



ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ D. C.
UNIDAD EJECUTIVA DE SERVICIOS PÚBLICOS
MANUAL ÚNICO DE ALUMBRADO PÚBLICO

CAPÍTULO II

FUNDAMENTOS

Revisión 00

Fecha 27-09-01

Pág. i de ii

TABLA DE CONTENIDO

2	FUNDAMENTOS	1
2.1	FÍSICA DE LA LUZ	1
2.1.1	Conceptos fundamentales	1
2.1.1.1	Naturaleza de la luz	1
2.1.1.2	Producción de la luz	1
2.1.1.3	Características de la radiación luminosa	2
2.1.1.4	Luz natural	3
2.1.1.5	Luz artificial	3
2.1.2	Modelo físico y matemático de la luz	4
2.1.2.1	Radiación de cuerpo negro	4
2.1.2.2	Fenómeno de la luminiscencia	5
2.2	LUZ Y VISIÓN	9
2.2.1	El ojo humano	9
2.2.2	Curva de sensibilidad del ojo humano	11
2.2.3	Capacidad visual	13
2.2.4	Percepción	13
2.2.5	Adaptación	14
2.2.6	Acomodación y Agudeza	14
2.2.7	Factores que influyen en la visión	15
2.3	COLOR	18
2.3.1	Conceptos básicos sobre el color	18
2.3.2	Mezcla de colores	19
2.3.3	Designación del color CIE	19
2.3.4	Designación de color sistema Munsell®	22
2.3.5	Colorimetría de las fuentes luminosas	24
2.3.5.1	Temperatura de color	27
2.3.5.2	Rendimiento de color	27
2.3.5.3	Índice de reproducción cromática	29
2.3.6	Influencia psicofisiológica del color	30
2.4	LEYES DE LA LUMINOTECNIA	31
2.4.1	Ley de la inversa del cuadrado	31
2.4.2	Ley del Coseno	32
2.4.3	Iluminación horizontal	32
2.4.4	Iluminación vertical	33
2.4.5	Reflexión	34
2.4.6	Refracción	35

	ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ D. C. UNIDAD EJECUTIVA DE SERVICIOS PÚBLICOS MANUAL ÚNICO DE ALUMBRADO PÚBLICO		CAPÍTULO II
	FUNDAMENTOS		Revisión 00
			Fecha 27-09-01
			Pág. ii de ii
2.4.7	Absorción	36	
2.5	FOTOMETRIA	36	
2.5.1	Unidades fotométricas	36	
2.5.2	Intensidad luminosa	37	
2.5.3	Flujo luminoso	37	
2.5.4	Eficacia lumínica	37	
2.5.5	Iluminancia	38	
2.5.6	Luminancia	39	
2.5.6.1	Contraste de luminancia	40	
2.5.6.2	Deslumbramiento	41	
2.6	CÁLCULOS LUMÍNICOS	42	
2.6.1	Cálculo de la iluminancia en un punto	42	
2.6.2	Cálculo de la Iluminancia media de una vía	43	
2.6.2.1	Método europeo de los 9 puntos	43	
2.6.2.2	Cálculo de iluminancia por el coeficiente de utilización	44	
2.6.2.3	Cálculos computarizados de iluminancia	47	
2.6.3	Cálculo de la uniformidad general de iluminancia en una instalación de alumbrado público	47	
2.6.4	Cálculo de la luminancia en un punto	48	
2.6.4.1	Generalidades	49	
2.6.4.2	Coeficiente de luminancia.	49	
2.6.4.3	Coeficiente de luminancia reducido	50	
2.6.4.4	Clasificación de las superficies de las calzadas (estado seco)	51	
2.6.4.5	Las tablas R	52	
2.6.4.6	Ejemplo de cálculo paso a paso	57	
2.6.5	Cálculo de la Luminancia promedio sobre la vía	58	
2.6.6	Cálculo de la uniformidad general de luminancia en una instalación de alumbrado público	59	
2.6.7	Cálculo de la uniformidad longitudinal de luminancia en una instalación de alumbrado público	59	
2.6.8	Cálculo de la luminancia de velo (L_v)	60	
2.6.9	Cálculo del incremento del umbral (T_i) en una instalación de alumbrado público	61	
2.6.10	Cálculo del Índice de confort (G) en una instalación de alumbrado público	62	
2.6.11	Cálculo del valor SR	63	



ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ D. C.
UNIDAD EJECUTIVA DE SERVICIOS PÚBLICOS
MANUAL ÚNICO DE ALUMBRADO PÚBLICO

CAPÍTULO II

FUNDAMENTOS

Revisión 00

Fecha 27-09-01

Pág. 1 de 64

2 FUNDAMENTOS

El presente capítulo contiene información específica sobre los elementos de física aplicables a la teoría de la luz, los elementos constitutivos del fenómeno de la visión humana y la teoría general del color aplicable tanto a la visión como a la colorimetría de las fuentes luminosas. Finalmente se hace un resumen de los conceptos de fotometría aplicada, que incluye el manejo matemático de las principales funciones utilizadas en luminotecnia.

2.1 FÍSICA DE LA LUZ

El propósito del presente capítulo es definir los conceptos necesarios para comprender y evaluar el fenómeno físico de la luz, desde la perspectiva de la teoría física actual, de tal modo que su conocimiento oriente al lector acerca de sus aplicaciones.

2.1.1 Conceptos fundamentales

2.1.1.1 Naturaleza de la luz

La luz es una forma de energía radiante capaz de producir sensaciones visuales. Esta energía es un conjunto de radiaciones electromagnéticas cuya longitud de onda varía entre 3.800 y 7.800 Ångstrom (Å). Dicha banda se conoce como espectro visible.

El ojo humano capta cada una de estas longitudes de onda con una eficiencia diferente. Si predomina una cualquiera de estas longitudes, el ojo la capta como un color en particular. Si todas las longitudes de onda tienen la misma intensidad, formando un espectro continuo, el ojo la capta como luz blanca. Este fenómeno se explica mas ampliamente en el numeral 2.3 sobre la teoría del color, en el presente manual.

2.1.1.2 Producción de la luz

Existe una gran variedad de formas de producir luz artificialmente, no obstante y para los fines prácticos las dos principales formas son: la INCANDESCENCIA y la LUMINISCENCIA. La incandescencia es el fenómeno por el cual un cuerpo emite luz cuando su temperatura sobrepasa los 600 °C. Los filamentos de las bombillas incandescentes son la aplicación práctica más importante de este efecto.



La luminiscencia se produce cuando hay una descarga eléctrica entre electrodos, en un medio gaseoso o un vapor metálico. Esto requiere condiciones apropiadas de tensión y corriente. El color de la luz producida depende del gas o vapor empleado y el espectro resultante no es continuo, en general, como en las bombillas incandescentes.

2.1.1.3 Características de la radiación luminosa

Por ser la luz una radiación electromagnética, su velocidad de propagación en el vacío es de 299×10^3 km./s. La longitud de onda y la velocidad pueden alterarse cuando ésta pasa a través de un medio transparente, pero la frecuencia permanece fija independiente del medio.

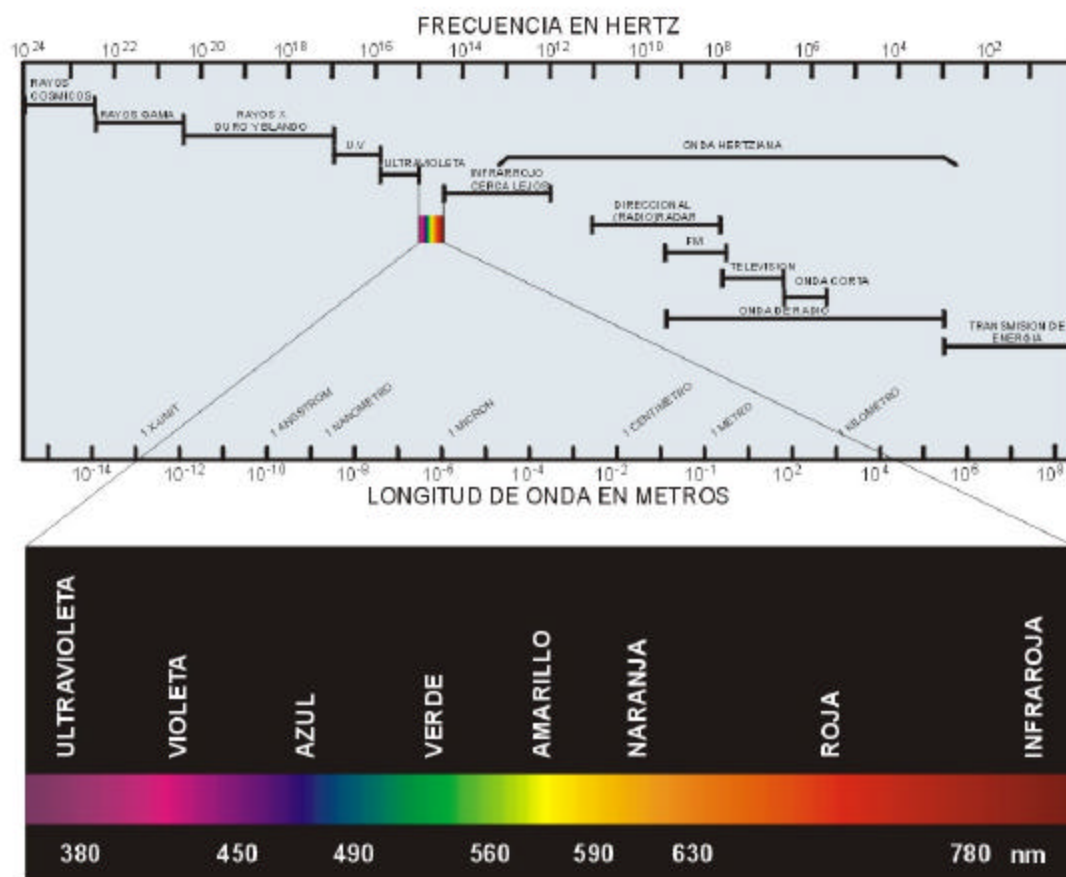


Figura 2.1. Características de la radiación luminosa

Las ondas luminosas del espectro visible y cualquiera que sea su longitud, viajan con la misma velocidad a través del espacio, pero en un ambiente transparente (de densidad diferente a la del aire),



ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ D. C.
UNIDAD EJECUTIVA DE SERVICIOS PÚBLICOS
MANUAL ÚNICO DE ALUMBRADO PÚBLICO

CAPÍTULO II

FUNDAMENTOS

Revisión 00

Fecha 27-09-01

Pág. 3 de 64

los rayos azules de longitud de onda más corta viajan más lentamente que los rayos rojos, lo que explica el por qué de la descomposición de colores en un prisma, fenómeno que revela el espectro de la luz y permite su estudio.

Una correlación entre las diferentes longitudes de onda de la radiación electromagnética y los colores percibidos por el ojo humano se establecen en la figura 2.1

2.1.1.4 Luz natural

La naturaleza tiene muchos fenómenos en los cuales se genera luz. El mas evidente de todos quizás sea el sol, que es capaz de radiar energía sobre la tierra a razón de 0.135 W/cm^2 . Cerca del 75% de esta energía alcanza la superficie de la tierra al nivel del mar, en un día soleado.

La luminancia promedio del sol es de 160.000 cd/cm^2 , (unos 1.600 millones de cd/m^2) observada desde el nivel del mar, de modo que la iluminación sobre la superficie de la tierra debida al sol puede exceder los 100.000 Luxes. En un día nublado, la iluminación puede descender a 10.000 Luxes.

Otros fenómenos naturales en los que está presente la luz son el firmamento, la luna, los rayos o descargas atmosféricas, las auroras boreales y algunas plantas y animales que generan luz a partir del fenómeno de la bioluminiscencia.

2.1.1.5 Luz artificial

A partir del desarrollo de las ciencias físicas, el hombre ha aprovechado diferentes fenómenos naturales para controlarlos de tal manera que produzcan luz. Los más importantes son la incandescencia y la luminiscencia



Figura 2.2 Aplicación de luz artificial

Como se anotará en el literal 2.1.2.1, a partir de la incandescencia se desarrollan dispositivos para generar luz de manera controlada, como las bombillas incandescentes, los arcos eléctricos de carbón y las fuentes de luz basadas en combustibles, como la gasolina y el gas. Cada una de ellas con aplicaciones específicas, aún en la actualidad. Ver la figura 2.2

A partir de la luminiscencia se han desarrollado la mayor cantidad de fuentes luminosas orientadas al alumbrado público y a la iluminación de grandes áreas, debido a que su eficacia de generación de luz es mayor que cualquiera de las incandescentes. Esto a su vez tiene un costo en cuanto a la calidad de la luz. Mientras las fuentes incandescentes prácticamente no distorsionan la visión de los colores,



ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ D. C.
UNIDAD EJECUTIVA DE SERVICIOS PÚBLICOS
MANUAL ÚNICO DE ALUMBRADO PÚBLICO

CAPÍTULO II

FUNDAMENTOS

Revisión 00

Fecha 27-09-01

Pág. 4 de 64

debido a que el espectro de emisión es similar al del sol, las fuentes basadas en luminiscencia llegan a distorsiones de color hasta del 50%.

Estas características determinan en gran parte el uso de las fuentes de luz. Generalmente, el mercado residencial y el de las exposiciones comerciales está dominado por fuentes de luz incandescente, en tanto que el mercado de exteriores para alumbrado público, zonas verdes, iluminación industrial e incluso la iluminación comercial de grandes interiores, está dominado por las fuentes de luz basadas en luminiscencia.

Ejemplos de fuentes incandescentes son: las bombillas de filamento para uso residencial, las bombillas de tungsteno halógeno para TV y las bombillas dicróicas para vitrinas, entre otras.

Fuentes basadas en luminiscencia son los tubos fluorescentes, las bombillas de vapor de mercurio, las bombillas de vapor de sodio, tanto a alta como a baja presión y las bombillas de mercurio enriquecido con materiales halógenos (metal halide).

Otras fuentes basadas en luminiscencia pero que no tienen como fin iluminación de espacios de trabajo en su estado de desarrollo actual son los diodos emisores de luz (LED) y los rayos láser.

2.1.2 Modelo físico y matemático de la luz

2.1.2.1 Radiación de cuerpo negro

Se define como *termo-radiación*, a la emisión de energía radiante que depende exclusivamente de la temperatura del material. A la parte de esta radiación emitida dentro del espectro visible, se le denomina incandescencia. Así, la incandescencia es la producción de luz por elevación de la temperatura de un cuerpo. El espectro de luz emitida por un cuerpo así, es continuo, pues emite radiaciones en toda la banda del espectro visible, aunque con diferente intensidad. A medida que aumente la temperatura del cuerpo emisor, la cantidad de energía radiada es mayor y la longitud de onda se hace mas corta y más próxima al espectro visible. (Tal y como aparece en la

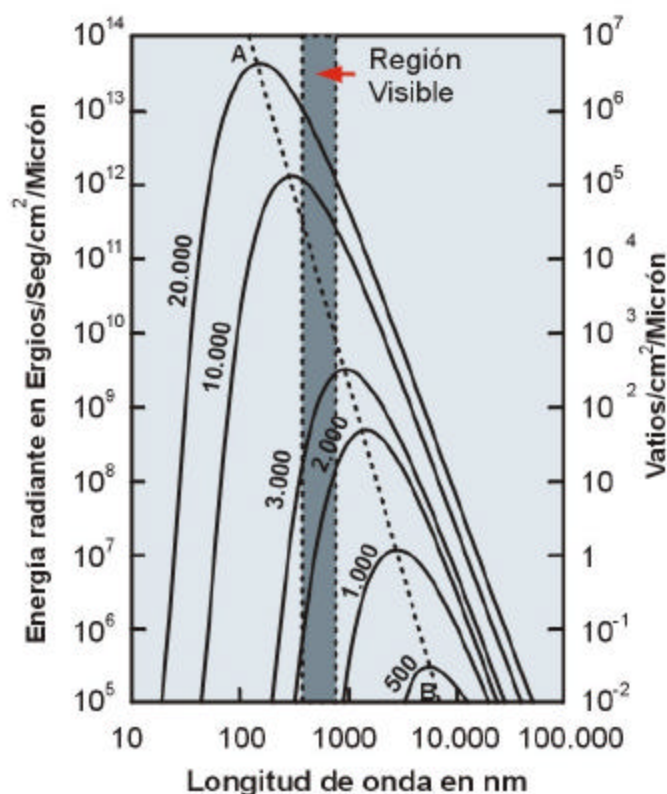


Figura 2.3. Región visible



ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ D. C.
UNIDAD EJECUTIVA DE SERVICIOS PÚBLICOS
MANUAL ÚNICO DE ALUMBRADO PÚBLICO

CAPÍTULO II

FUNDAMENTOS

Revisión 00

Fecha 27-09-01

Pág. 5 de 64

figura 2.3) El rendimiento visual para una curva de emisión determinada, vendrá dado por la relación entre la energía radiada en forma de luz y la energía radiada total, teniendo en cuenta la sensibilidad espectral del ojo humano.

El valor máximo de este rendimiento visual se establece alrededor de 4.300°K, cifra notablemente superior al punto de fusión de los materiales utilizados en la producción de luz por incandescencia. Ello explica el bajo rendimiento de conversión a luz de las fuentes incandescentes.

Los objetos que absorben bastante bien la radiación, también son buenos emisores y un cuerpo cuya superficie sea perfectamente negra, (es decir, que es un absorbente perfecto) también es un emisor perfecto.

Este objeto se conoce como *Cuerpo negro* o radiador de Plank y es capaz de absorber totalmente la radiación incidente, cualquiera que sea su longitud de onda, dirección de incidencia o polarización. Este radiador posee, para cualquier longitud de onda o dirección, la máxima concentración espectral de radiación a cualquier temperatura.

El estudio de la distribución espectral con relación a la temperatura, llevó en 1900 a formular el postulado fundamental de la física cuántica y permitió enormes avances en el desarrollo y modelado matemático de la luminiscencia.

2.1.2.2 Fenómeno de la luminiscencia

Analizando primero la forma de operación de una fuente de descarga gaseosa, es explicable mas fácilmente el fenómeno de la luminiscencia. Un tubo de descarga gaseosa es básicamente un recipiente de vidrio sellado y al vacío, que tiene dos electrodos en sus extremos, conectados a una fuente de potencial controlado. Como entre ellos hay una diferencia de potencial, el electrodo positivo se llamará ánodo y el negativo cátodo.

Desde el punto de vista de su comportamiento meramente eléctrico, es posible comprobar que hay una relación de

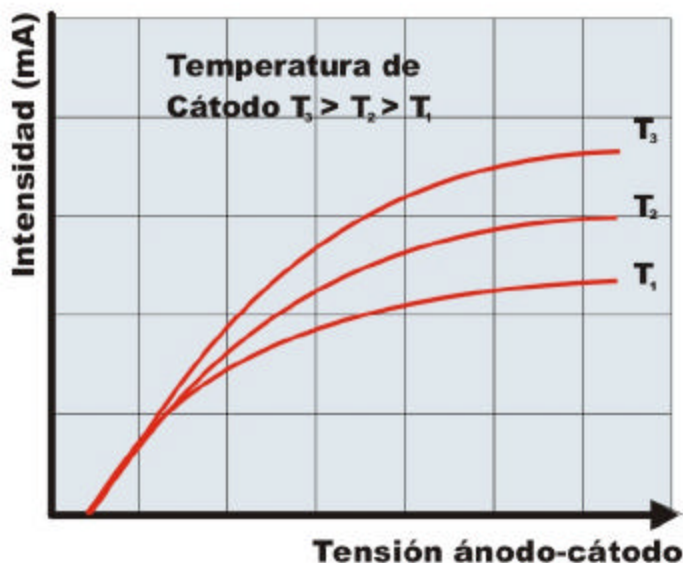


Figura 2.4. Emisión termoiónica



ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ D. C.
UNIDAD EJECUTIVA DE SERVICIOS PÚBLICOS
MANUAL ÚNICO DE ALUMBRADO PÚBLICO

CAPÍTULO II

FUNDAMENTOS

Revisión 00

Fecha 27-09-01

Pág. 6 de 64

proporcionalidad directa aproximada, entre la tensión eléctrica medida de ánodo a cátodo y la corriente que circula en el circuito, tal y como lo sugiere la figura 2.4. Además, la constante de proporcionalidad depende de la temperatura del cátodo. Así, a mayor tensión y mayor temperatura del cátodo, circulará mayor corriente eléctrica por el circuito.

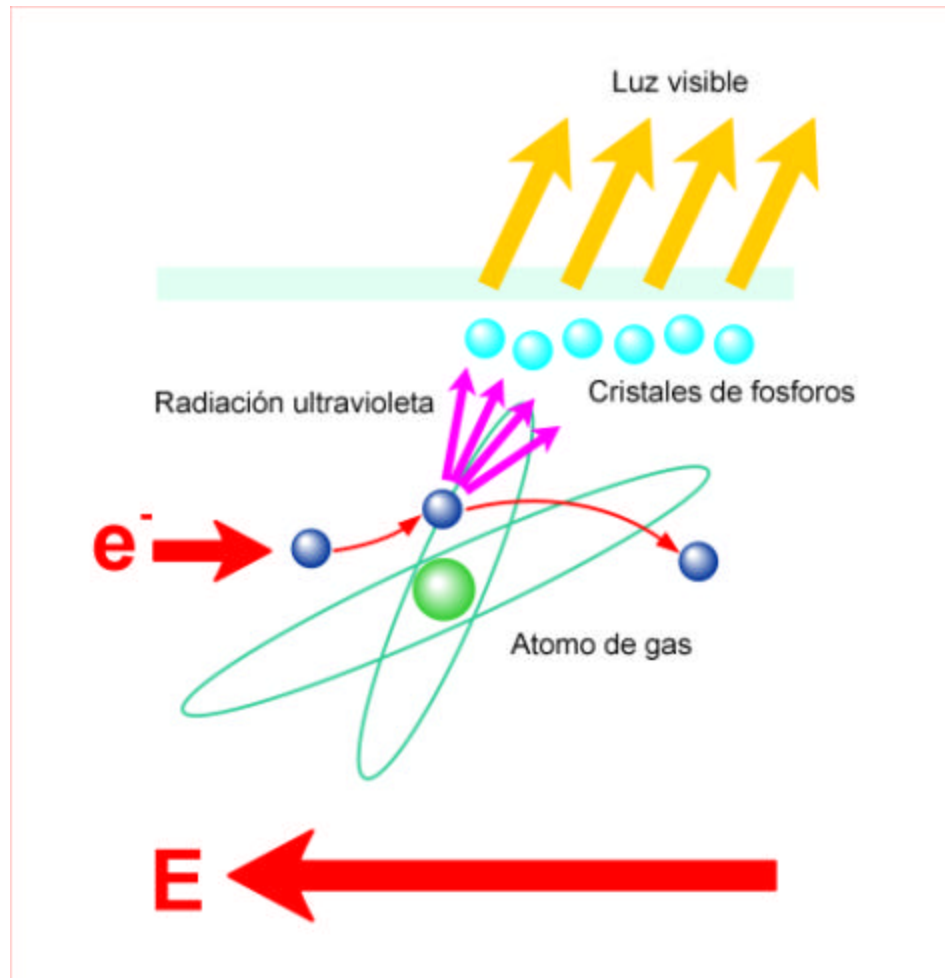


Figura 2.5. Fenómeno de la luminiscencia

La explicación física a éste fenómeno, que aparentemente resultaría sencilla, sirvió para iniciar todo el desarrollo de la física cuántica, a partir de la teoría del átomo de N. Böhr. Un resumen muy simplificado de esta explicación, se ofrece a continuación, por resultar útil para explicar el origen de la mayor parte de las fuentes lumínicas utilizadas en el alumbrado en general.

