 95% de eficiencia), en contraposición a las fuentes reguladas lineales que llegan a tener alrededor de un 75% de eficiencia. La fuente también se debe adquirir según el lugar donde se vaya a instalar.

Las fuentes de uso interior generalmente se construyen sin protección para derrames de líquidos; punto totalmente necesario para una fuente de uso exterior, pues al estar en el exterior tendrán que soportar las condiciones climáticas imperantes en el ambiente (lo cual no implica su exposición directa al sol). Estas fuentes, además de ofrecer la mayor eficiencia en la conversión de energía, también dan ventajas adicionales, como el de realizar un arranque suave. Esto quiere decir que cuando se enciende el sistema, la fuente no saca el voltaje de golpe, si no que en un periodo de unos milisegundos lleva la salida hasta su voltaje nominal. Esto ayuda a no inyectar picos de corrientes en la red eléctrica. Otra ventaja que ofrece este tipo de fuente es el hecho de poder detectar sobre-corrientes, reaccionando generalmente con un apagado de su salida y dejando transcurrir un poco de tiempo antes de volver a intentar encender el sistema.

■ Temperatura

La temperatura es un parámetro que afecta siempre a todos los semiconductores. El mejor rango en la temperatura de trabajo de todo semiconductor se encuentra entre los -10 y los 25 grados centígrados. Condiciones de trabajo que raramente encontramos. Un LED generalmente se construye para soportar una temperatura de trabajo de hasta 85 grados centígrados; sin embargo, no se recomienda que la temperatura de trabajo supere los 42 grados. Entre mayor sea la temperatura de trabajo, más rápido se degradará el LED, acortándose su tiempo de vida.



Figura 4.4 Temperatura y funcionalidad de los LEDs



Productos Existentes

Se enumeran los productos que como fabricantes de anuncios luminosos, stands publicitarios, aplicaciones arquitectónicas y de ambientación; puedan ser de utilidad.

A continuación se muestra una lista representativa de las aplicaciones de LEDs en distintas modalidades:

Módulos de Luz LED	
Tira flexible	
Spot Light	
Tubo luminoso	
Wall Washer (o proyector)	

Grado IP para fuentes luminosas

El IP (Índice de Protección) es un valor que indica el nivel de protección que ofrece un producto en contra de intrusión de objetos sólidos, polvo y agua (aplica tanto para LEDs como para fuentes de alimentación). Este estándar fue desarrollado por la Comisión de Electrotecnia Internacional. El código del índice de protección esta formado por las siglas IP seguido de dos valores (IPxy).

Tabla 4.3 Grados de protección indicados por la primera cifra característica (x)²

Valor x	Grado de Protección	
	Descripción abreviada	Indicación breve sobre los objetos que no deben penetrar en la envolvente
0	Sin protección	Sin protección particular
1	Protección contra los cuerpos sólidos de más de 50 mm	Cuerpos sólidos con un diámetro superior a 50 mm
2	Protección contra los cuerpos sólidos de más de 12 mm	Cuerpos sólidos con un diámetro superior a 12 mm
3	Protección contra los cuerpos sólidos de más de 2.5 mm	Cuerpos sólidos con un diámetro superior a 2.5 mm
4	Protección contra los cuerpos sólidos de más de 1 mm	Cuerpos sólidos con un diámetro superior a 1 mm
5	Protección contra la penetración de polvo	No se impide totalmente la entrada de polvo, pero sin que el polvo entre en cantidad suficiente que llegue a perjudicar el funcionamiento satisfactorio del equipo.
6	Con total protección contra el polvo	Ninguna entrada de polvo

Tabla 4.4 Grados de protección indicados por la segunda cifra característica (y)²

Valor y	Grado de protección	
	Descripción abreviada	Indicación breve sobre los objetos que no deben penetrar en la envolvente
0	Sin protección.	Sin protección particular
1	Protección contra la caída vertical de gotas de agua	La caída vertical de gotas de agua no deberá tener efectos perjudiciales.
2	Protección contra la caída de gotas de agua con una inclinación máxima de 15°	Las caídas verticales de gotas de agua no deberán tener efectos perjudiciales cuando la envolvente esta inclinada hasta 15° con respecto a la posición normal.
3	Protección contra la lluvia fina (pulverizada)	El agua pulverizada de lluvia que cae en una dirección que forma un ángulo de hasta 60° con la vertical, no deberá tener efectos perjudiciales.
4	Protección contra las proyecciones de agua	El agua proyectada en todas las direcciones sobre la envolvente no deberá tener efectos perjudiciales.
5	Protección contra los chorros de agua	El agua proyectada con la ayuda de una boquilla, en todas las direcciones, sobre la envolvente, no deberá tener efectos perjudiciales.
6	Protección contra fuertes chorros de agua o contra la mar gruesa	Bajo los efectos de fuertes chorros o con agua de mar gruesa, el agua no deberá penetrar en la envolvente en cantidades perjudiciales.
7	Protección contra los efectos de la inmersión	Cuando se sumerja la envolvente en agua en unas condiciones de presión y con una duración determinada, no deberá ser posible la penetración de agua en el interior de la envolvente en cantidades perjudiciales.
8	Protección contra la inmersión prolongada	El equipo adecuado para la inmersión prolongada en agua bajo las condiciones especificadas por el fabricante. Nota: Esto significa normalmente que el equipo es rigurosamente sellado. No obstante para ciertos tipos, esto puede significar que el agua pueda penetrar pero sólo de manera que no produzca efectos perjudiciales.
<p>Los procedimientos especializados de limpieza no están cubiertos por los grados de protección IP. Se recomienda que los fabricantes suministren, si es necesario, una adecuada información en lo referente a los procedimientos de limpieza. Esto está de acuerdo con las recomendaciones contenidas en la CEI 60529 para los procedimientos de limpieza especiales.</p>		

² Código IP: UNE 20324 y Norma Europea EN 60529

Características de los Drivers utilizados en las luminarias LEDs

Los circuitos de los drivers de los LEDs están disponibles en una gran variedad de topologías, incluyendo drivers serie (modo conmutado – switchmode) y drivers paralelo (no basados en inductor). La selección la topología apropiada depende de lo siguiente:

- La relación de la tensión del LED con respecto al rango de la tensión de la batería.
- Eficiencia - crucial para controlar LEDs de brillo elevado (HB) como los utilizados en la electrónica de automoción.
- El consumo de corriente requerido durante el tiempo de apagado.
- Capacidad para regular con precisión la corriente del LED, elimina la necesidad de las resistencias de los balastos.
- Se requieren características de atenuación luminosa.
- Solución total en cuanto a tamaño y costo.

Los circuitos del driver de los LEDs tienden a ser más pequeños de tamaño en comparación a las soluciones alternativas, aumentando su demanda en aplicaciones de alimentación portátil y con restricciones de espacio. Entre las configuraciones populares del driver de los LEDs en modo conmutado (switchmode) se incluyen: buck, boost, buckboost y SEPIC, con la capacidad de controlar desde 25 mA / LED a 1,5 A / LED o incluso más.

Figura 4.5 Driver



Los drivers de los LEDs de la serie basada en 'boostconverter' ofrecen el mejor acoplamiento posible entre brillo y elevada eficacia debido al 'boosting' basado en inductor. Las pistas de las tarjetas de circuito impreso (PCB) se reducen también al mínimo mediante la topología del driver serie, permitiendo flexibilidad en los dispositivos electrónicos portátiles con restricciones de espacio.

Las corrientes más elevadas en los LEDs dan como resultado tensiones directas más elevadas en ellos y viceversa. La tensión directa también varía inversamente con la temperatura.