Entre el cátodo y el ánodo del tubo de descarga gaseosa descrito anteriormente, existe un campo eléctrico E que actúa sobre los electrones del cátodo, produciendo una fuerza F . Si esta fuerza es suficientemente grande, moverá electrones hacia el ánodo con

velocidad creciente. Esta emisión se hará mas fácil si el cátodo está mas caliente. El fenómeno se conoce como **emisión termoiónica**. Ahora, si se llena el tubo de gas, los electrones no se podrán mover libremente desde el cátodo hasta el ánodo y empezarán a chocar continuamente con los átomos de gas (véase la Figura 2.5) y el proceso de choque puede efectuarse en varias formas:

- El electrón sale del cátodo con velocidad baja y choca con un átomo del gas. Debido a la gran diferencia de masas, no lo podrá excitar y la transferencia de energía solo será notada como un alza en la temperatura del gas.



ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ D. C.
UNIDAD EJECUTIVA DE SERVICIOS PÚBLICOS
MANUAL ÚNICO DE ALUMBRADO PÚBLICO

CAPÍTULO II

FUNDAMENTOS

Revisión 00

Fecha 27-09-01

Pág. 7 de 64

- El electrón que sale con suficiente velocidad y choca con el átomo de gas, provocará el salto de un electrón hacia una órbita más externa. Como esa condición es inestable bajo los postulados de la física cuántica, a su regreso a la órbita el electrón entregará energía en forma de radiación ultravioleta.
- El electrón del cátodo ha alcanzado gran velocidad y choca con un átomo del gas. Debido a su gran velocidad saca de órbita un electrón, convirtiendo la molécula de gas en un ión que se empezará a mover hacia el cátodo a velocidad creciente. El electrón que salió de órbita podrá actuar sobre otros átomos y el ión formado puede recuperar su electrón, emitiendo energía en forma de radiación ultravioleta.

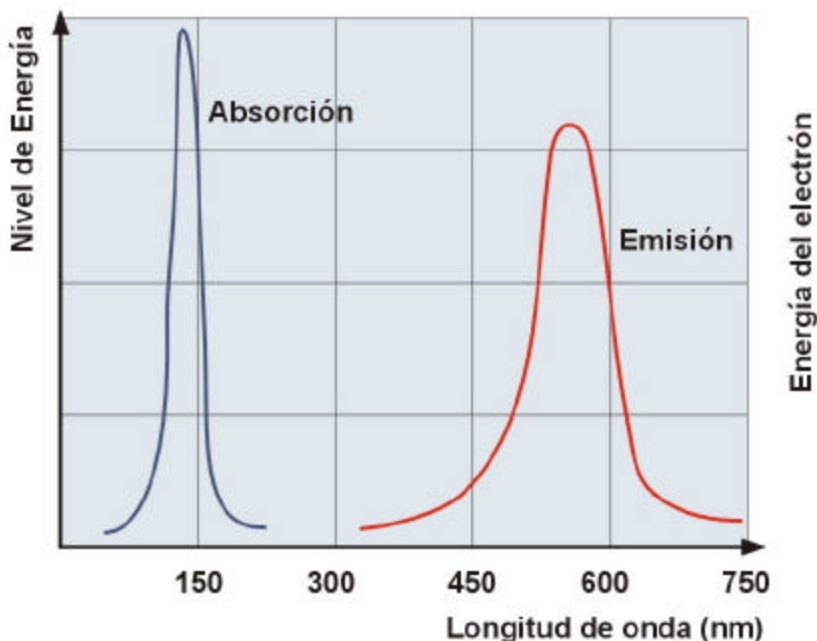


Figura 2.6. Bandas de emisión termoiónica

Durante el fenómeno de la *emisión termoiónica* se aprovecha la radiación ultravioleta, para excitar sustancias que producen mucha luz en presencia de este tipo de excitación y la emisión continuará mientras dure la excitación. Estas sustancias se conocen como fluorescentes y se colocan en la parte interior del tubo de descarga considerado, o en el interior del bulbo de la bombilla.

La sustancia fluorescente así excitada, repite el fenómeno del choque de la radiación ultravioleta con sus propios electrones, sacándolos eventualmente de órbita. Al regresar, éstos emiten nuevamente radiación para desprenderse de la energía adicional, solo que esta vez, dicha radiación está en el espectro visible. (Véase la figura 2.6)

El fósforo usado en este tipo de fuentes es un compuesto inorgánico de excepcional pureza química y composición controlada, al que agregando pequeños porcentajes de impurezas activadoras, se logra mejorar su eficacia generando luz. Adicionalmente, este control permite definir el color de la emisión. El estudio del color se documentará en la sección 2.3 del presente manual

La figura 2.7 es un modelo esquemático de los niveles de energía del fósforo, representando el estado normal y el excitado contra el espaciamiento orbital. En el estado normal el electrón oscila



ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ D. C.
UNIDAD EJECUTIVA DE SERVICIOS PÚBLICOS
MANUAL ÚNICO DE ALUMBRADO PÚBLICO

CAPÍTULO II

FUNDAMENTOS

Revisión 00

Fecha 27-09-01

Pág. 8 de 64

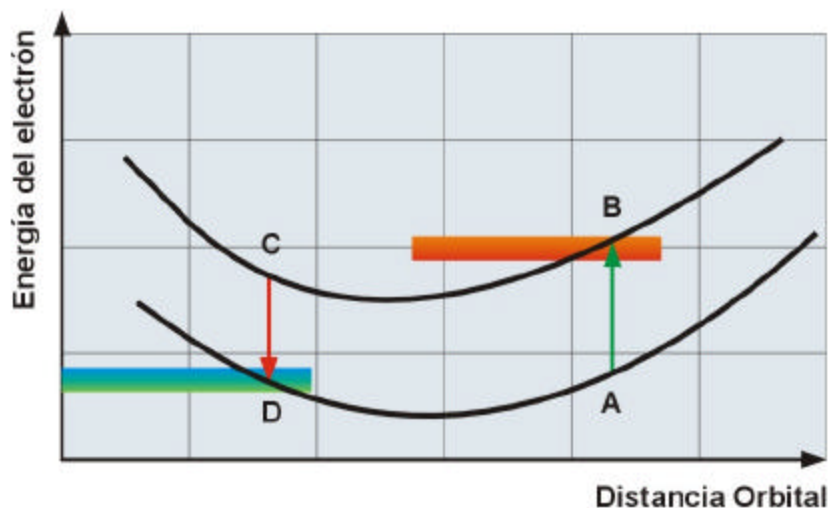


Figura 2.7. Modelo esquemático del fósforo

alrededor de la posición A en la curva de energía normal; esta vibración es de origen térmico; además, el fósforo absorbe energía antes de emitir luz. Para los tubos fluorescentes comerciales la radiación absorbida tiene una longitud de onda de 253.7 nm.

En los tubos de descarga de mercurio, donde se produce también radiación ultravioleta pero de mayor longitud de onda, esta transferencia de energía conduce al electrón al punto B (estado de excitación), perdiendo su

exceso de energía en movimiento y calor. Después se llega a un punto un poco mas estable, el C, en un breve tiempo, para luego desplazarse al punto D en la banda de energía normal, emitiendo un fotón.

Según las Leyes de Stokes, la radiación emitida debe tener una longitud de onda mayor a la absorbida. El modelo explica este fenómeno cuando se retorna hasta la posición A, después se desprende de alguna energía en forma de vibración y calor, volviendo a estar en capacidad de iniciar el ciclo.

Como consecuencia de la oscilación en los alrededores de los puntos A y C, los procesos de excitación y emisión cubren un rango de longitudes de onda referidos a esas bandas. Los fósforos usados en la actualidad se refieren en la tabla 2.1

Tabla 2.1 Fósforos para tubos fluorescentes comerciales

Material	Activador	Longitud de onda (nm)	Color	Uso
Diosilicato de bario	Plomo	355	Azul pálido	Luz negra
Silicato de bario,	Plomo	370	Azul pálido	Luz negra
Estroncio y magnesio	Plomo	370	Azul pálido	Luz negra
Tungstanato de calcio	Plomo	440	Azul	Azules
Pirofosfato de estroncio	Estaño	470	Azul	Blancos variados



ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ D. C.
UNIDAD EJECUTIVA DE SERVICIOS PÚBLICOS
MANUAL ÚNICO DE ALUMBRADO PÚBLICO

CAPÍTULO II

FUNDAMENTOS

Revisión 00

Fecha 27-09-01

Pág. 9 de 64

Tabla 2.1 Fósforos para tubos fluorescentes comerciales

Material	Activador	Longitud de onda (nm)	Color	Uso
Tungstanato de magnesio	Ninguno	480	Azul claro	Mezcla luz día
Halofosfato de calcio	Antimonio	480	Azul claro	Mezcla luz día
Fosfato de titanio y bario	Titanio	490	Azul verdoso	Blancos variados
Silicato de zinc	Magnesio	520	Verde	Verdes
Halofosfato de calcio	Antimonio y magnesio	590	Amarillo	Blanco
Silicato de calcio	Plomo y magnesio	610	Rosado	Color mejorado
Fosfato de magnesio y estroncio	Estaño	620	Rosado	blanco frío
Fosfato de estroncio y calcio	Estaño	640	Blanco	Color mejorado
Borato de cadmio	Magnesio	615	Rosado	Rosados y rojos
Fluorogermanato de magnesio	Magnesio	660	Rojo	blanco frío

2.2 LUZ Y VISIÓN

2.2.1 El ojo humano

La ciencia de la conservación de la vista abarca no solo el cuidado de los ojos por tratamientos médicos, sino que también estudia el alumbrado apropiado para servir de ayuda a los ojos humanos, al desempeñar éstos sus numerosas tareas visuales diarias, sin fatiga y esfuerzo indebido. Esta es la razón por la cual el luminotécnico debe tener algunos conocimientos sobre el ojo humano.

La figura 2.8 representa un corte longitudinal esquemático del ojo humano, en el que se puede apreciar su constitución anatómica y donde se distinguen los siguientes órganos:

PARPADO: Compuesto por la membrana cutánea y los músculos orbitales, se encarga de proteger al ojo y facilitar el control rápido de la cantidad de luz que llega sobre la córnea.

CORNEA: Membrana transparente protectora del globo ocular, en especial del área por donde pasa la luz antes de llegar al cristalino. Es, por tanto, la primera lente del ojo.



ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ D. C.
UNIDAD EJECUTIVA DE SERVICIOS PÚBLICOS
MANUAL ÚNICO DE ALUMBRADO PÚBLICO

CAPÍTULO II

FUNDAMENTOS

Revisión 00

Fecha 27-09-01

Pág. 10 de 64

IRIS: Controla de manera automática la cantidad de luz que pasa a la lente o cristalino, mediante la acción de pequeños músculos involuntarios.

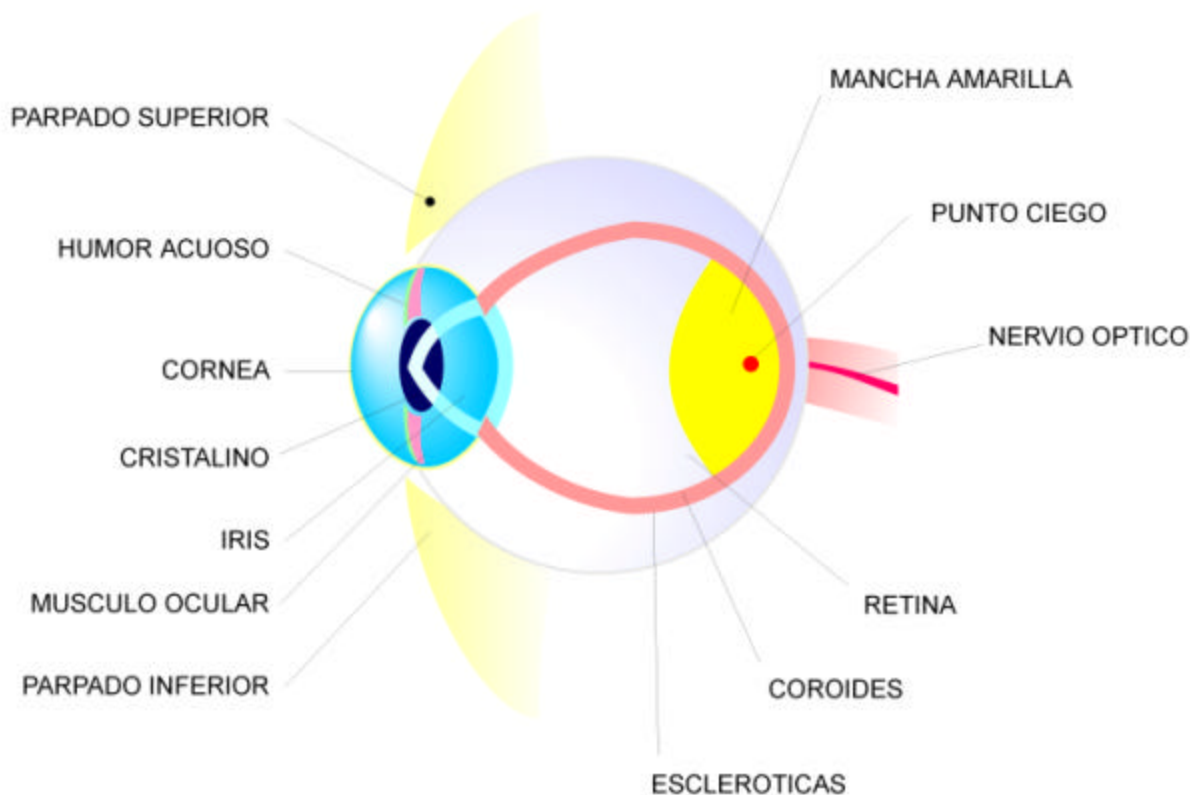


Figura 2.8. El ojo humano

CRISTALINO: Es una cápsula elástica transparente dispuesta detrás del iris y que a manera de una lente convexa, dirige los rayos de luz para enfocarlos sobre la retina. Las variaciones en la curvatura, necesarias para enfocar objetos cercanos y lejanos (acomodación), se obtienen por la acción de los músculos ciliares.

MUSCULOS CILIARES: Anillo de músculos que ajustan automáticamente la tensión sobre la cápsula de la lente o cristalino, cambiando así su curvatura y enfocando o acomodando el ojo para ver objetos lejanos o cercanos.

RETINA: Es la superficie sensitiva en el fondo del ojo, que recibe las impresiones de luz. Además de varias capas de vasos sanguíneos, se compone de una delicada película de fibras nerviosas que divergen del nervio óptico, para formar un forro sobre una parte considerable del interior del ojo. Estas



ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ D. C.
UNIDAD EJECUTIVA DE SERVICIOS PÚBLICOS
MANUAL ÚNICO DE ALUMBRADO PÚBLICO

CAPÍTULO II

FUNDAMENTOS

Revisión 00

Fecha 27-09-01

Pág. 11 de 64

fibras nerviosas terminan en minúsculas estructuras con forma de conos y de bastoncillos. Se distingue en la retina un sector central muy sensible a la luz, conocida como *fóvea* o *mancha amarilla* donde, de manera automática, se enfoca la visión diurna, debido a la gran cantidad de conos presentes. La región circundante a esta área, tiene una concentración menor de conos, pero a cambio tiene muchos mas bastoncillos. Otro punto importante de la retina es el punto ciego, lugar por donde emerge el nervio óptico, compuesto de múltiples ramificaciones que cubren toda la retina.

CONOS: Hacen posible la sensación de color y el discernimiento de los detalles finos. Están principalmente concentrados cerca del centro de la retina, con la mayor parte en la fóvea. Es precisamente en este punto en donde los músculos del ojo involuntariamente enfocan la imagen del objeto que debe ser examinado minuciosamente.

BASTONCILLOS: Los bastoncillos son sensitivos a muy bajos niveles de iluminación, pero no reaccionan a los colores. Existen en la región foveana del ojo, pero aumentan en número al aumentar la distancia desde esta región. Las regiones periféricas de la retina, en donde sólo se encuentran bastoncillos, no favorecen una visión precisa, pero esta región es altamente sensible al movimiento.

En conclusión la parte exterior de la retina sirve para la reproducción general de la escena y la porción de la fóvea permite examinar minuciosamente los objetos de mayor interés.

PURPURA RETINIANA: Es un líquido azulado que se encuentra en los bastoncillos. Es sensible a la luz y tiene la tendencia a decolorarse en presencia de una luz fuerte.

PUNTO CIEGO: Este es el punto de la retina al que está ligado el nervio óptico, que lleva las sensaciones de la luz al cerebro.

El ojo humano es un órgano viviente, compuesto de nervios, músculos y vasos sanguíneos. Estos son elementos bajo el control del cerebro. Además, es un órgano extraordinariamente adaptable, pues funciona entre límites de iluminación que varían en una relación de 1:1.000.000.

En los seres humanos la percepción visual no es sólo un proceso físico, sino también mental, lo que explica en algún modo, cómo condiciones de alumbrado defectuosas pueden perturbar algunas funciones del cuerpo, causando fatiga general y lesiones.

2.2.2 Curva de sensibilidad del ojo humano

El ojo solo capta radiaciones electromagnéticas comprendidas entre 3.800 y 7.800 Ångstrom. Todas las fuentes luminosas tienen su propia radiación o mezcla dentro de dichos límites. El ojo capta cada color con diferente intensidad, de tal manera que hay colores que producen mayor sensación visual que otros, todo lo cual ha dado origen a la curva de sensibilidad del ojo humano. Este tiene su máxima sensibilidad para una longitud de onda de 5.550 Ångstrom, que corresponde al color amarillo verdoso y la mínima a los colores rojo y violeta. Ver figura 2.9



ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ D. C.
UNIDAD EJECUTIVA DE SERVICIOS PÚBLICOS
MANUAL ÚNICO DE ALUMBRADO PÚBLICO

CAPÍTULO II

FUNDAMENTOS

Revisión 00

Fecha 27-09-01

Pág. 12 de 64

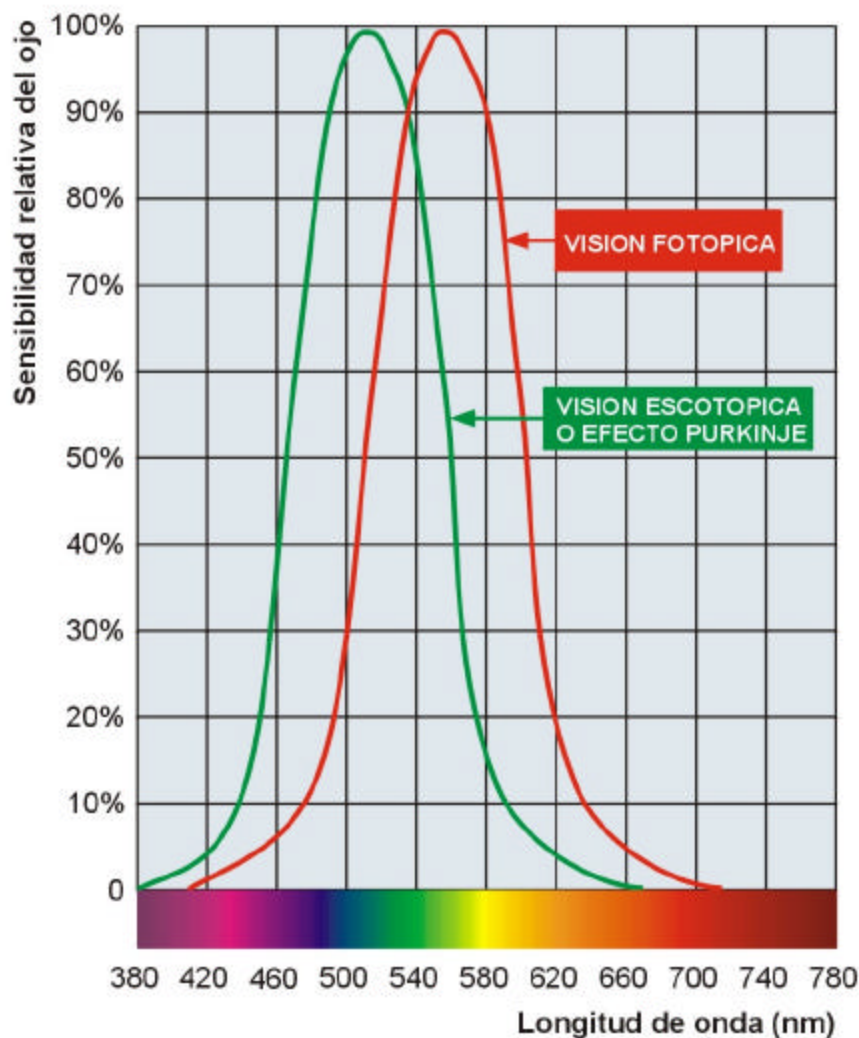


Figura 2.9. Curva de sensibilidad del ojo humano

periferia de la retina. Estas células son muy sensibles a los cambios de luminancia en el campo visual periférico, por lo que perciben movimientos, aunque no se distingan figuras; por otra parte la velocidad de percepción es menor que en la visión fotópica.

La visión referida a niveles intermedios de iluminación entre la fotópica y la escotópica, se conoce como *visión mesotópica* y comprende la visión probabilísticamente combinada de bastoncillos y conos en la retina.

Salvo que se especifique lo contrario, todos los estudios de iluminación se efectúan bajo el esquema

EFEECTO PURKINJE: Se conoce como *visión fotópica*, la percibida con niveles de iluminación que permite distinguir colores. Esto ocurre como a 10 luxes. La visión se centra en la luz recibida por los conos de la retina. Estas son células muy sensibles a la luz y que permiten enviar sensaciones al cerebro para identificar colores.

En la *visión escotópica* (nocturna o a baja iluminación), el máximo de sensibilidad se desplaza hacia longitudes de onda menores, según se observa en la figura 2.9, de tal forma que el violeta y el azul se hacen más sensibles que el naranja o el rojo.

En el proceso visual, la visión nocturna se traslada a las células denominadas bastoncillos, ubicadas principalmente en la



de la sensibilidad fotópica o visión diurna.

2.2.3 Capacidad visual

El ojo humano es una maravillosa máquina viviente capaz de trabajar en un rango amplio de cantidad de luz (comprendido entre 0.1 y 100.000 luxes). Puede enfocar objetos distantes desde 0.05 m hasta una distancia infinita y puede abarcar un ángulo de $\pm 60^\circ$ en visión binocular (centro naranja de la figura 2.10) y de $\pm 180^\circ$ en visión periférica. (Región amarilla para cada ojo solo respectivamente, en la figura 2.10).

Aunque la visión central difiere de la periférica en algunos aspectos: en la visión central los detalles de los objetos se captan con mayor precisión, pues están dedicados a la visión fotópica o diurna. El resto del campo visual está orientado a percibir movimientos, como siluetas difusas que se van aclarando en la medida que se acercan al área de visión binocular.

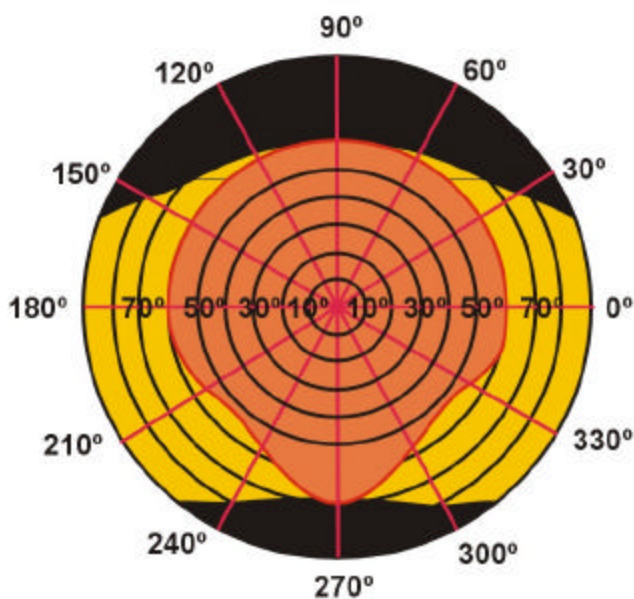


Figura 2.10 Campo visual

Esta capacidad de respuesta del ojo resulta muy efectiva con bajos niveles de iluminación, por lo que se le atribuye a este campo lateral, la visión escotópica.

2.2.4 Percepción

La percepción del ojo se basa en la cantidad de luz que llega a la retina proveniente del objeto que se pretende ver. Esta cantidad de luz depende adicionalmente de la fuente que ilumina el objeto y de las capacidades reflectoras del objeto observado, por lo que en realidad, el ojo humano distingue niveles de luminancia y brillo y no niveles de iluminancia.

Ésta es la principal razón para usar el modelo de luminancia en la evaluación de la calidad y cantidad de iluminación en el alumbrado público.



2.2.5 Adaptación

Es la capacidad del ojo para acomodarse a diferentes niveles de iluminación. Este ajuste lo realiza la pupila automáticamente. La retina actúa como la película sensible de una cámara fotográfica. Si la cantidad de luz que incide es elevada, el ojo no puede transmitir sensaciones visuales al cerebro que es quien las interpreta (es como si el rollo de la cámara se velara temporalmente), pero si esta es muy escasa, tampoco podemos ver y la sensación es la de oscuridad.

La adaptación la realiza el ojo variando la apertura del iris mediante un fenómeno fotoquímico, de tal manera que si hay mucha luz incidente, se cierra el iris y si hay poca, lentamente se abre y así conseguir un nuevo nivel de equilibrio. El ojo se adapta con mayor rapidez a los cambios de un ambiente oscuro a un ambiente claro, que a los cambios en sentido contrario. La relación es aproximadamente de 60:1 a favor del primero.

Los altos niveles de iluminación de buena calidad, aumentan la velocidad con que puede efectuarse una tarea visual que implique discernimiento de detalles. La figura 2.11 muestra los tiempos promedio para un grupo de observadores, en relación con el nivel lumínico empleado durante la prueba.

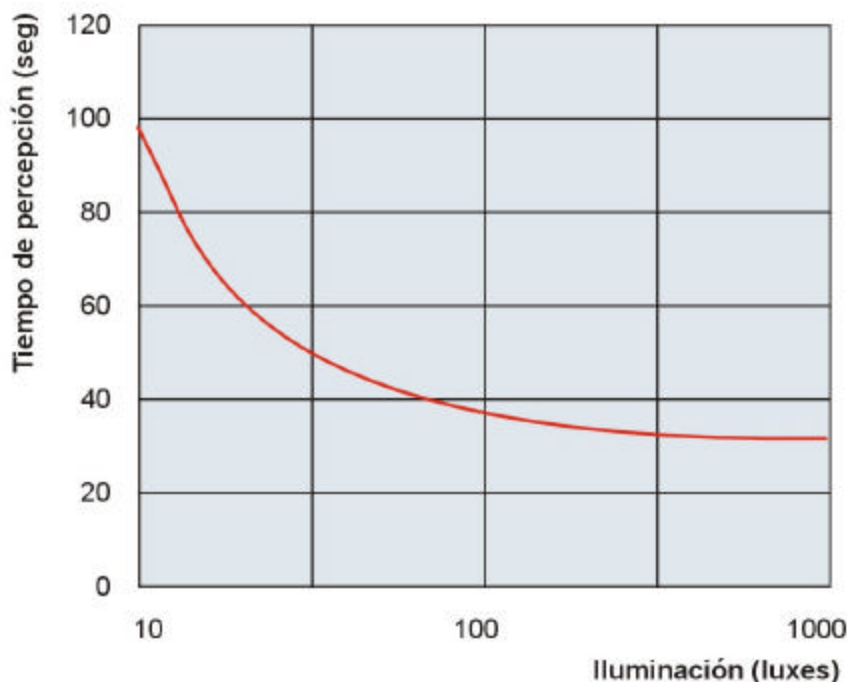


Figura 2.11 Adaptación del ojo humano

Como podrá observarse mas adelante, esta propiedad varía en cada observador con el paso de los años, de modo que el nivel lumínico requerido para cierto trabajo visual, se especifica para una persona joven, médicamente sana y visión normal.

2.2.6 Acomodación y Agudeza

Mediante la función de acomodación, el ojo humano se ajusta para ver objetos a diferentes distancias. Este ajuste se efectúa variando la curvatura del cristalino que actúa como una lente en una estructura elástica, cuya forma y posición están

determinadas por la tensión de los ligamentos de soporte y los músculos ciliares. Esta capacidad



ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ D. C.
UNIDAD EJECUTIVA DE SERVICIOS PÚBLICOS
MANUAL ÚNICO DE ALUMBRADO PÚBLICO

CAPÍTULO II

FUNDAMENTOS

Revisión 00

Fecha 27-09-01

Pág. 15 de 64

disminuye con la edad, como consecuencia del endurecimiento del cristalino.

El nivel de acomodación se expresa en **dioptrías** y es numéricamente igual al recíproco de la distancia en metros desde el *plano de las gafas*, situado a 1.4 cm frente a la córnea, hasta el foco del lente de las gafas. Bajo ciertas limitaciones, por la aproximación matemática utilizada, la capacidad de cualquier lente igualmente se expresa en dioptrías.

La agudeza visual es la capacidad que tiene el ojo de reconocer por separado, con nitidez y precisión, objetos muy pequeños y próximos entre sí. La agudeza es el resultado de enfocar las imágenes sobre la fovea central de la retina, sitio extremadamente sensible a la luz. La agudeza visual de una persona de 60 años es aproximadamente un 75 % respecto a una de 20 años.

La agudeza visual depende de varios factores, algunos son psicológicos como los movimientos de los ojos para fijar la vista en un punto, justo en el centro de visión. Este movimiento generalmente va acompañado del movimiento de la cabeza. Estas acciones producen un reordenamiento de las luminancias dentro del ojo, que influyen en la adaptación de la retina. Por ello, el cálculo del deslumbramiento tiene una componente psicológica. Otros factores son fisiológicos, como la naturaleza de la tarea visual, por ejemplo el contraste entre el objeto, el fondo cercano y el circundante, el brillo del objeto y por supuesto, la edad del observador, pues el ojo va perdiendo capacidad con la edad.

2.2.7 Factores que influyen en la visión

ILUMINACION. La capacidad visual depende de la iluminación. Esta, a su vez, afecta el estado de ánimo de las personas y su aptitud para desarrollar un trabajo, su poder de relajación, etc. Cada actividad requiere una determinada iluminación nominal, que debe existir como valor medio en la zona en que se desarrolla aquella.

El valor medio de iluminación para una determinada actividad está en función de una serie de factores entre los que se pueden citar:

- Tamaño de los detalles a captar.
- Distancia entre el ojo y el objeto observado.
- Factor de reflexión del objeto observado.
- Contraste entre los detalles del objeto y el fondo sobre el que se destaca.
- Tiempo empleado en la observación.
- Rapidez de movimiento del objeto.

Entre mayor sea la dificultad para la percepción visual, mayor deberá ser el nivel medio de iluminación. Esta dificultad se acentúa mucho más en las personas de edad avanzada. De ahí que necesiten más luz que los jóvenes para realizar un trabajo con igual facilidad.

Se ha comprobado que mientras un niño de 10 años, para leer normalmente una página de un libro



ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ D. C.
UNIDAD EJECUTIVA DE SERVICIOS PÚBLICOS
MANUAL ÚNICO DE ALUMBRADO PÚBLICO

CAPÍTULO II

FUNDAMENTOS

Revisión 00

Fecha 27-09-01

Pág. 16 de 64

con buena impresión necesita un nivel medio de iluminación de 175 luxes, una persona de 40 años precisa 500 luxes y otra de 60 años requiere de 2.500 luxes.

Considerando todos estos factores, se han fijado valores mínimos de iluminación para cada cometido visual, que se indican en las tablas que para tales efectos tienen las normas correspondientes.

CONTRASTE. El ojo sólo aprecia diferencias de luminancia. La diferencia de luminancia entre el objeto que se observa y su espacio inmediato es lo que se conoce por contraste. Los trabajos que requieran gran agudeza visual precisan de un mayor contraste. Combinando bien los grados de reflexión de las superficies de un recinto, se obtiene una distribución armónica de la luminancia, produciéndose con ello un contraste fácil de distinguir.

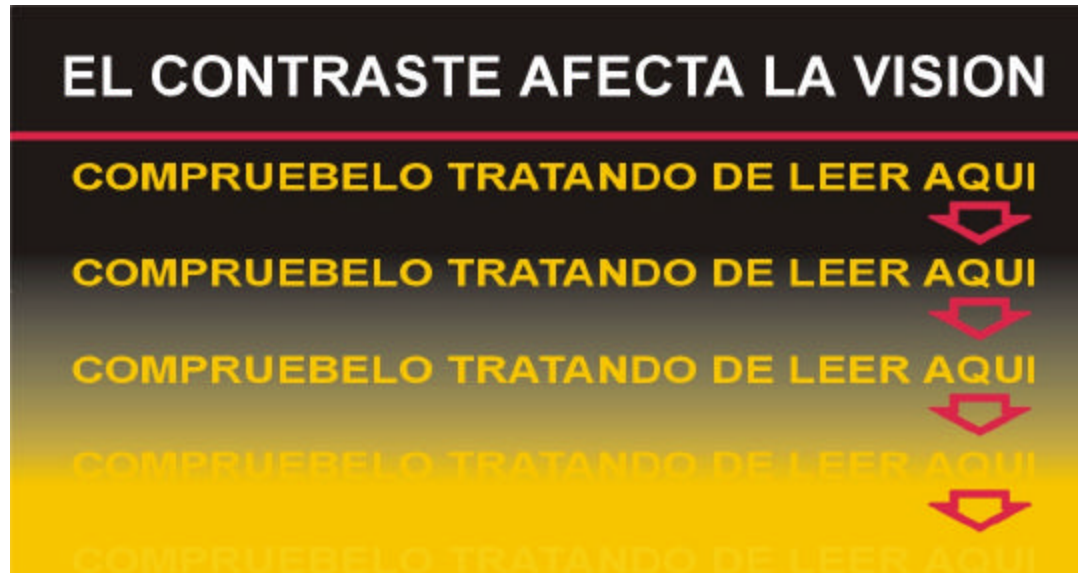


Figura 2.12. Contraste

Las mejores condiciones visuales se consiguen cuando el contraste de luminancia entre el objeto y las superficies circundantes se mantiene dentro de unos límites calculados empíricamente: **La relación de luminancia en el campo visual no debe ser en general menor de 1:3, ni mayor de 3:1.** (Véase la figura 2.12)

SOMBRA. Si no tuviéramos dos ojos, no veríamos los objetos en relieve; es decir unos más cerca que otros. Ello se debe a que en cada ojo se forma una imagen ligeramente distinta y al juntarse las dos en el cerebro dan la sensación de relieve. Pero, además, para poder captar el relieve de los objetos es preciso que éstos presenten unas zonas menos iluminadas que otras. Estas zonas menos iluminadas son las sombras, las cuales destacan las formas plásticas de los objetos.



Las sombras en sí son el resultado de una diferencia de luminancia respecto a zonas más iluminadas. Se distinguen dos clases de sombras: fuertes y suaves. Sombras fuertes son las que resultan de iluminar un objeto con luz dirigida intensa desde un punto determinado más o menos alejado, y que se caracterizan por su profunda oscuridad y dureza. En contraposición a las sombras fuertes, las sombras suaves son las que resultan de iluminar un objeto con una luz difusa y que se caracterizan por su suavidad y menor efecto de relieve.

DESLUMBRAMIENTO. El deslumbramiento es un fenómeno fisiológico que reduce la capacidad visual debido a una diferencia de luminancia a la que el ojo no puede adaptarse.

Cuando la luminancia es excesiva, provoca una enérgica reacción fotoquímica en la retina, insensibilizándola durante un cierto tiempo, transcurrido el cual vuelve a recuperarse.

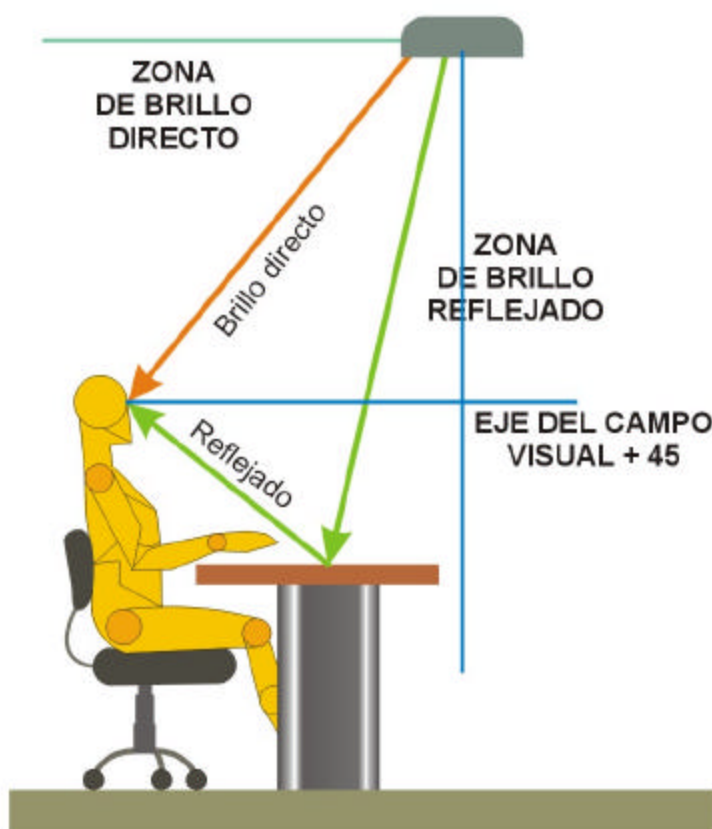


Figura 2.13. Factores del deslumbramiento

La reacción, cuando es por poca luminancia, se tarda hasta 40 minutos en recuperarse y se conoce como encandilamiento por falta de luminancia, en tanto que en el caso de excesiva luminancia lo puede hacer en menos de un minuto.

El deslumbramiento puede producirse directamente. Esto ocurre cuando la propia fuente de luz es la que se encuentra dentro del campo visual (por efecto del brillo). Hay deslumbramiento indirecto cuando las fuentes de luz se hallan fuera del campo visual, pero su luz la recibe el ojo reflejada por superficies que poseen un alto grado de reflexión (luminancia propiamente dicha). Al ingresar la luz al ojo ésta termina reflejándose y refractándose ligeramente en la retina y en el líquido acuoso respectivamente.

Estos reflejos en general no son molestos, hasta que pasan de cierto nivel en el cual inhabilitan otras células de la retina y es cuando se

pierde una gran capacidad de visión, algo así como si hubiese un “velo” frente a los ojos.



ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ D. C.
UNIDAD EJECUTIVA DE SERVICIOS PÚBLICOS
MANUAL ÚNICO DE ALUMBRADO PÚBLICO

CAPÍTULO II

FUNDAMENTOS

Revisión 00

Fecha 27-09-01

Pág. 18 de 64

Este tipo de deslumbramiento, para alumbrado público, se conoce como **deslumbramiento inhabilitador** y su cálculo se explica en la sección 2.6.9 del presente manual.

Hay otra clase conocida como **deslumbramiento psicológico**, por la cual el observador percibe sensaciones incómodas de visión sin una causa evidente. El modelo matemático desarrollado, aunque subjetivo y sin una comprobación completa en la actualidad, permite estimar unos niveles de molestia expresados como **Grado de confort** y depende de la geometría del sistema, el grado de deslumbramiento de las luminarias, el tipo de fuente luminosa, entre otros. Su evaluación se expone en la sección 2.6.10

El valor máximo tolerable de luminancia para la visión directa es de $0,75 \text{ cd/cm}^2$. (Unas 7500 Cd/m^2)
Los factores determinantes del deslumbramiento son:

- La luminancia de la fuente de luz o de las superficies iluminadas. A mayor luminancia corresponde mayor deslumbramiento.
- Las dimensiones de la fuente de luz en función del ángulo subtendido por el ojo a partir de los 45 grados con respecto a la vertical. Un área grande de baja luminancia como un panel luminoso, o varias bombillas en conjunto como en la figura 2.13, cada una de ellas con fuentes pequeñas de mayor luminancia.
- La localización de la fuente de luz. Cuanto más lejos se encuentre la fuente en la línea de visión menor deslumbramiento produce.
- Por otra parte, también disminuye el deslumbramiento a medida que la fuente queda más por encima del ángulo visual normal
- El contraste entre la luminancia de la fuente de luz y la de sus alrededores. A mayor contraste de luminancia, mayor deslumbramiento.
- El tiempo de exposición. Una luminancia de bajo valor puede producir deslumbramiento si el tiempo de exposición es largo.

Las máximas relaciones de luminancia admisibles en el campo visual del observador a objeto de evitar el deslumbramiento, son las siguientes:

Entre la tarea visual y la superficie de trabajo	3:1
Entre la tarea visual y el espacio circundante	10:1
Entre la fuente de luz y el fondo	20:1
Máxima relación de luminancia en el campo visual	40:1

2.3 COLOR

2.3.1 Conceptos básicos sobre el color

La presencia de la luz produce una serie de estímulos en la retina y unas reacciones en el sistema nervioso que comunican al cerebro un conjunto de sensaciones cromáticas (colores). El color es, por tanto, una interpretación psicofisiológica del espectro electromagnético visible.



Comúnmente el color suele emplearse para señalar una propiedad de los cuerpos y se dice que un cuerpo tiene un determinado color pero esto no es cierto, pues el color como tal no existe ni se produce en ellos. Los cuerpos sólo tienen unas determinadas propiedades de reflejar, transmitir o absorber los colores de la luz que reciben.

2.3.2 Mezcla de colores

Generalmente los colores no son los que presentan el espectro visible, sino una mezcla de ellos. Esta mezcla puede ser **Aditiva** o **Sustractiva**.

En la mezcla de colores Aditiva se suman los colores mezclados y el color mixto obtenido es siempre más claro que cualquiera de sus componentes. La mezcla Aditiva se obtiene en luminotecnia, iluminando al mismo tiempo **con luces** de los distintos colores que se deseen mezclar. Ver figura 2.14

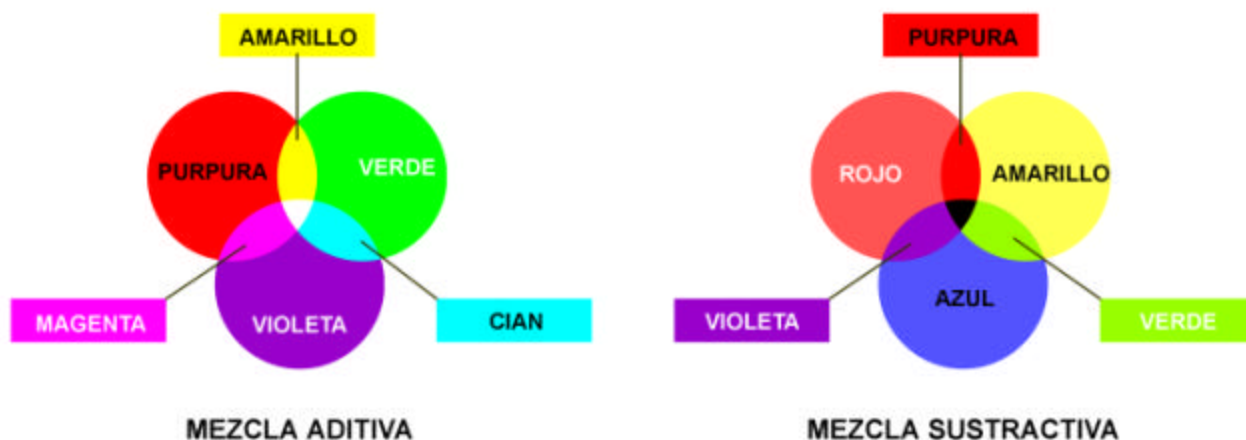


Figura 2.14. Mezcla de Colores

En la mezcla de colores sustractiva se restan los colores mezclados y el color mixto obtenido es siempre más oscuro que cualquiera de los componentes. Esta mezcla se obtiene haciendo pasar la luz por filtros sucesivos o **mezclando pigmentos**.

2.3.3 Designación del color CIE

Los colores del Espectro Visible, así como todos los que resultan de la mezcla de distintos colores se pueden representar matemáticamente por medio de un diagrama de colores o **triángulo cromático** (figura 2.16) aprobado por la Comisión Internacional de Alumbrado (CIE), el cual es empleado al



ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ D. C.
UNIDAD EJECUTIVA DE SERVICIOS PÚBLICOS
MANUAL ÚNICO DE ALUMBRADO PÚBLICO

CAPÍTULO II

FUNDAMENTOS

Revisión 00

Fecha 27-09-01

Pág. 20 de 64

tratar del color de las fuentes luminosas y otros materiales tales como filtros, pinturas, etc.

En el triángulo cromático de la CIE todos los colores están ordenados respecto a los valores de tres coordenadas cromáticas llamadas **x, y, z**. para cada uno de ellos, cumpliéndose la igualdad: **x + y + z = 1**. De esta forma dos coordenadas cualesquiera son suficientes para determinar el punto representativo o lugar geométrico de un color o mezcla de colores. Ahora, las **coordenadas cromáticas** se constituyen a partir de las cantidades de color primario que teóricamente sería necesario tener para reproducir el color especificado. Sean entonces estas cantidades de color primario las siguientes:

X = Cantidad de color X
Y = Cantidad de color Y
Z = Cantidad de color Z

Esto, teniendo en cuenta que los colores primarios utilizados por la CIE son **aproximadamente** parecidos al **amarillo, azul y verde** (Ver figura 2.15) y se llaman **Componentes del tristímulo CIE**. En TV color los colores utilizados son **azul, rojo y verde**, por la facilidad de obtener estos pigmentos en la pantalla a niveles industriales. Para todos los efectos el desarrollo teórico es exactamente igual. En estas condiciones, cada coordenada cromática de la CIE será:

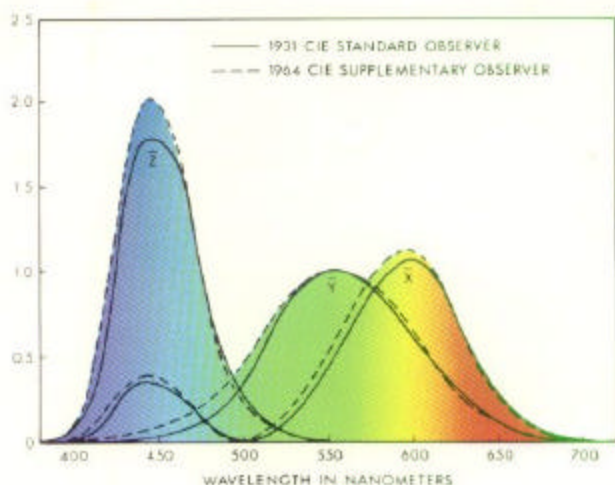


Figura 2.15 Componentes del tristímulo CIE

$$x = \frac{X}{X+Y+Z} ; \quad y = \frac{Y}{X+Y+Z} ; \quad z = \frac{Z}{X+Y+Z}$$

Por otra parte, la cantidad de color primario, bien sea **X, Y** ó **Z** depende de tres funciones bien definidas que son:

- La distribución espectral de la fuente utilizada, denominada **S(I)**.
- La Reflectancia espectral del objeto observado, denominado **P(I)**.
- La distribución espectral del color primario seleccionado (**Am, Az, Vd**).

$$X = k \int_{I=3800A}^{I=7800A} S(I)P(I)Am(I)dI$$



ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ D. C.
UNIDAD EJECUTIVA DE SERVICIOS PÚBLICOS
MANUAL ÚNICO DE ALUMBRADO PÚBLICO

FUNDAMENTOS

CAPÍTULO II

Revisión 00

Fecha 27-09-01

Pág. 21 de 64

Con los datos anteriores es posible integrar la cantidad de color requerido. Para el cual k es un factor normalizante de las unidades utilizadas. A manera de información cada color primario seleccionado en el sistema CIE tiene la distribución espectral mostrada en la figura 2.15. Es común encontrar en la

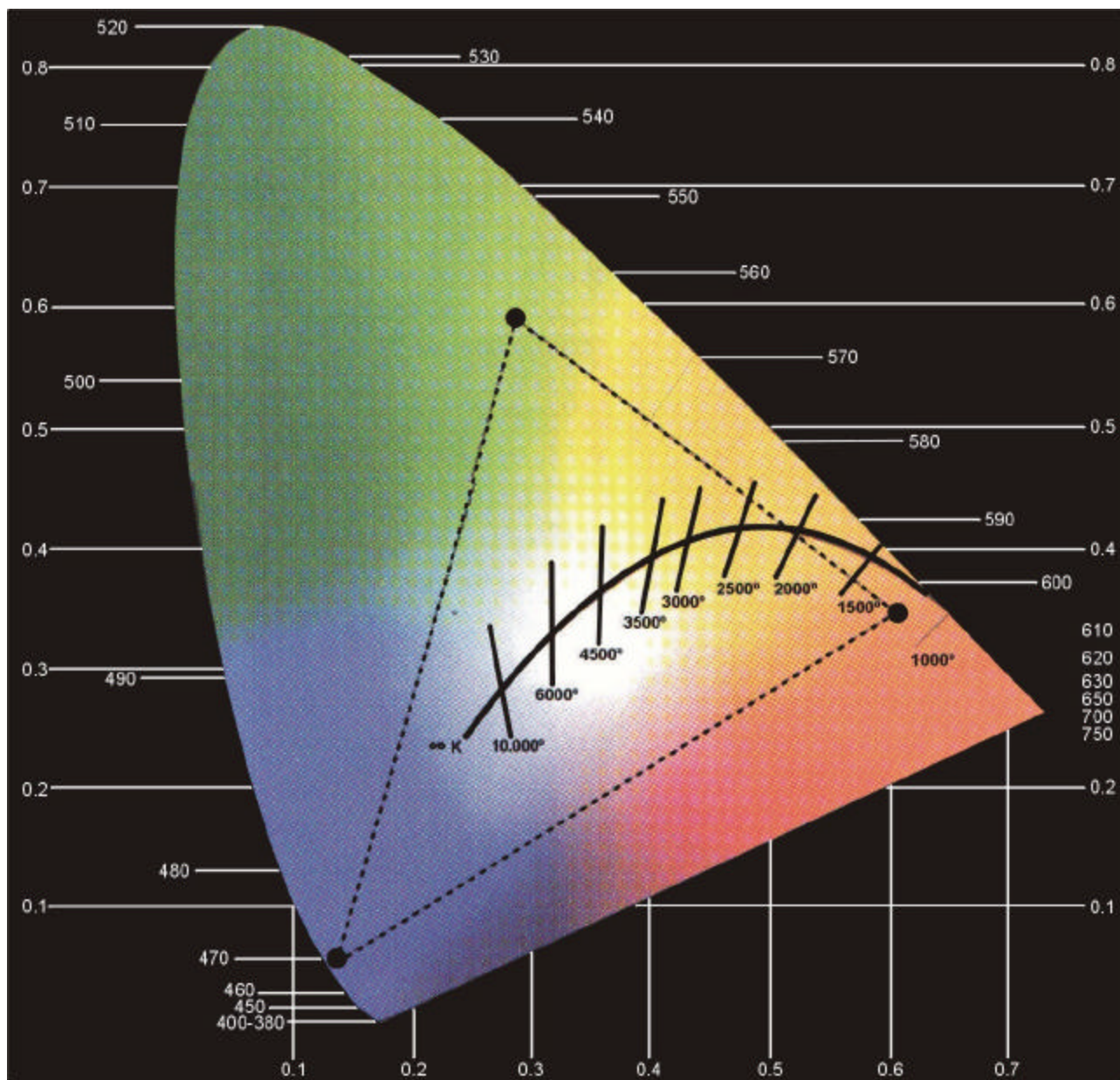


Figura 2.16. Triángulo cromático



ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ D. C.
UNIDAD EJECUTIVA DE SERVICIOS PÚBLICOS
MANUAL ÚNICO DE ALUMBRADO PÚBLICO

CAPÍTULO II

FUNDAMENTOS

Revisión 00

Fecha 27-09-01

Pág. 22 de 64

bibliografía especializada que los colores primarios utilizados por la CIE son los colores constituyentes del TRISTIMULO.

Forma el **Triángulo cromático** una parte curva que es lugar geométrico de las radiaciones monocromáticas; una línea recta (llamada línea de púrpura). En la zona intermedia se encuentra un punto blanco para el cual los valores de **x, y, z** son iguales entre sí (0,333 cada uno). A lo largo de la trayectoria del diagrama de las radiaciones monocromáticas se han señalado algunas longitudes de onda.

Todos los demás colores se encuentran entre el punto blanco y la curva que forma el triángulo. Las rectas que parten del punto blanco contienen colores del mismo tono en saturación decreciente, esto es, cada vez con menos contenido de blanco.

El color de una mezcla aditiva de colores formada por dos componentes está siempre situado en el diagrama sobre la recta que une los puntos de color componentes. Si se mezclan dos colores y la mezcla tiene al punto blanco como punto de color resultante, los dos colores se conocen como colores complementarios. Se comprende que el número de pares de colores complementarios es infinito.

2.3.4 Designación de color sistema Munsell®

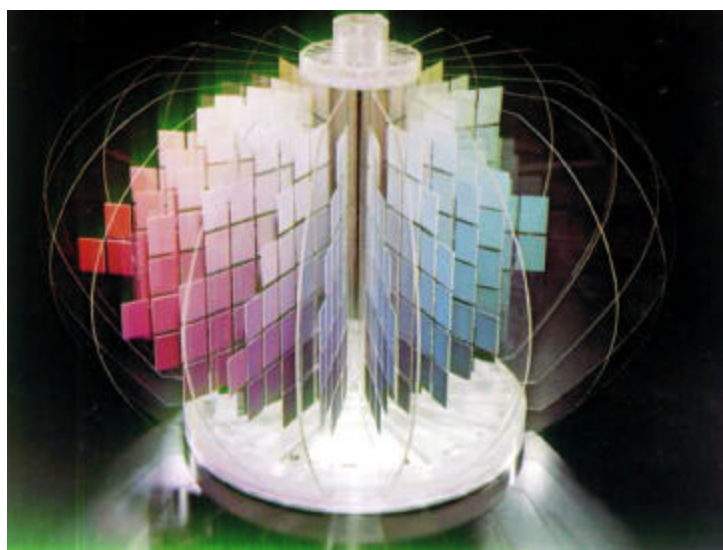


Figura 2.17. Sistema Munsell

Este sistema para especificar cualquier color tiene tres (3) variables conocidas como color, valor y cromaticidad generando una figura tridimensional como la presenta en la figura 2.17 El **Color** representado por cada uno de los planos verticales pueden ser uno de los siguientes diez (10) colores:



ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ D. C.
UNIDAD EJECUTIVA DE SERVICIOS PÚBLICOS
MANUAL ÚNICO DE ALUMBRADO PÚBLICO

CAPÍTULO II

FUNDAMENTOS

Revisión 00

Fecha 27-09-01

Pág. 23 de 64

Rojo (Rj), **Café** (Cf), **Naranja** (Nj), **Rosado** (Rd) **Amarillo** (Am), **Verde** (Vd), **Azul** (Az), **Cyan** (Cn), **Magenta** (Mt), **Violeta** (Vt) o una combinación de dos de ellos en proporciones de 2.5, 5, 7.5 y 10 cada vez, dando un total de 40 cartas de colores formando planos verticales.

El **Valor** corresponde al contenido de blanco (o negro) y recorre una escala desde cero (negro) ubicado en el centro del círculo inferior del diagrama tridimensional, hasta diez (blanco) ubicado en el centro del círculo superior. Cada sección horizontal, tiene el **valor** especificado de blanco (o negro). Es pues, la medida de la luminancia de la muestra. En práctica se usan los pasos de 1 a 9.

La escala de **Cromaticidad** tiene 16 ó 25 pasos de tonalidades (dependiendo de la precisión que tenga la carta) Cada paso representa una mayor cantidad de color requerido para su composición.

La manera de especificar un color es: se escriben las letras del **Color** antecedida de la subdivisión de color. Seguidamente se coloca una fracción cuyo numerador es el **Valor** (o luminancia) y el denominador es la **Cromaticidad** (o saturación).

Por ejemplo, en la figura 2.18 se seleccionó el plano vertical **5.0Y** (amarillo) donde todos los numeradores en una misma fila son iguales y todos los denominadores en una misma columna, son iguales.

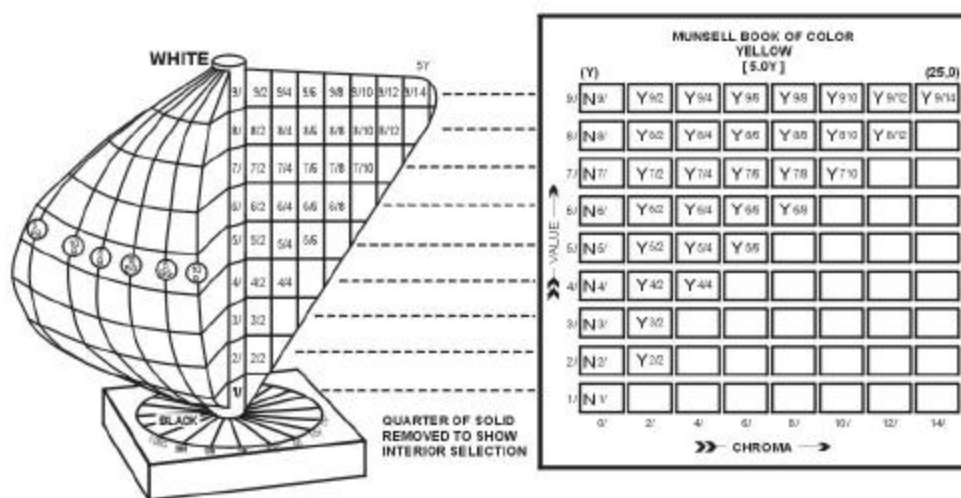


Figura 2.18. Ejemplo en plano vertical amarillo



2.3.5 Colorimetría de las fuentes luminosas

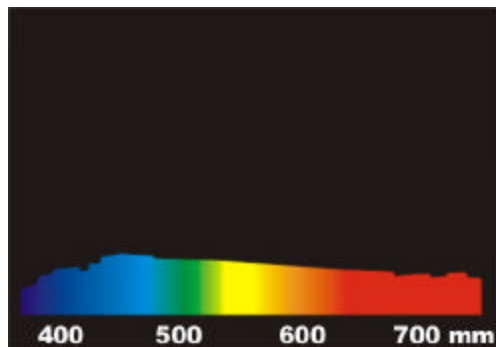


Figura 2.19. Espectro en día despejado

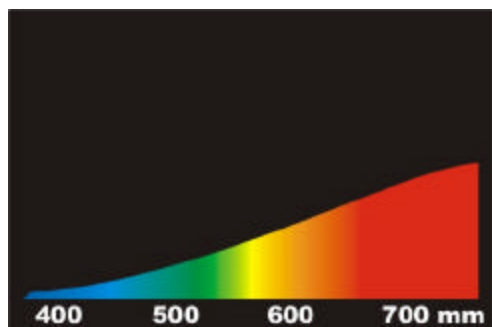


Figura 2.20. Espectro de luz incandescente

En el presente numeral se define el modelo matemático referente a la colorimetría de las fuentes luminosas. Para ello, se iniciará tratando el tema del **espectro de radiación visible** de las fuentes luminosas mas conocidas, partiendo del espectro del sol, como fuente primaria y referencia de color.

La figura 2.19 representa la distribución espectral **del sol en un día despejado**. En ella se pueden notar tres elementos: **a)** Es continuo a lo largo todo el espectro visible. **b)** Aproximadamente cada componente de longitud de onda tiene la misma intensidad y **c)** la radiación continúa tanto por debajo como por encima del espectro visible. En la práctica significa que la radiación solar tiene además, radiaciones infrarrojas y radiaciones ultravioleta.

La figura 2.20 representa la distribución espectral de una fuente de luz **incandescente** basada en un filamento de tungsteno en una atmósfera al vacío, en donde puede alcanzar temperaturas de 1700° C. Las características principales son: **a)** Es continuo a lo largo de todo el espectro visible **b)** a medida que aumenta la longitud de onda, aumenta la intensidad de la radiación en el espectro visible. **c)** La radiación es prácticamente inexistente por fuera del espectro visible hacia el lado del ultravioleta, en tanto que

sigue creciendo por el lado del infrarrojo. Ello quiere decir que la luz incandescente tiene mas intensidad en los colores rojos que en los azules y que irradia mucha energía en forma de calor.

En la figura 2.21 se representa la distribución espectral de una fuente de luz **fluorescente de nueva generación tipo compacta**. El principal cambio aparece al observar un espectro discontinuo, como consecuencia del proceso de excitación atómica con el cual se genera la luz. Las características principales de estas fuentes lumínicas son: **a)** El espectro es discontinuo y presenta bandas de mayor energía radiada en forma de luz; **b)** La intensidad de la radiación en cada longitud es

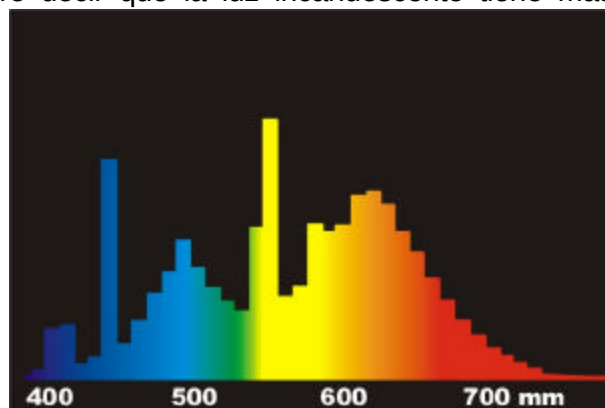


Figura 2.21. Espectro de luz fluorescente tipo compacta



ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ D. C.
UNIDAD EJECUTIVA DE SERVICIOS PÚBLICOS
MANUAL ÚNICO DE ALUMBRADO PÚBLICO

CAPÍTULO II

FUNDAMENTOS

Revisión 00

Fecha 27-09-01

Pág. 25 de 64

diferente y presenta saltos elevados; y **c)** La radiación es prácticamente inexistente por fuera del espectro visible. Esto significa que las fuentes radian luz y no radiaciones ultravioletas o infrarrojas, de modo que se puede anticipar una elevada eficacia lumínica para estas fuentes.

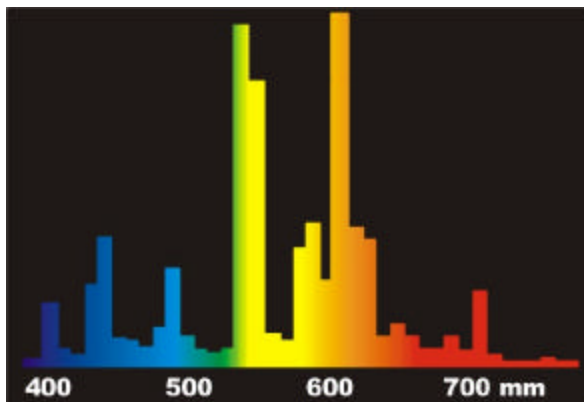


Figura 2.22. Espectro de luz fluorescente color cálido

lumínicas son: **a)** El espectro es discontinuo y presenta bandas de elevada energía radiada en forma de luz; **b)** La intensidad de la radiación en cada longitud es diferente y presenta grandes saltos, concentrados en el amarillo y en el naranja; y **c)** La radiación es prácticamente inexistente por fuera del espectro visible.

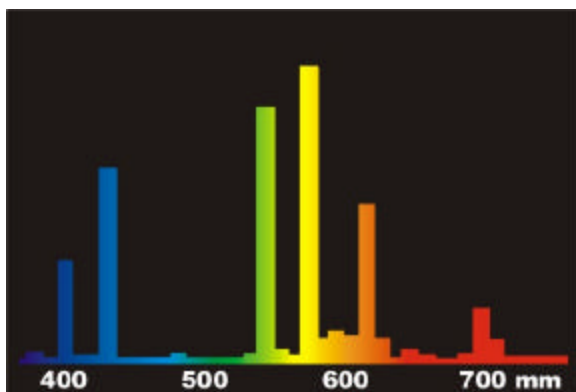


Figura 2.23. Espectro de luz de mercurio en plasma

alumbrado público. Las características principales de estas fuentes lumínicas son: **a)** El espectro es discreto y presenta bandas de elevada energía radiada en forma de luz muy espaciadas en tanto que el resto del espectro prácticamente no existe; **b)** La intensidad de la radiación en cada longitud es diferente y presenta grandes saltos, centrados en el amarillo, el naranja y el azul; y **c)** La radiación es prácticamente inexistente por fuera del espectro visible.

En la figura 2.24 se representa la distribución espectral

La figura 2.22 representa el espectro de energía radiada con énfasis en la banda visible, para una fuente de luz **fluorescente de color cálido**, sin corrección de color, como los que se usan en muchas de las oficinas y centros comerciales de la actualidad. La ventaja de estas fuentes es que son de elevada eficacia lumínica, pero ya se empiezan a distorsionar los colores, en especial los tonos rojos, verdes y azules. Las características principales de estas fuentes lumínicas son: **a)** El espectro es discontinuo y presenta bandas de elevada energía radiada en forma de luz; **b)** La intensidad de la radiación en cada longitud es diferente y presenta grandes saltos, concentrados en el amarillo y en el naranja; y **c)** La radiación es prácticamente inexistente por fuera del espectro visible.

La figura 2.23 representa la distribución espectral de energía para una fuente de luz basada en un **plasma de vapor de mercurio** a alta presión (como las bombillas de vapor de mercurio). La ventaja de estas fuentes es que mantienen una elevada eficacia lumínica, pero la distorsión de colores, en especial de los tonos diferentes al naranja, amarillo y azul es muy elevada, lo que limita su uso a espacios donde no se necesite distinguirlos. Por ejemplo en algunas aplicaciones del

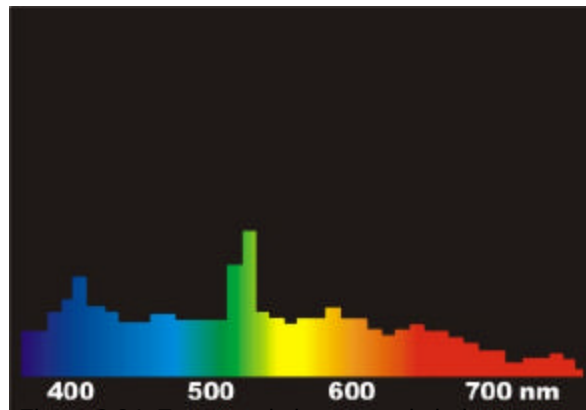


Figura 2.24. Espectro de luz mercurio halógenos



ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ D. C.
UNIDAD EJECUTIVA DE SERVICIOS PÚBLICOS
MANUAL ÚNICO DE ALUMBRADO PÚBLICO

CAPÍTULO II

FUNDAMENTOS

Revisión 00

Fecha 27-09-01

Pág. 26 de 64

de una fuente de luz basada en un **plasma de vapor de mercurio y halogenuros metálicos** a alta presión (como las bombillas de metal halide). Como puede apreciarse, la distribución lograda mediante este proceso es la mas continua de todas las fuentes que usan el fenómeno de la fluorescencia para generar la luz y junto con la incandescente, son las fuentes más parecidas a la luz solar. Las características principales de estas fuentes lumínicas son: **a)** El espectro es en general muy continuo; **b)** La intensidad de la radiación en cada longitud es similar y presenta algunos saltos, en la banda del verde; y **c)** La radiación continúa por fuera del espectro visible con énfasis en la zona ultravioleta. Por ello si se prevé presencia animal cercana, debe usarse en conjuntos ópticos cerrados con vidrios de sílice.

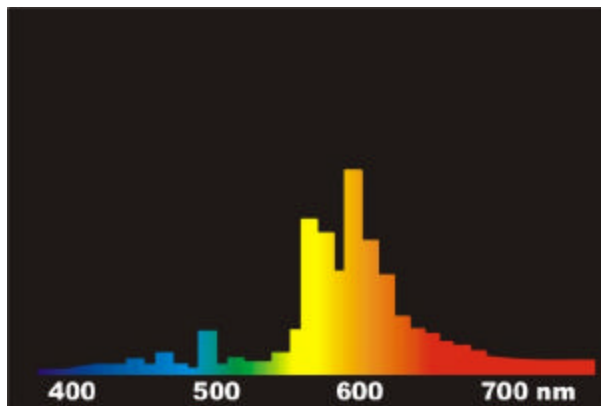


Figura 2.25. Espectro de luz en plasma de vapor de sodio a alta presión

La figura 2.25 representa el espectro de radiación de una fuente de luz basada en un plasma de vapor de sodio a alta presión (bombillas HPS). Las características principales de estas fuentes lumínicas son: **a)** El espectro es discontinuo y presenta bandas de mayor energía radiada en forma de luz; **b)** La intensidad de la radiación se concentra en las bandas amarillo y naranja donde presenta saltos de elevada potencia; y **c)** La radiación es prácticamente inexistente por fuera del espectro visible. Esto significa que las fuentes radian luz y algo de radiaciones infrarrojas, de modo que se puede anticipar una elevada eficacia lumínica para estas fuentes.

La figura 2.26 representa el espectro de radiación de una fuente de luz basada en un plasma de vapor de sodio a baja presión (bombillas LPS). Las características principales de estas fuentes lumínicas son: **a)** El espectro elevadamente discontinuo, pues solo produce luz en una longitud de onda como monocromático; **b)** La intensidad de la radiación se concentra en la banda amarillo, se puede prever que todos los cuerpos se verán en amarillo y negro; y **c)** La radiación es prácticamente inexistente por fuera de la banda del amarillo. Esto significa que las fuentes radian luz amarilla y no mas. Se puede anticipar una elevada eficacia lumínica para estas fuentes y al mismo tiempo una baja calidad en la percepción de los colores.

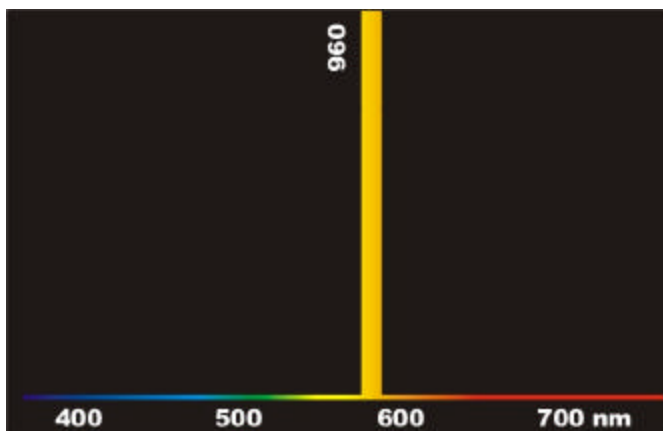


Figura 2.26. Espectro de luz en plasma de vapor de sodio baja presión



ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ D. C.
UNIDAD EJECUTIVA DE SERVICIOS PÚBLICOS
MANUAL ÚNICO DE ALUMBRADO PÚBLICO

CAPÍTULO II

FUNDAMENTOS

Revisión 00

Fecha 27-09-01

Pág. 27 de 64

2.3.5.1 Temperatura de color

En la práctica, el color de luz de una fuente luminosa, para aquellas que no tengan un color señalado, se da a conocer por su temperatura de color, expresada en Kelvin (K). Como temperatura absoluta (T), lo cual resulta más fácil ya que para ello basta con emplear sólo un número.

La temperatura de color de una fuente de luz corresponde, por comparación, a aquella con la que el cuerpo negro presenta el mismo color que la fuente analizada. En el **triángulo cromático** de la figura 2.16 se ha representado también la curva de temperatura de color del cuerpo negro.

Las bombillas incandescentes tienen una temperatura de color comprendida entre los 2.700 y 3.200 K (Kelvin), según el tipo, por lo cual su punto de color determinado por las coordenadas correspondientes queda situado prácticamente sobre la curva del cuerpo negro. Esta temperatura no tiene relación directa con la temperatura del filamento incandescente.

La Figura 2.27 representa una escala en grados centígrados y en temperatura absoluta (grados Kelvin) así como la temperatura de color que dan las diferentes fuentes luminosas, incluido el sol y el cielo boreal.

Los puntos de color de la mayoría de las bombillas, principalmente las de descarga, no coinciden con los de la curva del cuerpo negro, por lo que no se puede establecer una igualdad absoluta de sus colores de luz con los representados por dicha curva. En estos casos se da como valor aquella temperatura del cuerpo negro más parecida a la del color de la luz analizada, denominada **temperatura correlacionada** o de color similar (**T_s**).

2.3.5.2 Rendimiento de color

El término **Rendimiento de color** es una propiedad que se aplica únicamente a las fuentes de luz y no puede ser evaluado por una inspección visual o conociendo su color. Para calcular esta propiedad es necesario conocer todo el espectro de emisión. Vistas sucesivas de objetos con fuentes de luz que parezca bastante iguales pero con diferente distribución espectral, resultan enteramente diferentes en color. Un caso extremo es iluminar objetos con una bombilla de sodio de baja presión (LPS) y luego con un tubo fluorescente amarillo. Los objetos que a la luz del día lucen amarillos, rojos, verdes o azules aparecen muy diferentes bajo cada una de estas dos fuentes: Con el sodio de baja presión lucen de colores tonales amarillos (algo así como ver todo en una escala de “Amarillo y negro”). Bajo la fluorescente, aunque los colores se cambian, todavía es posible reconocer una parte de los colores originales, tal y como se observaron a la luz del sol.

La manera de medir y especificar la propiedad de rendimiento de color se basa en la comparación. Se compara la apariencia de color de una serie de objetos que se chequean con la fuente bajo prueba y la apariencia de color de esos mismos objetos bajo una fuente de luz de referencia.



ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ D. C.
UNIDAD EJECUTIVA DE SERVICIOS PÚBLICOS
MANUAL ÚNICO DE ALUMBRADO PÚBLICO

CAPÍTULO II

FUNDAMENTOS

Revisión 00

Fecha 27-09-01

Pág. 28 de 64

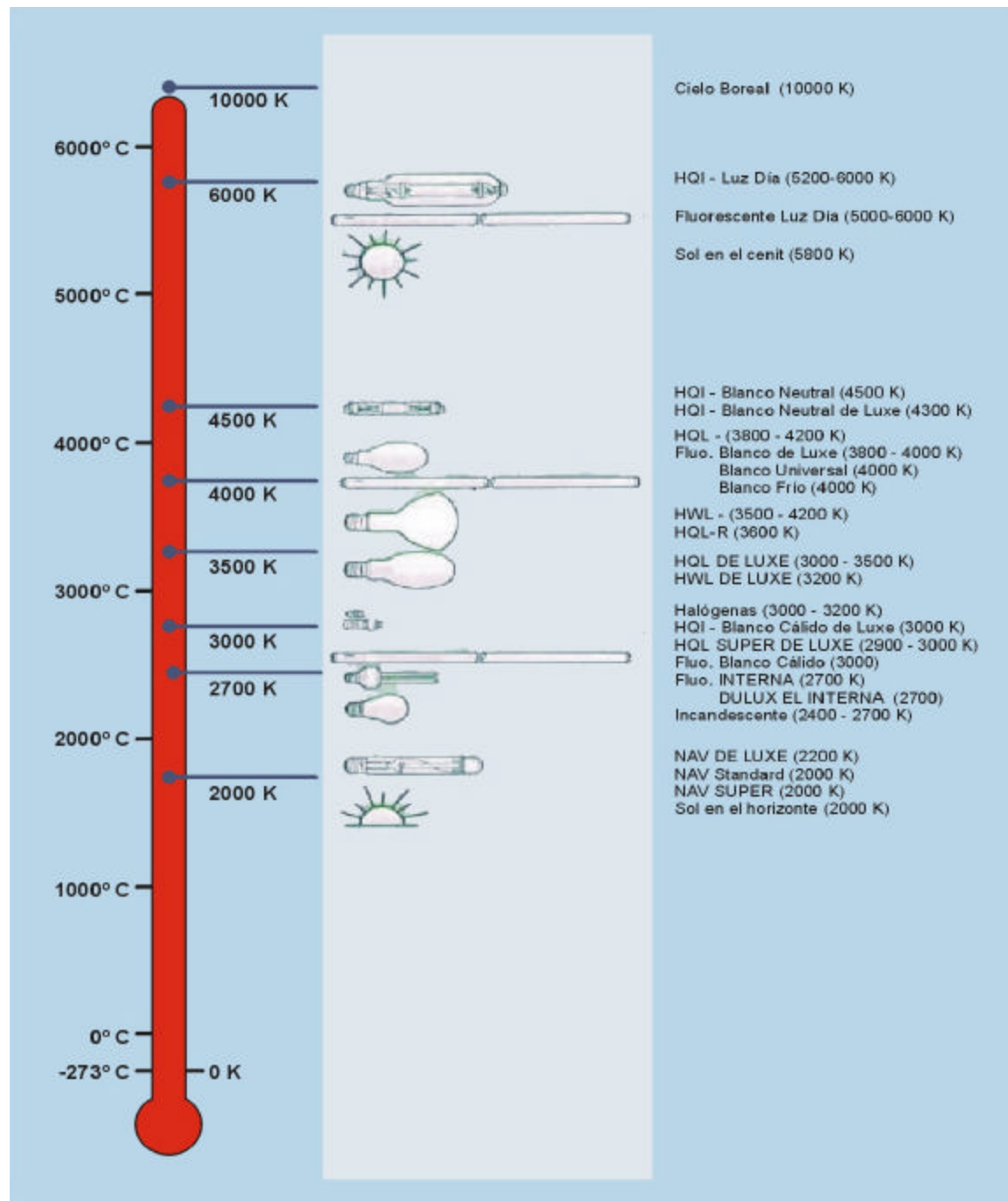


Figura 2.27. Temperatura de color de fuentes luminosa



ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ D. C.
UNIDAD EJECUTIVA DE SERVICIOS PÚBLICOS
MANUAL ÚNICO DE ALUMBRADO PÚBLICO

CAPÍTULO II

FUNDAMENTOS

Revisión 00

Fecha 27-09-01

Pág. 29 de 64

Como se analizó en el numeral 2.3, el color es el resultado de integrar, en todo el espectro visible, el producto de la función de **sensibilidad del observador**, el espectro de la **f fuente luminosa**, el espectro de reflexión del **objeto considerado** y el espectro de cada uno de los **tristímulus** definidos por la CIE. De esta manera, la espectro-radiometría se convierte en una herramienta para calcular el color de una fuente de luz.

Las medidas radiométricas son puramente físicas en tanto que la mera evaluación del color por un observador, basado solamente en su percepción, puede convertirse en meramente psicológica.

El test básico propuesto por la CIE para calcular el rendimiento de color de una fuente hace referencia a ocho (8) objetos de colores previamente definidos (patronados). Cuando las diferencias entre los colores calculados y los patrones es pequeña, el índice es elevado. Si las diferencias son elevadas, entonces, el índice de rendimiento de color es bajo.

2.3.5.3 Índice de reproducción cromática

El dato de temperatura de color correlacionada se refiere únicamente al color de la luz, pero no a su composición espectral, la que resulta decisiva para la reproducción de los colores. Así, dos fuentes de luz pueden tener un color muy parecido y poseer al mismo tiempo unas propiedades de reproducción cromática muy diferentes.

El concepto de reproducción cromática de una fuente luminosa se define como el aspecto cromático que presentan los cuerpos iluminados con esta misma fuente, en comparación con el que presentan bajo una luz de referencia.

La determinación de las propiedades de reproducción cromática de las fuentes luminosas se realiza según un procedimiento aprobado por la CIE, que consiste en iluminar un color de muestra establecido con la luz de referencia y con la que se analiza. La evaluación cuantitativa del desplazamiento de color que se produzca, representa el índice de reproducción cromática, que puede alcanzar un valor máximo de 100 tomado para la luz de referencia (el sol). El índice de reproducción cromática puede ser:

- **GENERAL: R_g** como promedio del desplazamiento para un conjunto de ocho colores de muestra.
- **ESPECIAL: R_e** , para un solo color, de un conjunto de catorce descritos a continuación:

Según la luz de referencia que se tome, puede ocurrir que al iluminar indistintamente un mismo objeto con luces de igual o muy parecido índice general de reproducción cromática **R_g** , presenta diferente aspecto; tal es el caso cuando se observa en un almacén el color que presenta un género textil bajo la luz de una bombilla incandescente, o cuando esto se hace a la luz del día.



ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ D. C.
UNIDAD EJECUTIVA DE SERVICIOS PÚBLICOS
MANUAL ÚNICO DE ALUMBRADO PÚBLICO

CAPÍTULO II

FUNDAMENTOS

Revisión 00

Fecha 27-09-01

Pág. 30 de 64

Ello se debe a que no obstante tener ambas luces el mismo índice general de reproducción cromática, sus distribuciones espectrales son diferentes.

Tabla 2.2. Índice de Reproducción cromática

COLOR CIE	ASPECTO A LA LUZ DEL DIA	COLOR CIE	ASPECTO A LA LUZ DEL DIA
1	Rosa pálido	8	Lila
2	Amarillo mostaza	9	Rojo intenso
3	Amarillo verdoso	10	Amarillo intenso
4	Verde	11	Verde intenso
5	Azul claro	12	Azul intenso
6	Azul celeste	13	Rosa(color de la piel)
7	Violeta	14	Verde clorofila

De ahí que para determinar las propiedades cromáticas de una fuente de luz, además del valor **R_g** se necesita conocer también su temperatura de color similar **T_s**.

Existe una estrecha relación en la que intervienen diversos factores, entre el índice general de reproducción cromática **R_g** y el rendimiento luminoso **h** de una fuente de luz, de tal forma que a mayor índice **R_g**, corresponde menor rendimiento.

2.3.6 Influencia psicofisiológica del color

Está demostrado que el color del medio ambiente en el que nos desenvolvemos influye notablemente en nuestro estado de ánimo. Por ello, el emplear los colores de forma adecuada es un tema del mayor interés para los psicólogos, arquitectos, luminotécnicos y decoradores.

No se pueden establecer reglas fijas para la elección del color apropiado con el fin de conseguir un efecto determinado; pues cada caso requiere ser tratado de una forma particular. Sin embargo, existe una serie de experiencias en las que se han comprobado las sensaciones que producen en el individuo determinados colores.

Una de las primeras sensaciones es la de calor o frío, de aquí que se hable de **colores cálidos** y **colores fríos**. Los colores cálidos son los que en el espectro visible van desde el rojo al amarillo verdoso (Temperatura de color correlacionada <2700 K) y los fríos (Temperatura de color correlacionada >4000 K), desde el verde hasta el azul.

Un color será más cálido o más frío según sea su tendencia hacia el rojo o el azul, respectivamente.

Los colores cálidos son dinámicos, excitantes y producen una sensación de proximidad, mientras que los colores fríos calman y descansan, produciendo una sensación de lejanía son depresivos y dan la sensación de espacios distantes. Así mismo, los colores claros animan y dan sensación de ligereza, mientras que los colores oscuros deprimen y producen sensación de pesadez.



Como conclusión de lo anterior, se deduce que el conocimiento de la curva de distribución espectral de las fuentes de luz es imprescindible para conseguir el efecto cromático deseado.

2.4 LEYES DE LA LUMINOTECNIA

A continuación se explicarán una serie de leyes y relaciones trigonométricas muy usadas en luminotecnia y que han sido reconocidas como las **Leyes de la Luminotecnia**. Estas son: la ley inversa del cuadrado, la ley del coseno, el cálculo de la iluminación horizontal y vertical. Se finaliza explicando los fenómenos de la reflexión, la refracción y la absorción de la luz.

2.4.1 Ley de la inversa del cuadrado

Para un mismo manantial luminoso, la iluminancia en diferentes superficies situadas perpendicularmente a la dirección de la radiación, son directamente proporcionales a la intensidad luminosa de la fuente e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que las separa. Véase la Figura 2.28.

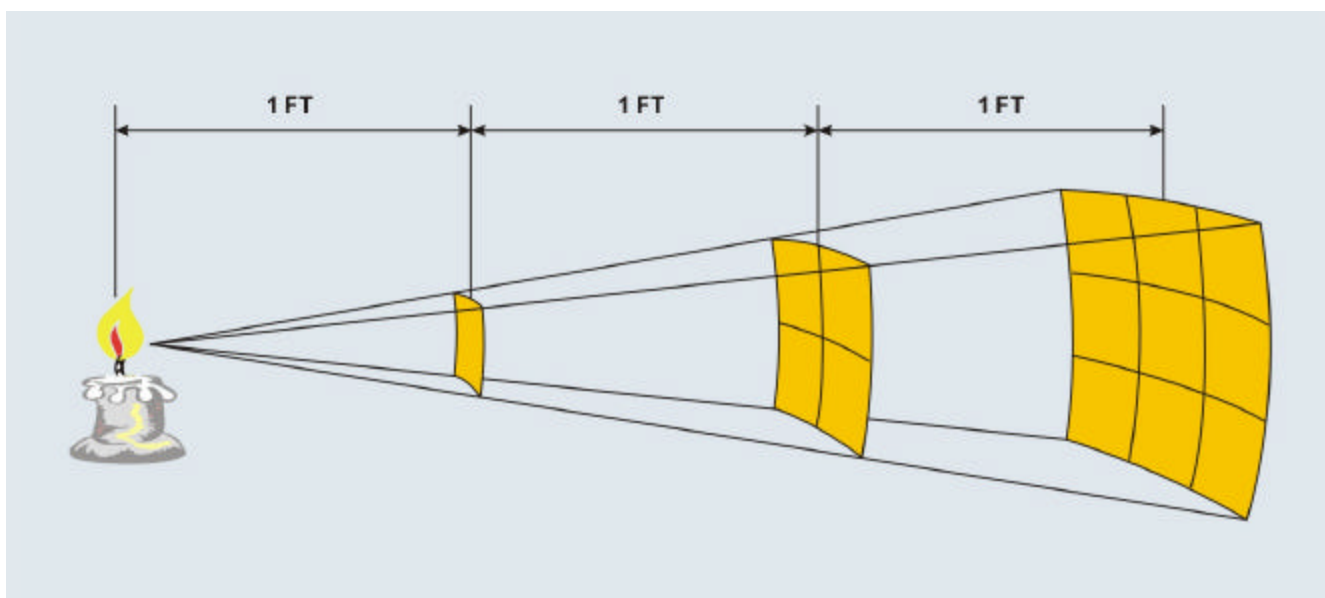


Figura 2.28. Ley de la inversa del cuadrado

$$E = \frac{I}{d^2}$$

Esta ley se cumple cuando se trata de una fuente puntual, de superficies perpendiculares a la dirección del flujo luminoso y cuando la distancia es grande con relación al tamaño del foco (Se asume grande cuando su relación supera el 10:1). Como en general son pocas las oportunidades en las cuales la intensidad luminosa llega en dirección normal a la superficie, es necesario establecer una fórmula o



modelo mas general. Por ello, se han contemplado las siguientes leyes:

2.4.2 Ley del Coseno

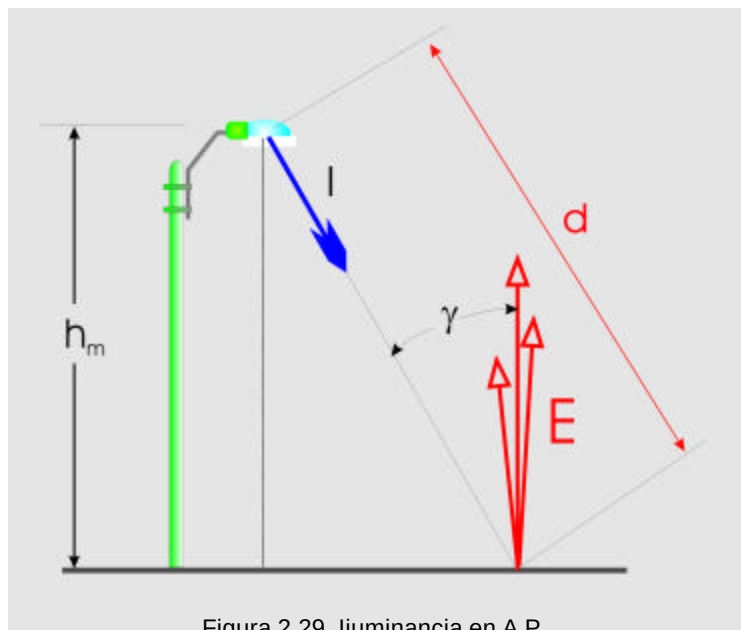


Figura 2.29. Iluminancia en A P.

La iluminancia en un punto cualquiera de una superficie es directamente proporcional al coseno del ángulo de incidencia de los rayos luminosos en el punto de iluminado e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia entre el punto y la fuente (ver figura 2.29).

En la ley inversa del cuadrado la superficie estaba situada perpendicularmente a la dirección de los rayos luminosos. Pero cuando forma con ésta un determinado ángulo α , el resultado hay que multiplicarlo por el coseno del ángulo de incidencia, pues de esta manera se calcula solo su componente vertical, tal y como se establece en la figura 2.29

En la práctica, generalmente no se conoce la distancia del foco al punto considerado de manera directa, sino su altura h_m ; es decir, la distancia entre el foco y el plano horizontal en el cual se encuentra el punto, (Ver la ecuación planteada) por lo que en lugar de la fórmula anterior se emplea una en la que interviene la altura h_m .

Esta fórmula se conoce como la **Ley del coseno al cubo**. Por ello resulta muy útil en los cálculos de alumbrado público.

2.4.3 Iluminación horizontal

Cuando se requiere un diseño cuidadoso de la iluminación, como en los estudios de televisión a color y pistas atléticas para campeonatos de ligas mayores, es conveniente introducir un análisis de iluminación horizontal y vertical.

$$E = \frac{I}{d^2} \cos g \quad \Rightarrow \quad E = \frac{I}{h^2} \cos^3 g$$

La componente de iluminación horizontal se calcula multiplicando la intensidad luminosa incidente por el coseno trigonométrico del ángulo de incidencia denominado g y dividiendo por el cuadrado de la distancia entre la fuente y el punto de cruce con la superficie, tal y como se referencia en la figura



2.30

La **iluminación horizontal** es la comúnmente aplicada en alumbrado público y **corresponde a la iluminación sobre un plano que está horizontal**.

Por ello, la componente de iluminación horizontal se observa en la figura 2.30 como la magnitud de un vector normal a la superficie iluminada.

$$E_h = \frac{I}{h^2} \cos^3 g$$

2.4.4 Iluminación vertical

La **iluminación vertical** se utiliza para evaluar diseños de fachadas de edificios, vías peatonales, monumentos y en escenarios deportivos, debido a que ésta es un requisito para garantizar la calidad de la visión humana en planos verticales. Igualmente define uno de los parámetros de calidad requerido en las transmisiones de televisión.

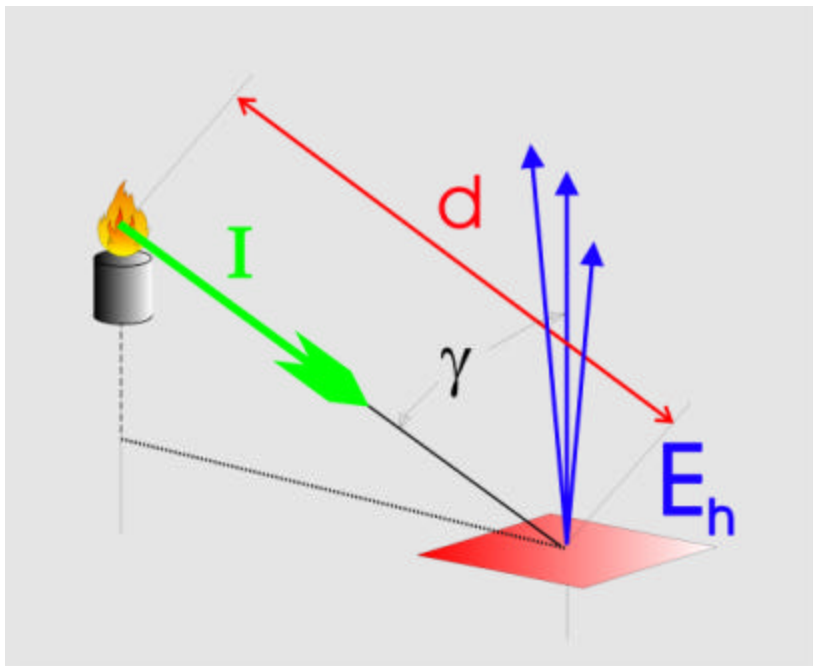


Figura 2.30. Ley del Coseno

$$E = \frac{I}{d^2} \text{ Sen } g \quad \Rightarrow \quad E = \frac{I^3}{h^2} \text{ Sen}^3 g$$

Corresponde la iluminación vertical a la iluminación sobre un plano que está vertical.

La componente de iluminación vertical se calcula multiplicando la intensidad luminosa incidente por el seno trigonométrico del ángulo de incidencia denominado **g** y dividiendo por el cuadrado de la distancia entre la fuente y el punto de cruce con la superficie, tal y como se referencia en la figura 2.31.

La componente de iluminación vertical se observa sobre la figura 2.31 como la magnitud de un vector normal a la superficie vertical iluminada por la intensidad luminosa I.

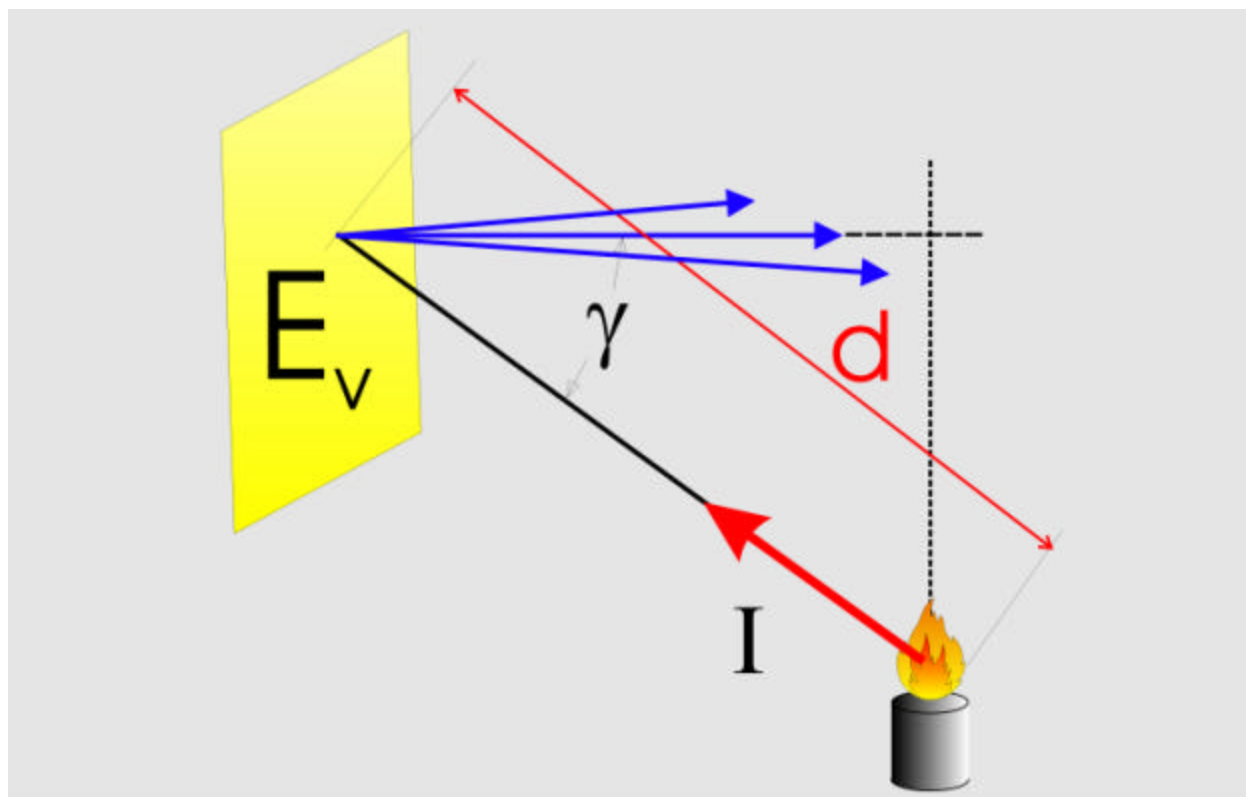


Figura 2.31. Iluminación vertical

2.4.5 Reflexión

Si un rayo luminoso incide sobre una superficie especular, se refleja de forma que el ángulo de incidencia es igual al de reflexión, como se aprecia en la figura 2.32

Esta reflexión depende del pulimento superficial, de modo que puede ser **dirigida**, (o especular propiamente) como en los espejos y metales pulimentados y planos.

Se puede considerar reflexión dirigida si al menos el 80% del flujo incidente se refleja

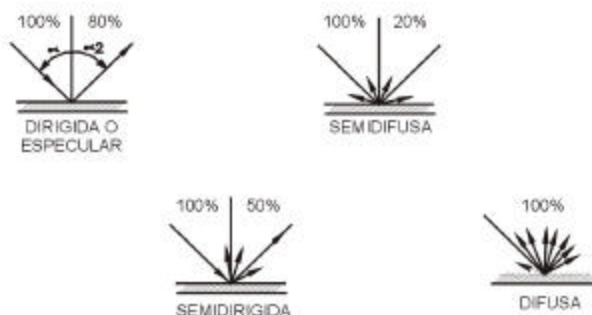


Figura 2.32. Reflexión



ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ D. C.
UNIDAD EJECUTIVA DE SERVICIOS PÚBLICOS
MANUAL ÚNICO DE ALUMBRADO PÚBLICO

CAPÍTULO II

FUNDAMENTOS

Revisión 00

Fecha 27-09-01

Pág. 35 de 64

en la dirección preferencial en la cual el ángulo de incidencia es igual al ángulo de reflexión.

Se presenta reflexión **Difusa**, como en las superficies mate, cuando no es posible determinar el ángulo de salida. Es decir, hay una cantidad inferior al 20% de la luz incidente que se refleja en un ángulo de reflexión igual al ángulo de salida y se presenta reflexión en todas direcciones.

Este es el caso de una tela blanca y corresponde al punto opuesto de la reflexión especular, pues no es posible determinar el ángulo de reflexión o de salida principal de los rayos de luz

La reflexión **semidirigida**, producida por superficies rugosas y brillantes en las cuales se distingue de manera vaga la dirección principal de reflexión.

La reflexión **Semidifusa**, producida por superficies blancas y esmaltadas y es posible que una porción entre el 20 y el 50% de la luz mantenga el ángulo principal de reflexión de la luz.

En iluminación, todos los elementos anteriores tienen aplicación práctica: bien sea en iluminación interior o en exteriores.

2.4.6 Refracción

Es la propagación de la luz a través de los cuerpos transparentes.

En este fenómeno la dirección de los rayos se afecta por la refracción y puede ser así mismo **dirigida**, **difusa**, **semidirigida** y **Semidifusa** según que el haz se disperse en mayor proporción una vez atravesase el material refractor. Estas condiciones se establecen en la figura 2.33

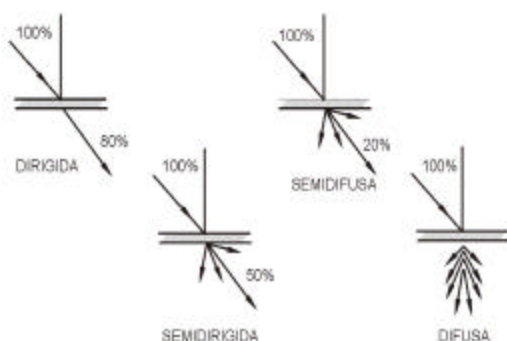


Figura 2.33 Refracción

Existen muchos tipos de luminarias que aplican estas cualidades de los materiales para manejar los haces de luz hacia ciertos puntos donde se pueden aprovechar de manera mas eficiente.

La mayor parte de las luminarias de alumbrado público hace uso del fenómeno de la **refracción dirigida** dando origen a refractores de **vidrio liso plano** y **vidrio liso curvo**.

Otra tecnología más avanzada y generalmente mas costosa, utiliza refractores de superficies tanto de entrada como de salida que no son paralelos ente sí, de modo que el ángulo de refracción de cada sector del refractor, depende de manera exclusiva de su diseño.



Estos diseños se basan en el modelo matemático estudiado y conocido como el **Principio de Huygens** por el cual, definidos los índices de refracción para dos medios, los ángulos de incidencia y refracción en la interfase se relacionan por la **Ley de Snell**:

$$n_1 \times \text{Sen}q_1 = n_2 \times \text{Sen}q_2$$

donde n_1 y n_2 son los índices de refracción de los medios transparentes y q_1 , q_2 son los ángulos de incidencia y refracción respectivamente.

2.4.7 Absorción

Es el fenómeno por el cual la cantidad de luz incidente es disminuida al reflejarse en una superficie o al refractarse a través de un material traslúcido. En los fenómenos de reflexión y transmisión, parte de la luz que incide sobre los cuerpos es absorbida en mayor o menor proporción según la constitución de los materiales.

La Absorción siempre representa una pérdida de luz.

2.5 FOTOMETRIA

En el presente capítulo se define con mayor profundidad el procedimiento matemático aplicado a los cálculos fotométricos, los cuales son fundamentales para las aplicaciones al diseño de iluminación. El capítulo consta de un numeral sobre unidades fotométricas, otro sobre las Interrelaciones matemáticas entre las unidades fotométricas hasta llegar a la aplicación práctica en luminotecnía, como son las curvas fotométricas de una luminaria. Finalmente se aplica el modelo matemático llevado a gráficas, para clasificar las luminarias de alumbrado público.

2.5.1 Unidades fotométricas

Antes de iniciar una explicación mas

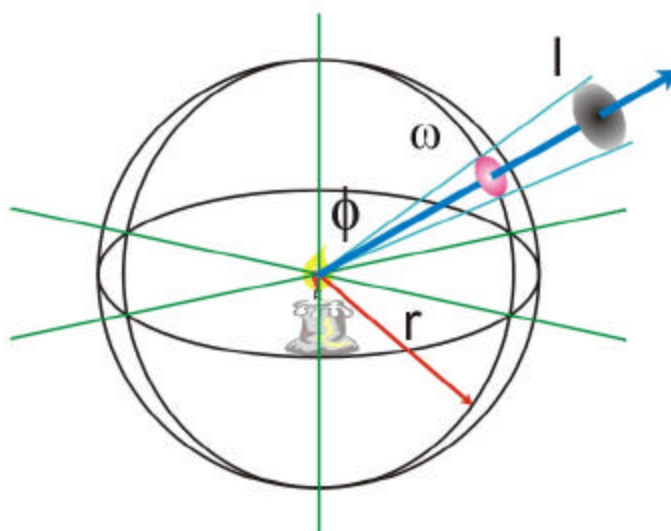


Figura 2.34. Intensidad luminosa



ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ D. C.
UNIDAD EJECUTIVA DE SERVICIOS PÚBLICOS
MANUAL ÚNICO DE ALUMBRADO PÚBLICO

CAPÍTULO II

FUNDAMENTOS

Revisión 00

Fecha 27-09-01

Pág. 37 de 64

amplia sobre los cálculos fotométricos utilizados en luminotecnia, es conveniente ampliar las definiciones mas importantes del tema, toda vez que esto, permite aclarar los términos matemáticos y el cálculo utilizado.

2.5.2 Intensidad luminosa

La intensidad luminosa es el límite del cociente entre la cantidad de energía radiada en forma de luz (flujo luminoso f medido en lúmenes) y el ángulo sólido subtendido (w medido en este-radianes). Es por tanto, un vector cuya magnitud y dirección corresponden a las de la intensidad luminosa. Se representa por la letra I y su unidad es la candela (Cd). Una vela de cera corriente tiene una intensidad luminosa de aproximadamente 1 Cd en dirección horizontal. En la figura 2.34 se puede observar el efecto de llevar la superficie esférica encerrada por el ángulo sólido w a una dimensión cada vez menor, a la vez que el flujo luminoso también se va volviendo menor.

El ángulo sólido w se calcula a su vez, como el cociente entre la superficie esférica subtendida y que corresponde a la mostrada en color rojo y el cuadrado del radio r , con el cual se traza la esfera de la que hace parte ésta superficie.

2.5.3 Flujo luminoso

$$f = \int_{w=0}^{w=1} I dw$$

Es la cantidad de luz incidente sobre una superficie de un metro cuadrado, dispuesta de manera que cada uno de sus puntos está a una distancia de un metro del foco, en el que se encuentra una fuente luminosa uniforme de una candela, por unidad de tiempo.

$$I = \lim_{w \rightarrow 0} \frac{df}{dw}$$

El flujo se representa por la letra f siendo su unidad el lumen (Lm) que, como unidad de potencia, corresponde a 1/680 W emitidos en la longitud de onda de 5500 Å (Angstrom).

$$\oint dw = 4p$$

Si una fuente tiene una intensidad luminosa de 1 Cd en todas direcciones, el flujo luminoso total de dicha fuente será de $4p$ lúmenes (12.56 lúmenes) y corresponde al resultado de evaluar la integral cerrada sobre una superficie esférica descrita en el presente numeral.

2.5.4 Eficacia lumínica

Igualmente conocido como *eficacia luminosa*, expresa la relación entre el flujo que emite una fuente de luz y la potencia eléctrica absorbida para su obtención. La eficacia se expresa mediante la letra η (eta), siendo su unidad el lumen por vatio (Lm/W). A pesar de las unidades referenciadas, es necesario aclarar que tanto los lúmenes evaluados como los vatios, corresponden a medidas de energía por unidad de tiempo. Ello hace que, con una adecuada conversión de unidades, el



rendimiento luminoso en realidad sea una medida adimensional.

La eficacia máxima teórica que puede obtenerse en luz monocromática de 5.500 Å (Ángstrom) es de 680 Lm/W.

Los rendimientos luminosos obtenidos hasta ahora quedan muy por debajo de ese valor. Es común encontrar fuentes luminosas con una eficacia entre 15 y 200 lúmenes/vatio. (Referirse a la sección 3.1.2.3 del presente manual, Fuentes luminosas).

La evaluación de la eficacia luminosa constituye una herramienta importante de selección de las fuentes lumínicas, toda vez que un elevado valor implica mejor aprovechamiento del recurso energético eléctrico.

Sin embargo, no debe ser el único elemento de decisión por cuanto hay trabajos visuales que requieren además de cantidad de luz, calidad. El rendimiento luminoso no da información alguna sobre la calidad de la luz.

2.5.5 Iluminancia

La iluminancia de una superficie plana es la relación entre el flujo luminoso que recibe la superficie de una manera uniforme y el área de la misma. Se representa por la letra E y su unidad es el *Lux* (1 Lux=1 lúmen/m²).

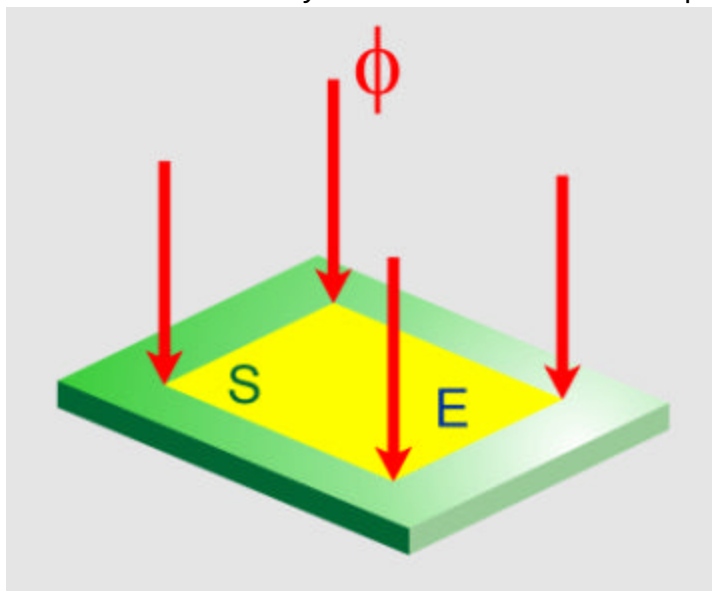


Figura 2.35. Iluminancia

Una superficie plana S se encuentra iluminada con una densidad de *Un Lux*, cuando sobre ella incide un flujo uniforme *f* de un lúmen por cada metro cuadrado. Ver figura 2.35

Otra forma de calcular la iluminación en un punto sobre un plano, que resulta muy útil para los cálculos en alumbrado público es calculando la componente normal de la intensidad luminosa sobre el plano y dividiendo el resultado por el cuadrado de la distancia entre la fuente y el plano. (Ver numeral 2.3.2 sobre la leyes de la luminotecnía).

$$E = \frac{f}{S}$$

Esta forma de calcular



iluminancia es importante de tener en cuenta, además, porque es la forma como trabaja la mayor parte del software de cálculos lumínicos.

El lux es el término más usado para describir una instalación de alumbrado pero no hay que olvidar que representa solamente la cantidad de luz que llega a un plano y no da indicación alguna sobre la calidad (uniformidad, deslumbramiento, color, etc). de la iluminación.

2.5.6 Luminancia

La luminancia de una superficie en una dirección determinada es la relación entre la intensidad luminosa en dicha dirección y la superficie aparente s' (superficie vista por el observador situado en la misma dirección). Se representa por la letra L , siendo su unidad en el Sistema Internacional SI la Candela por metro cuadrado (Cd/m^2 Internacionalmente se conoce como el NIT). Se usa eventualmente la unidad de Candela por centímetro cuadrado o $STILB$ descrita en el sistema de medida CGS. Ver figura 2.36

Puede ser *directa* (brillo o antiguamente luminosidad) cuando corresponde a un manantial luminoso; o *indirecta*, cuando se trata del reflejo de un objeto iluminado. La luminancia es la que produce en el ojo la sensación de claridad, pues la luz no se hace visible hasta que es reflejada por los cuerpos.

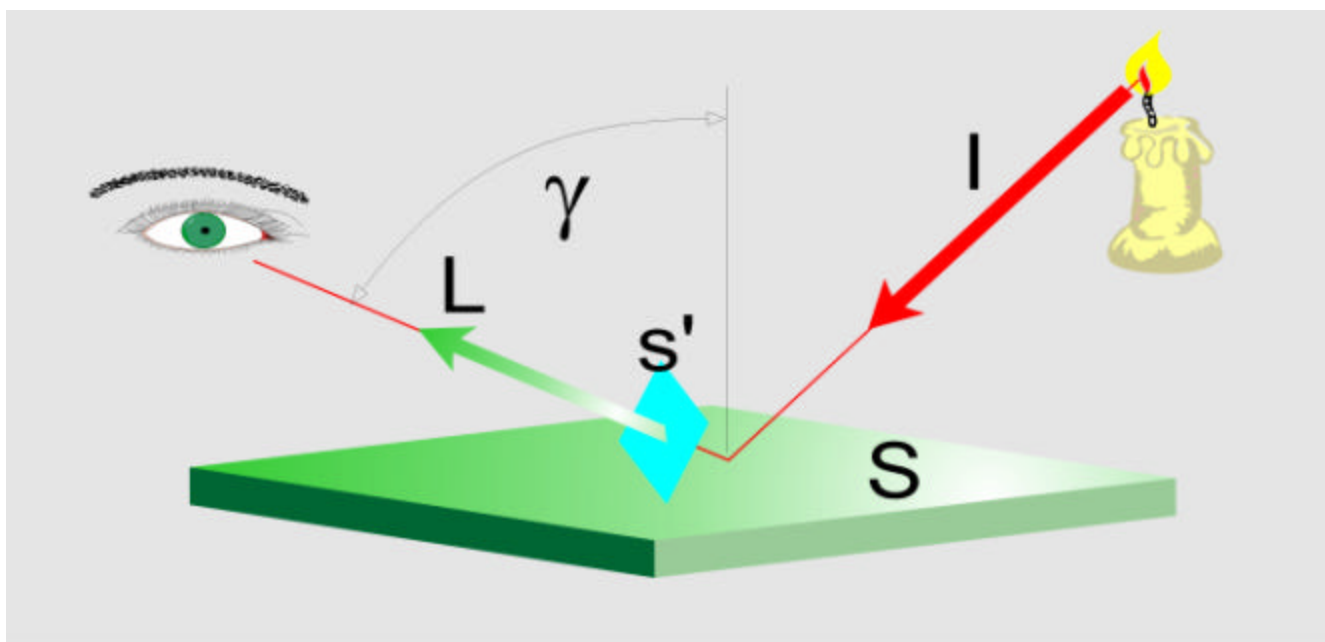


Figura 2.36. Luminancia



La mayor o menor claridad con que se ven los objetos igualmente iluminados, depende de su luminancia.

La percepción de la luz es realmente la percepción de diferencias de luminancia. Se puede decir, por tanto, que el ojo ve diferencias de luminancia y no de iluminación. Grandes variaciones de luminancia en el campo visual pueden causar deslumbramiento y fatiga visual. Igualmente sucede si es muy baja.

El luminotécnico es en realidad un ingeniero del brillo, ajustando las diferentes relaciones de brillo en el campo de la tarea visual, equipo de iluminación, las paredes, techo, etc. De tal manera que resulten las mejores condiciones para la percepción visual y la conservación de la vista, sin olvidar las consideraciones directas por factores decorativos.

En alumbrado público, la luminancia se calcula como una fracción de la iluminancia en una superficie. Esta fracción se denomina Factor de Luminancia y depende de la geometría del sistema.

2.5.6.1 Contraste de luminancia

Ya se ha mencionado anteriormente la relación entre el contraste y la percepción visual. Es posible mejorar la seguridad de la visión a partir de mejorar la percepción y ésta se mejora con dos

elementos básicos: aumentando la luminancia promedio y su uniformidad en el campo visual y aumentando el contraste con el objeto. En las áreas rurales y donde los alrededores son oscuros, la luminancia de la calzada es el factor determinante para garantizar la visibilidad.

El contraste aquí especificado, se entiende como la relación siguiente:

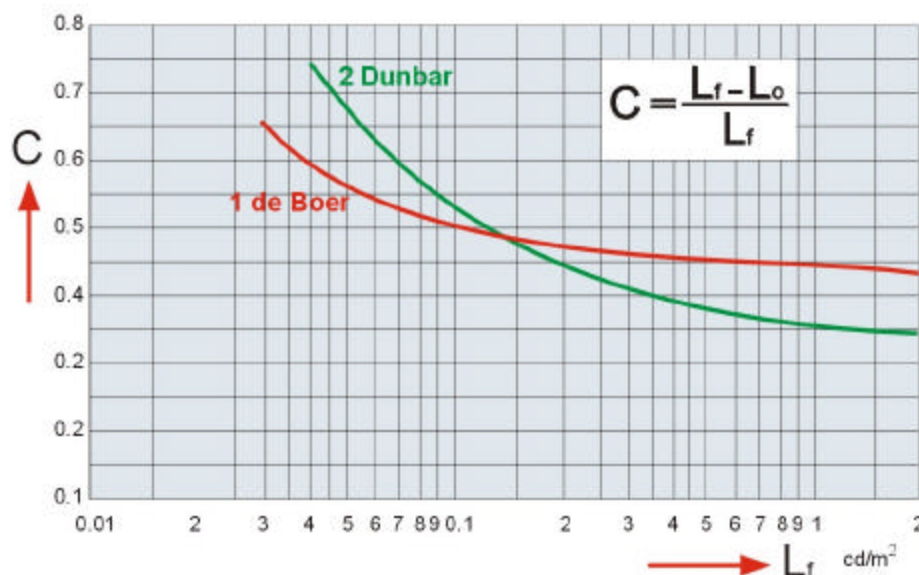


Figura 2.37 Contraste de luminancia



ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ D. C.
UNIDAD EJECUTIVA DE SERVICIOS PÚBLICOS
MANUAL ÚNICO DE ALUMBRADO PÚBLICO

CAPÍTULO II

FUNDAMENTOS

Revisión 00

Fecha 27-09-01

Pág. 41 de 64

Se han realizado numerosas investigaciones sobre la incidencia de los niveles medios de luminancia en las vías sobre la percepción visual. Las experiencias de J. B. De Boer y Dunbar (en Gran Bretaña) tanto para observadores fijos como para vehículos en movimiento respectivamente han dado como resultado la curva de la figura 2.37 que establecen la variación del contraste mínimo C entre la luminancia del objeto L_o y la luminancia de fondo L_f en función de ésta y sin considerar ningún tipo de deslumbramiento.

$$C = \frac{(L_f - L_o)}{L_f}$$

De la gráfica se obtiene que la luminancia media de la vía debe ser de 2 Cd/m^2 para asegurar un contraste de 3:1 entendido como la relación L_f / L_o .

2.5.6.2 Deslumbramiento

Se reconoce en alumbrado público que el deslumbramiento tiene dos componentes: El primero es el **deslumbramiento que molesta** al observador durante la conducción a través de un área equipada con una iluminación dada, aunque no reconozca exactamente cómo se produce esa falta de confort; y el segundo, es el **deslumbramiento incapacitivo**, consistente en una disminución real de la capacidad visual del observador, que se expresa por el aumento del **umbral diferencial de luminancia** en un objeto de prueba típico.

Los dos métodos para evaluar estas condiciones que significan pérdida de visibilidad tienen limitaciones durante su consideración, debido al conocimiento actual acerca del tema. En la actualidad se suscribe a instalaciones de alumbrado realizadas mediante postes convencionales (hasta 16 metros de altura), interdistancias generales en unos rangos limitados (entre 5 y 50 metros).

Investigaciones acerca del deslumbramiento sobre instalaciones con mástiles, proyectores, postes y faroles decorativos aún no se han estudiado. La extensión de los estudios sobre vías públicas convencionales tampoco se ha llevado a instalaciones diferentes a las convencionales. Por lo tanto, en este tipo de instalaciones, el deslumbramiento molesto calculado como si fueran calzadas vehiculares no tiene aplicación.

Por otra parte, el deslumbramiento incapacitivo no tiene en cuenta sino la sensación visual y no la fatiga asociada con la presencia en el tiempo del fenómeno. Así, es conveniente establecer reglas para limitar por separado las dos componentes del deslumbramiento, puesto que tampoco se ha demostrado la relación funcional entre ellas.

El **deslumbramiento incapacitivo** se revisa a partir del cálculo de dos componentes: la luminancia de velo L_v y el aumento del umbral de contraste TI o Incremento del umbral.

La luminancia de velo, en un Sistema de alumbrado público bien diseñado debe permanecer entre el 10 y el 20% del valor de luminancia media L_{prom} calculada para la instalación.

El incremento del umbral en tanto, debe permanecer por debajo de 10% en instalaciones de



autopistas y avenidas de acuerdo a lo establecido en el capítulo VI, y por debajo del 15% en el resto de vías públicas.

El **deslumbramiento perturbador** o molesto, se revisa a partir del cálculo del índice de confort G en una instalación de alumbrado público convencional. Su escala de valor va de 1 a 9. Valores para una instalación lumínica de calidad están en el rango de 6 a 9.

2.6 CÁLCULOS LUMÍNICOS

Para iniciar un cálculo lumínico destinado a alumbrado público, se deberán tener en cuenta tanto la función del espacio público como los detalles y características del sitio de instalación y de los puntos de luz. La exigencia del alumbrado público está en relación directa con la intensidad del tráfico y la velocidad media de los vehículos que la transitan. A continuación se definirá la forma de realizar cada uno de los cálculos lumínicos necesarios en los proyectos de iluminación:

2.6.1 Cálculo de la iluminancia en un punto

Las normas internacionales mencionan de manera sistemática niveles de iluminancia para alumbrado público de vías como una componente que se debe tener en cuenta en instalaciones no convencionales. No obstante, hay muchas aplicaciones en las cuales es necesario conocer la iluminación en luxes en un punto dado del plano de la vía. Para esos casos, se presentará a continuación la metodología de cálculo completa. Igualmente es útil en razón de que el presente manual contempla la posibilidad de utilizar parámetros de diseño basados en iluminancia en zonas verdes, parques y en iluminación de grandes áreas por medio de mástiles.

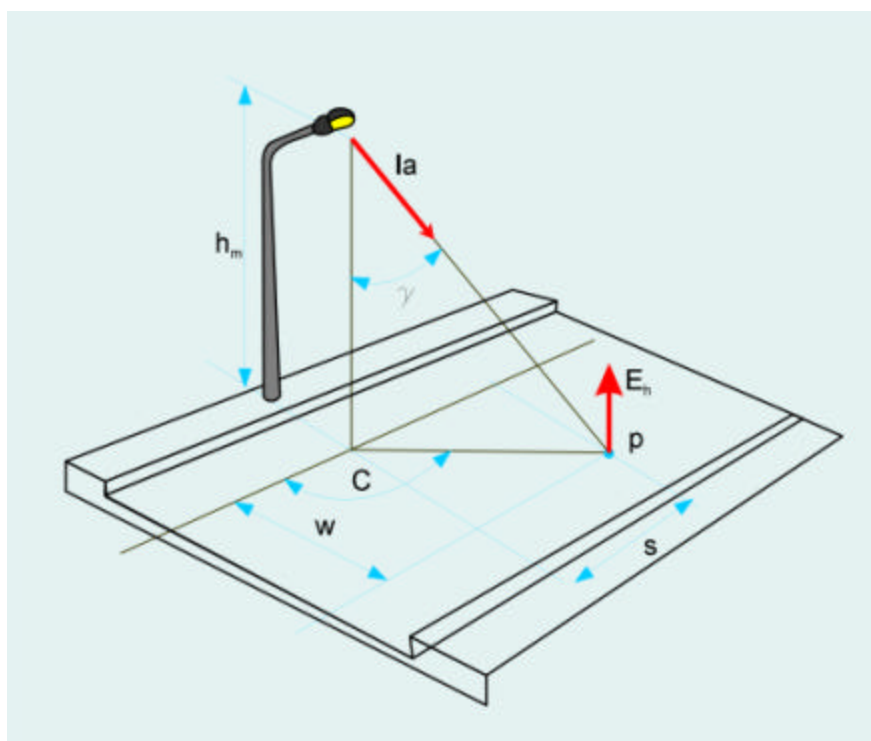


Figura 2.38. Parámetros a considerar en los cálculos



La metodología parte de la fórmula dada para la Ley del coseno (ver sección 2.4.2) Aplicando la geometría del sistema dada en la figura 2.38, se obtiene un valor para la Iluminancia horizontal dada. Donde h_m es la altura de montaje de la luminaria, θ es el ángulo de incidencia del haz de luz o candelas representado por I_a en la dirección al punto P . El diseñador deberá obtener el valor de I_a a partir de la **matriz de intensidades** y la geometría del sistema.

Es necesario tener en cuenta que si hay mas de una fuente aportando luz al punto de cálculo P , es necesario considerar cada aporte por separado y luego sumarlos.

2.6.2 Cálculo de la Iluminancia media de una vía

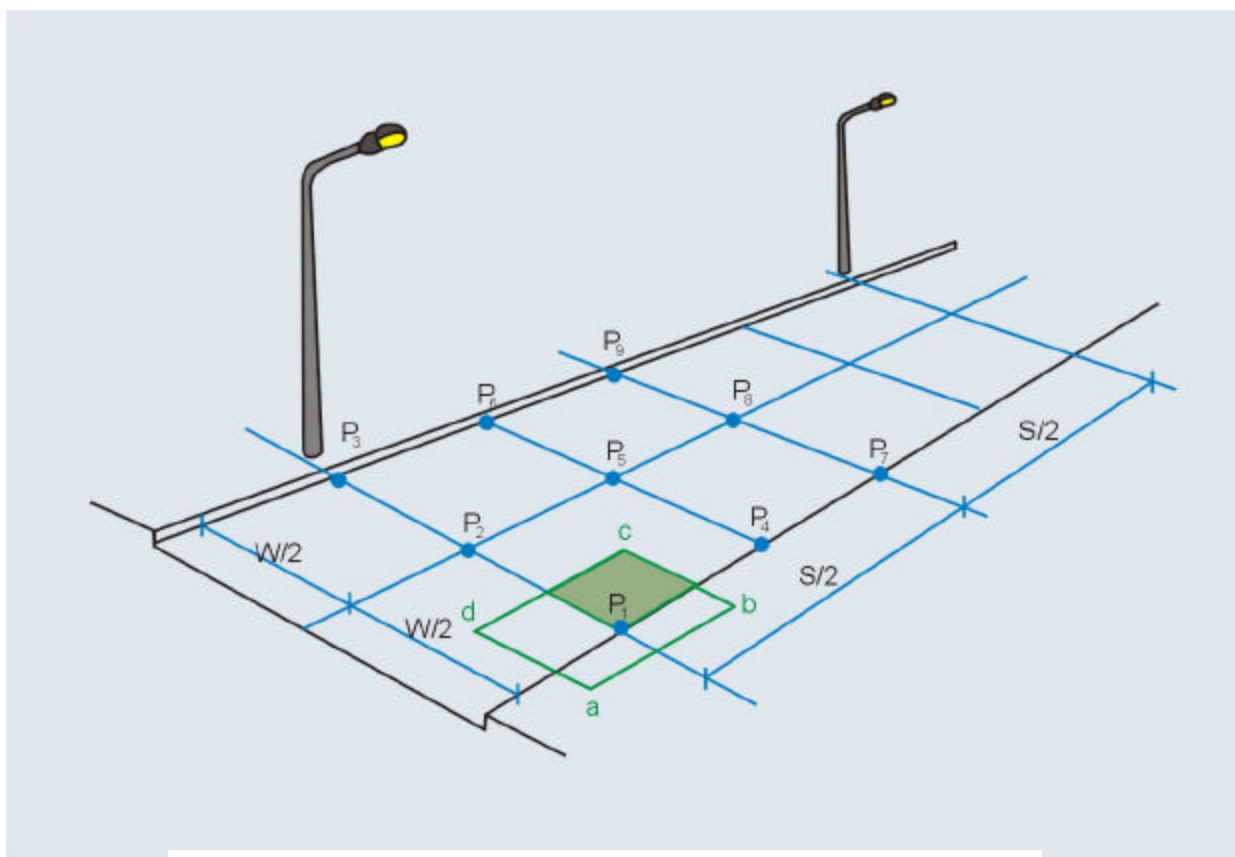


Figura 2.39 Cálculo de la iluminación media

2.6.2.1 Método europeo de los 9 puntos

De acuerdo con el **método europeo** de los 9 puntos, que se usa para calcular la *Iluminancia media sobre la vía* en una instalación de *alumbrado público*, es necesario ubicar cada uno de estos puntos de cálculo sobre la mínima porción típica de la vía considerada. De este modo, se divide en cuatro



ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ D. C.
UNIDAD EJECUTIVA DE SERVICIOS PÚBLICOS
MANUAL ÚNICO DE ALUMBRADO PÚBLICO

CAPÍTULO II

FUNDAMENTOS

Revisión 00

Fecha 27-09-01

Pág. 44 de 64

partes (dos longitudinales y dos transversales) de modo que los puntos a considerar son cada uno de los vértices de los rectángulos generados. Así se obtienen los 9 puntos considerados en el método. (Véase la Figura 2.39)

La iluminancia media sobre la vía se calcula teniendo en cuenta el grado de multiplicidad de cada punto. Así, los puntos extremos tienen un grado de multiplicidad de 0.25; los puntos intermedios tienen un grado de multiplicidad de 0.5 y el punto central tiene un grado de multiplicidad de 1.0.

Los anteriores grados de multiplicidad se deducen del siguiente razonamiento: En la figura 2.39, la iluminación E_1 leída en el punto P_1 corresponde al área $abcd$, pero tan sólo la cuarta parte de esa área corresponde a un área sobre la vía considerada (área rayada). Igual sucede con la iluminación de los puntos P_3 , P_7 y P_9 . Por tanto la contribución de esos puntos debe ser ponderada al 25%.

Por idéntico razonamiento, los puntos P_2 , P_4 , P_6 y P_8 representan la iluminación de áreas que tan solo tienen el 50% sobre la vía.

El punto P_5 , a diferencia de los demás, representa un área totalmente contenida en la vía por lo que su contribución al promedio es completa.

A partir de la lectura de la iluminación en los 9 puntos, la iluminación media sobre la vía se calcula con la fórmula siguiente:

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

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

La figura 2.42 ayuda a ubicar los nueve puntos, para diferentes sistemas de alumbrado, de acuerdo con la distribución de los postes y la forma de la vía.

2.6.2.2 Cálculo de iluminancia por el coeficiente de utilización

Como se revisará mas adelante, en el capítulo 6, uno de los documentos fotométricos que identifica una luminaria, es la curva del coeficiente de utilización, el cual sirve para calcular, a partir del conocimiento de la geometría de la vía considerada y la disposición de las luminarias, la iluminancia media sobre la calzada. En el proceso de diseño y a partir de una iluminancia dada, puede usarse para calcular la interdistancia. Otra forma de aplicar esta curva, es calcular el flujo luminoso necesario para obtener una iluminancia dada, a partir de una interdistancia fija.

La fórmula general del cálculo es:



$$E_{med} = \frac{f \times k_t \times FM}{S \times W}$$

Donde:

- E_{med} = Iluminancia media sobre la calzada (en Luxes)
 f = Flujo mantenido de la bombilla (en lúmenes)
 k_t = Coeficiente de utilización total calculado (en %)
 FM = Factor de mantenimiento de la instalación. (en %) Véase la sección 6.4.2.6
 S = Interdistancia de luminarias (en **m**) Véase la figura 2.44
 W = Ancho de vía (en **m**) Véase la figura 2.44

Las curvas de coeficiente de utilización **k** expresan el porcentaje del flujo luminoso emitido por la luminaria y que cae sobre la superficie de la calzada, en función del ancho de la misma. Como punto de referencia, se toma la vertical de la luminaria. Véase la figura 2.40

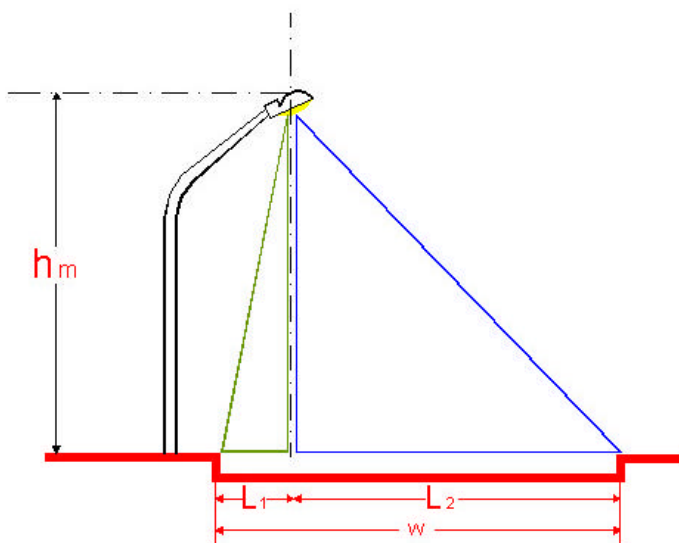


Figura 2.40 El coeficiente de utilización

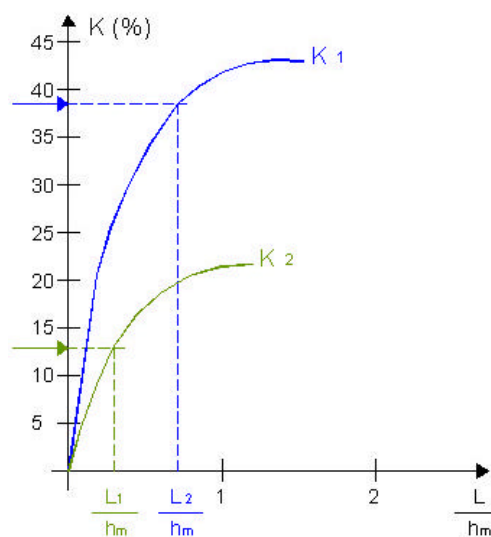


Figura 2.41 El gráfico de K_1 y K_2

Una luminaria de alumbrado público tiene dos curvas **k**. La primera, denominada **k₁**, representa el flujo luminoso hacia en frente, hacia adelante, hacia la calzada. La segunda, denominada **k₂**, representa el flujo luminoso hacia atrás, hacia las casas, hacia el andén. Véase la figura 2.41



ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ D. C.
UNIDAD EJECUTIVA DE SERVICIOS PÚBLICOS
MANUAL ÚNICO DE ALUMBRADO PÚBLICO

CAPÍTULO II

FUNDAMENTOS

Revisión 00

Fecha 27-09-01

Pág. 46 de 64

En la ordenada de la gráfica 2.41 se indica el valor del k en porcentaje y en la abscisa se indica el ancho de la calzada expresada en función de la altura de montaje h_m . Con el fin de facilitar su uso en diferentes esquemas de montaje.

Para calcular k_1 se calcula la relación L_1/h_m , se ubica el valor en la abscisa de la figura 2.41 y se sigue verticalmente hasta cortar la curva k_1 . EN este punto, horizontalmente se lee el valor k_1 .

Igual procedimiento se sigue para el cálculo de k_2 , pero utilizando el valor L_2 y la curva k_2 .

Ahora, dependiendo de la disposición de las luminarias, se obtiene el k_t con el siguiente raciocinio:

Distribución **unilateral** (Véase la figura 2.42)

$$k_t = k_1 + k_2$$

Distribución **bilateral opuesta**

$$k_t = (k_1 + k_2)/2$$

Distribución bilateral alternada

$$k_t = (k_1 + k_2)/2$$

Distribución central sencilla (con dos luminarias)

$$k_t = (k_1 + k_2)/2$$

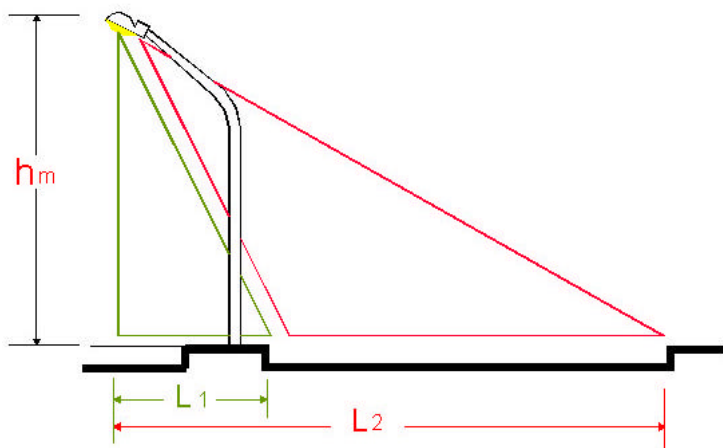


Figura 2.42 El Cu en central sencilla

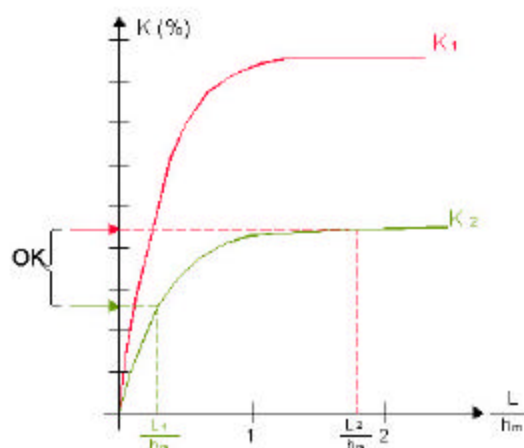


Figura 2.43 Gráfico de K_1 y K_2 en central sencilla

Téngase en cuenta que en el caso de la distribución central sencilla, como en aquellos donde la vertical desde la luminaria no corte la calzada, el cálculo de cada coeficiente k incluye una parte positiva, (la que está en la calzada) y otra negativa (la que está en el andén o fuera de la calzada en consideración)



2.6.2.3 Cálculos computarizados de iluminancia

Con el advenimiento de las computadoras y el software para cálculo lumínico, la dificultad para obtener los valores de manera manual, prácticamente desaparecieron y hoy en día, todos los cálculos comerciales se realizan a través de software especializado. Pero así mismo, se puede incrementar el número de puntos considerados, pues los 9 del método europeo son un límite de aproximación.

Así, se pueden definir nuevas *zonas de cálculo* mas amplias y con *mas puntos* para que sean mas precisas.

La zona de cálculo se toma longitudinalmente sobre la calzada cubriendo todo el espacio entre dos luminarias; transversalmente se toma el ancho de la calzada.

Un método mas preciso es definir los puntos de cálculo exactamente igual que los definidos para la luminancia, extendiéndose en un ancho equivalente a medio carril a cada lado de la calzada. Ver sección 2.6.5

2.6.3 Cálculo de la uniformidad general de iluminancia en una instalación de alumbrado público

El valor de la *uniformidad general de Iluminancia* se calcula de acuerdo con dos criterios siguientes:

- a) Como $U_g = E_{min}/E_{prom}$ Tomando como base los puntos evaluados en el campo típico de la vía, bien sean los 9 puntos del método europeo o los 20, 30 ó 60 puntos del método computacional.

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

E_{prom} Corresponde al valor promedio calculado entre todos los n puntos considerados, desde el primero E_1 hasta el final E_n .

La fórmula aplicable es:

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

- b) Como $U_g = E_{min}/E_{max}$. Tomando como base los puntos evaluados en el campo típico de la vía, bien sean los 9 puntos del método europeo o los 20, 30 ó 60 puntos del método



computacional.

Donde:

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

E_{max} Corresponde al punto de **mayor** iluminancia calculado entre todos los puntos considerados.

2.6.4 Cálculo de la luminancia en un punto

El presente modelo de cálculo se aplica a calzadas secas y rectas. Fue desarrollado por la CIE y se encuentra documentado en la publicación **CIE-30**. Debe consultarse la publicación **CIE 140**, para las consideraciones sobre interpolación y precisión de los cálculos.

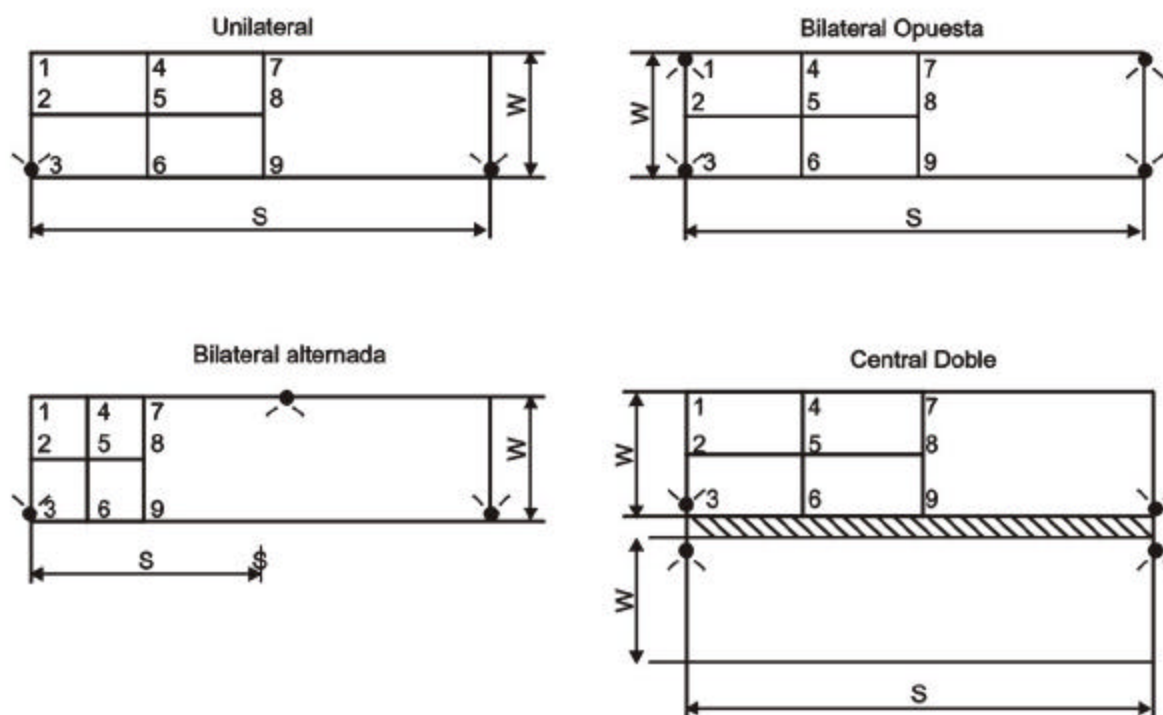


Figura 2.44. Selección de los 9 puntos según disposición de luminarias



ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ D. C.
UNIDAD EJECUTIVA DE SERVICIOS PÚBLICOS
MANUAL ÚNICO DE ALUMBRADO PÚBLICO

CAPÍTULO II

FUNDAMENTOS

Revisión 00

Fecha 27-09-01

Pág. 49 de 64

2.6.4.1 Generalidades

Es claro el hecho que la visión cómoda y segura depende del contraste y acomodación del ojo y que a su vez estos factores dependen de la luminancia tanto sobre la vía como sobre los objetos a ver. Así, la iluminancia es un factor que depende de la cantidad de luz que incide sobre un objeto, por ejemplo la vía, en tanto que la luminancia depende de la cantidad de luz reflejada que llega al observador. En consecuencia, la luminancia en alumbrado público depende de la *cantidad de luz* que llega a la calzada, de la *posición del observador* y de las *características reflectivas* propias de la calzada. A continuación se analizará cada elemento:

2.6.4.2 Coeficiente de luminancia.

La cantidad de luz que llega a la calzada a manera de iluminancia ya fue descrito en las secciones predecesoras. Por ello, para poder calcular la luminancia de una superficie es necesario conocer sus propiedades de reflexión. Para tales efectos, se puede definir un coeficiente de reflexión q , como la relación entre la luminancia y la iluminancia de un punto de la superficie de tal modo que $q=L/E$.

$$q=f(a,b,g,d)$$

Para el área de la calzada enfocada por un conductor comprendida entre 60 y 160m delante de él, a sólo varía entre 0.5° y 1.5° . Dado que la dependencia de q con respecto a a permanece prácticamente constante, es usual que los coeficientes de luminancia sean determinados con a mantenida constante a 1° . En relación con el ángulo d , *que varía entre 0° y 20° , no incide en el calculo y en la práctica se desprecia.* Este es el estándar de la CIE.

El coeficiente de luminancia depende de la posición del observador y de la fuente de luz con respecto al punto en cuestión (ver figura 2.45) de modo que pueda establecerse una función tal que:

$$q = f(b, g)$$

$$\text{Si } L = qE \text{ y } E = \frac{I}{h^2} \cos^3 g \quad \Rightarrow \quad L = \frac{I}{h^2} (q \cos^3 g)$$

Así, pues, el coeficiente q puede tabularse en función de las dos variables independientes descritas b y g en diferentes tabulaciones de acuerdo con otros factores que diferencian las características reflectivas de las calzadas.

Ahora bien, se pueden introducir otros factores en la tabulación que se pretende hacer a fin de simplificar el cálculo, obteniendo entonces una tabulación mas fácil de manejar porque los términos I (Intensidad luminosa), h_m (Altura de montaje de la fuente) están disponibles mas fácilmente en el sistema.



El término entre paréntesis ($q\cos^3g$) se conoce como coeficiente de luminancia reducido.

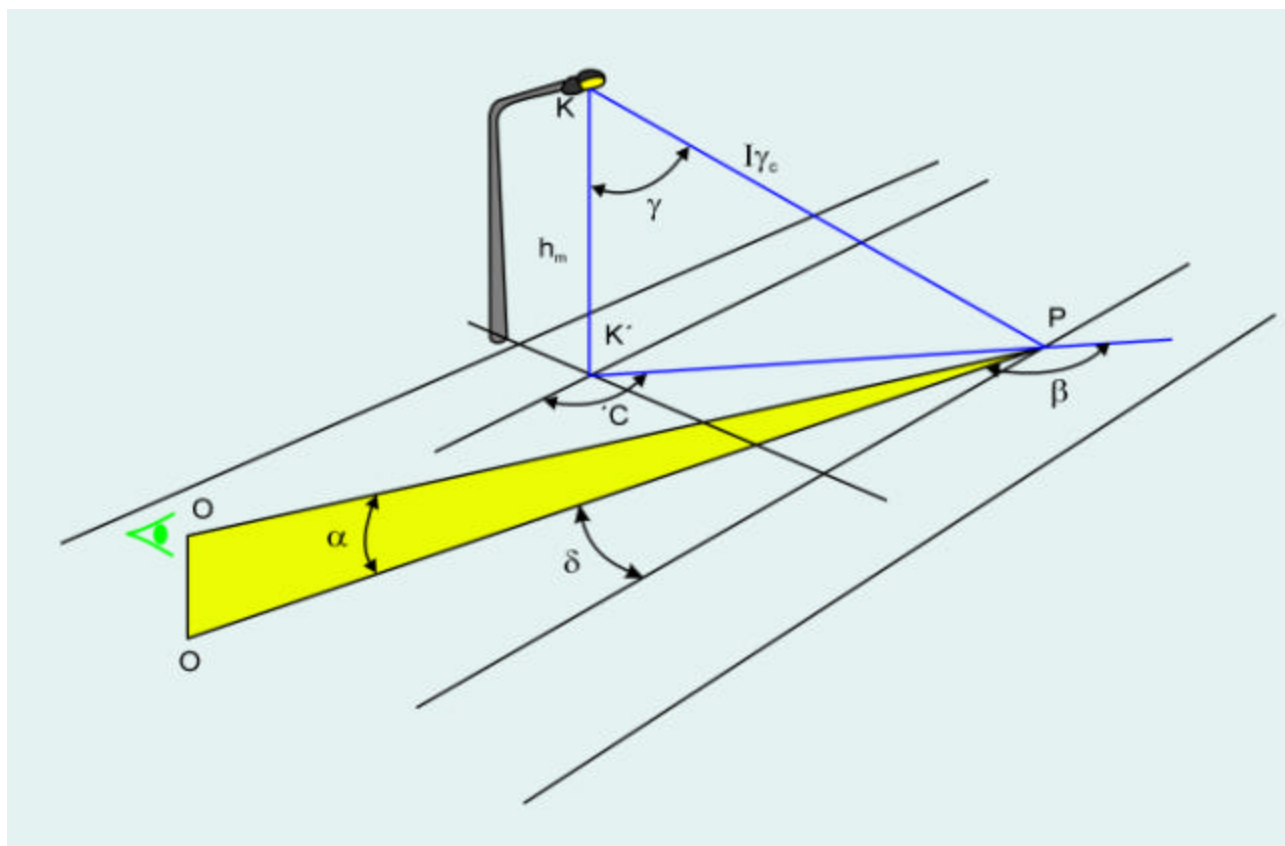


Figura 2.45. Parámetros a considerar en el cálculo de luminancia

2.6.4.3 Coeficiente de luminancia reducido

El término ($q\cos^3g$) se representa por r y en consecuencia las tablas que caracterizan las propiedades reflectivas de una superficie no se dan en términos de q sino de r . Estas tabulaciones características se denominan Tablas R.

A partir de las Tablas R es muy fácil calcular la luminancia en cada punto, pues basta determinar los ángulos β y g del punto considerado para tener el r . La intensidad luminosa y la altura de montaje se calculan con la matriz de intensidades y la geometría del sistema respectivamente.



ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ D. C.
UNIDAD EJECUTIVA DE SERVICIOS PÚBLICOS
MANUAL ÚNICO DE ALUMBRADO PÚBLICO

CAPÍTULO II

FUNDAMENTOS

Revisión 00

Fecha 27-09-01

Pág. 51 de 64

Ahora bien, se estudiará el modelo de *Tabla R* para diferentes tipos de superficies:

2.6.4.4 Clasificación de las superficies de las calzadas (estado seco)

Definir las propiedades de reflexión de la superficie de una vía no es fácil. Sin embargo, para los cálculos de luminancia, se pueden definir con tres parámetros característicos que son:

- El factor especular S_1 definido como la relación $r(0,2)/r(0,0)$
- El factor especular S_2 definido como la relación $Q_o/r(0,0)$
- El coeficiente promedio de luminancia Q_o conocido también como grado de claridad de la superficie.

Nota: $r(0,2)$ significa el coeficiente de luminancia reducido evaluado para $b=0^\circ$ y $\tan g = 2$
 $r(0,0)$ significa el coeficiente de luminancia reducido evaluado para $b=0^\circ$ y $\tan g = 0$

Donde

$$Q_o = \frac{\int_w q d w}{\int_w d w}$$

q = Coeficiente de luminancia (depende de los ángulos b y g)

w = Angulo sólido que contiene todas aquellas direcciones de incidencia de luz sobre un punto en la vía y que se toman en cuenta en el proceso de medida (b varía entre 0° y 180° y g varía entre 0° y 90°)

Con el fin de mantener unas características normalizadas, las calzadas se han clasificado de acuerdo con los tres factores anteriormente definidos y se ha llegado a cuatro calzadas tipo. Siendo el coeficiente S_1 el que define la forma básica del cuerpo R por su altura, aunque el brillo sea el mismo, una superficie reflejará diferente cantidad de luz según varíe este coeficiente y en consecuencia será mas reflectante.

Esto hace que la primera clasificación de superficies se base en el comportamiento del factor S_1 Ver Tabla 2.3

Tabla 2.3 Clasificación ¹ de superficies según el factor S_1					
Clase	Variación S_1	S_1	S_2	Q_o	Reflexión
R1	$S_1 < 0.42$	0.25	1.53	0.10	Casi difusa
R2	$0.42 \leq S_1 < 0.85$	0.58	1.80	0.07	Ligeramente difusa
R3	$0.85 \leq S_1 < 1.35$	1.11	2.38	0.07	Ligeramente brillante
R4	$S_1 \geq 1.35$	1.55	3.03	0.08	Brillante

¹ Fuente: Documento NTC 900 Numeral 7.3.5



ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ D. C.
UNIDAD EJECUTIVA DE SERVICIOS PÚBLICOS
MANUAL ÚNICO DE ALUMBRADO PÚBLICO

CAPÍTULO II

FUNDAMENTOS

Revisión 00

Fecha 27-09-01

Pág. 52 de 64

Cada tipo de superficie de calzada de la misma clase se caracterizará por un solo cuerpo o Tabla R típico de esa clase. Esto hace que las tablas R funcionen como patrón mediante la cual pueden llevarse a cabo los cálculos de luminancia. Las características resumidas de las cuatro (4) *Tablas R*, de acuerdo con el patrón definido por la CIE, se dan en la sección 2.6.4.5.

2.6.4.5 Las tablas R

La CIE define los acabados de las cuatro clases de superficies cuyas características se han resumido en la Tabla 2.4

Tabla 2.4 Características¹ de los acabados superficiales de vías, por clase

Clase	Descripción
R1	- Superficie de calzada asfáltica, con un mínimo de 15% de abrillantadores artificiales. - Revestimientos superficiales con grava que cubra mas del 80% de la superficie de la calzada y en las que la grava tenga principalmente abrillantadores artificiales - Superficie de calzadas en concreto u hormigón
R2	- Revestimientos que tengan una superficie áspera con agregados normales - Superficies asfálticas que contengan del 10 al 15% de abrillantadores artificiales - Hormigón asfáltico grueso y áspero, rico en grava. - Calzadas en asfalto-cemento
R3	Revestimientos en asfalto de textura gruesa
R4	Superficies de asfalto que tengan una textura muy suave y pulida

Cuando el valor Q_0 de una superficie sea diferente al valor para el cual se hizo la tabla patrón, los valores R de la tabla patrón deberán multiplicarse por la relación entre el valor Q_0 real de la superficie y el valor Q_0 de la tabla patrón.

En los casos donde las características de reflexión S_1 y Q_0 no se puedan medir ni determinar, partiendo del conocimiento o la experiencia previos, puede conseguirse una orientación aproximada escogiendo un tipo de tabla R de acuerdo con el tipo de acabado de la calzada y de los materiales utilizados en su construcción.

1. Fuente NTC 900



ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ D. C.
UNIDAD EJECUTIVA DE SERVICIOS PÚBLICOS
MANUAL ÚNICO DE ALUMBRADO PÚBLICO

CAPÍTULO II

FUNDAMENTOS

Revisión 00

Fecha 27-09-01

Pág. 53 de 64

Tabla ² 2.5 Tabla r para superficie estándar R1.

	Qo=0.10							S1=0.25				S2=1.53									
$\frac{b}{\text{Tan } g}$	0°	2°	5°	10°	15°	20°	25°	30°	35°	40°	45°	60°	75°	90°	105	120	135	150	165	180	
0.00	655	655	655	655	655	655	655	655	655	655	655	655	655	655	655	655	655	655	655	655	
0.25	619	619	619	619	610	610	610	610	610	610	610	610	610	601	601	601	601	601	601	601	
0.50	539	539	539	539	539	539	521	521	521	521	521	503	503	503	503	503	503	503	503	503	
0.75	431	431	431	431	431	431	431	431	431	431	395	386	371	371	371	371	371	386	395	395	
1.00	341	341	341	341	323	323	305	296	387	387	278	269	269	269	269	269	269	278	278	278	
1.25	269	269	269	260	251	242	224	207	198	189	189	180	180	180	180	180	189	198	207	224	
1.50	224	224	224	215	198	180	171	162	153	148	144	144	139	139	139	144	148	153	162	180	
1.75	189	189	189	171	153	139	130	121	117	112	108	103	99	99	103	108	112	121	130	139	
2.00	162	162	157	135	117	108	99	94	90	85	85	83	84	84	86	90	94	99	103	111	
2.50	121	121	117	95	79	66	60	57	54	52	51	50	51	52	54	58	61	65	69	75	
3.00	94	94	86	66	49	41	387	36	34	33	32	31	31	33	35	38	40	43	47	51	
3.50	81	80	66	46	33	28	25	23	22	22	21	21	22	22	24	27	29	31	34	38	
4.00	71	69	55	32	23	20	18	16	15	14	14	14	15	17	19	20	22	23	25	27	
4.50	63	59	43	24	17	14	13	12	12	11	11	11	12	13	14	14	16	17	19	21	
5.00	57	52	36	19	14	12	10	9.0	9.0	8.8	8.7	8.7	9.0	10	11	13	14	15	16	16	
5.50	51	47	31	15	11	9.0	8.1	7.8	7.7	7.7											
6.00	47	42	25	12	8.5	7.2	6.5	6.3	6.2												
6.50	43	38	22	10	6.7	5.8	5.2	5.0													
7.00	40	34	18	8.1	5.6	4.8	4.4	4.2													
7.50	37	31	15	6.9	4.7	4.0	3.8														
8.00	35	28	14	5.7	4.0	3.6	3.2														
8.50	33	25	12	4.8	3.6	3.1	2.9														
9.00	31	23	10	4.1	3.2	2.8															
9.50	30	22	9.0	3.7	2.8	2.5															
10.00	29	20	8.2	3.2	2.4	2.2															
10.50	28	18	7.3	3.0	2.2	1.9															
11.00	27	16	6.6	2.7	1.9	1.7															
11.50	26	15	6.1	2.4	1.7																
12.00	25	14	5.6	2.2	1.6																

² Fuente: Documento CIE 30-2



ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ D. C.
UNIDAD EJECUTIVA DE SERVICIOS PÚBLICOS
MANUAL ÚNICO DE ALUMBRADO PÚBLICO

CAPÍTULO II

FUNDAMENTOS

Revisión 00

Fecha 27-09-01

Pág. 54 de 64

Tabla 2.6³ Tabla r para superficie estándar R2.

	Qo=0.07 S1=0.58 S2=1.80																			
β	0°	2°	5°	10°	15°	20°	25°	30°	35°	40°	45°	60°	75°	90°	105	120	135	150	165	180
Tan g	0.00	390	390	390	390	390	390	390	390	390	390	390	390	390	390	390	390	390	390	390
0.25	411	411	411	411	411	411	411	411	411	411	379	368	357	357	346	346	346	335	335	355
0.50	411	411	411	411	403	403	384	379	370	346	325	303	281	281	271	271	271	260	260	260
0.75	379	379	379	369	357	346	325	303	281	260	238	216	206	206	206	206	206	206	206	206
1.00	335	335	335	325	292	291	260	238	216	195	173	152	152	152	152	152	141	141	141	141
1.25	303	303	292	271	238	206	184	152	130	119	108	100	103	106	108	108	114	114	119	119
1.50	271	271	260	227	179	152	141	119	108	93	80	76	76	80	84	87	89	91	93	95
1.75	249	238	227	195	152	124	106	91	78	67	61	52	54	58	63	67	69	71	73	74
2.00	227	216	195	152	117	95	80	67	61	52	45	40	41	45	49	52	54	56	57	58
2.50	195	190	146	110	74	58	48	40	35	30	27	24	26	28	30	33	35	38	40	41
3.00	160	155	115	67	43	33	26	21	18	17	16	16	17	17	18	21	22	24	26	27
3.50	146	131	87	41	25	18	15	13	12	11	11	11	11	11	12	14	15	17	18	21
4.00	132	113	67	27	15	12	10	9.4	8.7	8.2	7.9	7.6	7.9	8.7	9.6	11	121	13	15	17
4.50	118	95	50	20	12	8.9	7.4	6.6	6.3	6.1	5.7	5.6	5.8	6.3	7.1	8.4	10	12	13	14
5.00	106	81	38	14	8.2	6.3	5.4	5.0	4.8	4.7	4.5	4.4	4.8	5.2	6.2	7.4	8.5	9.5	10	11
5.50	96	69	29	11	6.3	5.1	4.4	4.1	3.9	3.8										
6.00	87	58	22	8.0	5.0	3.9	3.5	3.4	3.2											
6.50	78	50	17	6.1	3.8	3.1	2.8	2.7												
7.00	71	43	14	4.9	3.1	2.5	2.3	2.2												
7.50	67	38	12	4.1	2.6	2.1	1.9													
8.00	63	33	10	3.4	2.2	1.8	1.7													
8.50	58	28	8.7	2.9	1.9	1.6	1.5													
9.00	55	25	7.4	2.5	1.7	1.4														
9.50	52	23	6.5	2.2	1.5	1.3														
10.00	49	21	5.6	1.9	1.4	1.2														
10.50	47	18	5.0	1.7	1.3	1.2														
11.00	44	16	4.4	1.6	1.2	1.1														
12.00	41	13	3.6	1.4	1.1															

³ Fuente: Documento CIE 30-2



ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ D. C.
UNIDAD EJECUTIVA DE SERVICIOS PÚBLICOS
MANUAL ÚNICO DE ALUMBRADO PÚBLICO

CAPÍTULO II

FUNDAMENTOS

Revisión 00

Fecha 27-09-01

Pág. 55 de 64

Tabla 2.7⁴ Tabla r para superficie estándar R3.

Qo=0.07 S1=1.11 S2=2.38

β Tan g	0°	2°	5°	10°	15°	20°	25°	30°	35°	40°	45°	60°	75°	90°	105	120	135	150	165	180
0.00	294	294	294	294	294	294	294	294	294	294	294	294	294	294	294	294	294	294	294	294
0.25	326	326	321	321	317	312	308	308	303	298	294	280	271	262	158	253	249	244	240	240
0.50	344	344	339	339	326	317	308	298	289	276	262	235	217	204	199	199	199	199	194	194
0.75	357	353	353	339	321	303	285	267	244	222	204	176	158	149	149	149	145	136	136	140
1.00	362	362	352	326	276	249	226	204	181	158	140	118	104	100	100	100	100	100	100	100
1.25	357	357	248	298	244	208	176	154	136	118	104	83	73	70	71	74	77	77	77	78
1.50	353	348	326	267	217	176	145	117	100	86	78	72	60	57	58	60	60	60	61	62
1.75	359	335	303	231	172	127	104	89	79	70	62	51	45	44	45	46	45	45	46	47
2.00	326	321	280	190	136	100	82	71	62	54	48	39	34	34	34	35	36	36	37	38
2.50	289	280	222	127	86	65	54	44	38	34	25	23	22	23	24	24	24	24	24	25
3.00	253	235	163	85	53	38	31	25	23	20	18	15	15	14	15	15	16	16	17	17
3.50	217	194	122	60	35	25	22	19	16	15	13	9.9	9.0	9.0	9.9	11	11	12	12	13
4.00	190	163	90	43	26	20	16	14	12	9.9	9.0	7.4	7.0	7.1	7.5	8.3	8.7	9.0	9.0	9.9
4.50	163	136	73	31	20	15	12	9.9	9.0	8.3	7.7	5.4	4.8	4.9	5.4	6.1	7.0	7.7	8.3	8.5
5.00	145	109	60	24	16	12	9.0	8.2	7.7	6.8	6.1	4.3	3.2	3.3	3.7	4.3	5.2	6.5	6.9	7.1
5.50	127	94	47	18	14	9.9	7.7	6.9	6.1	5.7										
6.00	113	77	36	15	11	9.0	8.0	6.5	5.1											
6.50	104	68	30	11	8.3	6.4	5.1	4.3												
7.00	95	60	24	6.5	6.5	5.2	4.3	3.4												
7.50	87	53	21	7.1	5.3	4.4	3.6													
8.00	83	47	17	6.1	4.4	3.6	3.1													
8.50	78	42	15	5.2	3.7	3.1	2.6													
9.00	73	38	12	4.3	3.2	2.4														
9.50	69	34	9.9	3.8	3.5	2.2														
10.00	65	32	9.0	3.3	2.4	2.0														
10.50	62	29	8.0	3.0	2.1	1.9														
11.00	59	26	7.1	2.6	1.9	1.8														
11.50	56	24	6.3	2.4	1.8															
12.00	53	22	5.6	2.1	1.8															

⁴ Fuente: Documento CIE 30-2



ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ D. C.
UNIDAD EJECUTIVA DE SERVICIOS PÚBLICOS
MANUAL ÚNICO DE ALUMBRADO PÚBLICO

CAPÍTULO II

FUNDAMENTOS

Revisión 00

Fecha 27-09-01

Pág. 56 de 64

Tabla 2.8⁵ Tabla r para superficie estándar R4.

Qo=0.08 S1=1.55 S2=3.04

β Tan g	0°	2°	5°	10°	15°	20°	25°	30°	35°	40°	45°	60°	75°	90°	105	120	135	150	165	180
0.00	264	264	264	264	264	264	264	264	264	264	264	264	264	264	264	264	264	264	264	264
0.25	297	317	317	317	317	310	304	290	284	277	271	244	231	224	224	218	218	211	211	211
0.50	330	343	343	343	330	310	297	284	277	264	251	218	198	185	178	172	172	165	165	165
0.75	376	383	370	350	330	304	277	251	231	211	198	165	139	132	132	125	125	125	119	119
1.00	396	396	396	330	290	251	218	198	185	165	145	112	86	86	86	86	86	87	87	87
1.25	403	409	370	310	251	211	278	152	132	115	103	77	66	65	65	63	65	66	67	68
1.50	409	396	356	284	218	172	139	115	100	88	79	61	50	50	50	50	52	55	55	55
1.75	409	396	343	351	178	139	108	88	75	66	59	44	37	37	37	38	40	41	42	45
2.00	409	383	317	224	145	106	86	71	59	53	45	33	29	29	29	30	32	33	34	37
2.50	396	356	364	152	100	73	55	45	37	32	28	21	20	20	20	21	22	24	25	26
3.00	370	304	211	95	63	44	30	25	21	17	16	13	12	12	13	13	15	16	17	19
3.50	343	271	165	63	40	26	19	15	13	12	11	9.8	9.1	8.8	8.8	9.4	11	12	13	15
4.00	317	238	132	45	24	16	13	11	9.6	9.0	8.4	7.5	7.4	7.4	7.5	7.9	8.6	9.4	11	12
4.50	297	211	106	33	17	11	9.2	7.9	7.3	6.6	6.3	6.1	6.1	6.2	6.5	6.7	7.1	7.7	8.7	9.6
5.00	277	185	79	24	13	8.3	7.0	6.3	5.7	5.1	5.0	5.0	5.1	5.4	5.5	5.8	6.1	6.3	6.9	7.7
5.50	257	161	59	19	9.9	7.1	5.7	5.0	4.6	4.2										
6.00	244	140	46	13	7.7	5.7	4.8	4.1	3.8											
6.50	231	122	37	11	5.9	5.6	3.7	3.2												
7.00	218	106	32	9.0	5.0	3.8	3.2	2.6												
7.50	205	94	26	7.5	4.4	3.3	2.8													
8.00	193	82	22	6.3	3.7	2.9	2.4													
8.50	194	74	19	5.3	3.2	2.5	2.1													
9.00	174	66	16	4.6	2.8	2.1														
9.50	169	59	13	4.1	2.5	2.0														
10.00	164	53	12	3.7	2.2	1.7														
10.50	158	49	11	3.3	2.1	1.7														
11.00	153	45	9.5	3.0	2.0	1.7														
11.50	149	41	8.4	2.6	1.7															
12.00	145	37	7.7	2.5	1.7															

⁵ Fuente: Documento CIE 30-2



2.6.4.6 Ejemplo de cálculo paso a paso

Debido a la complejidad del cálculo manual, para obtener la luminancia en un punto, es necesario realizar los cálculos con un software de computador adecuado. La fórmula básica utilizada es:

$$L = q \left(\frac{I_a}{h^2} \cos^3 g \right) = \left(\frac{I_a}{h^2} \right) r$$

Donde:

- L = Luminancia en un punto. Véase la figura 2.46
- I_a = Intensidad luminosa incidente sobre el punto a
- h = Altura de montaje de la fuente luminosa
- q = Coeficiente de luminancia evaluado en el punto a
- r = Coeficiente de luminancia reducido

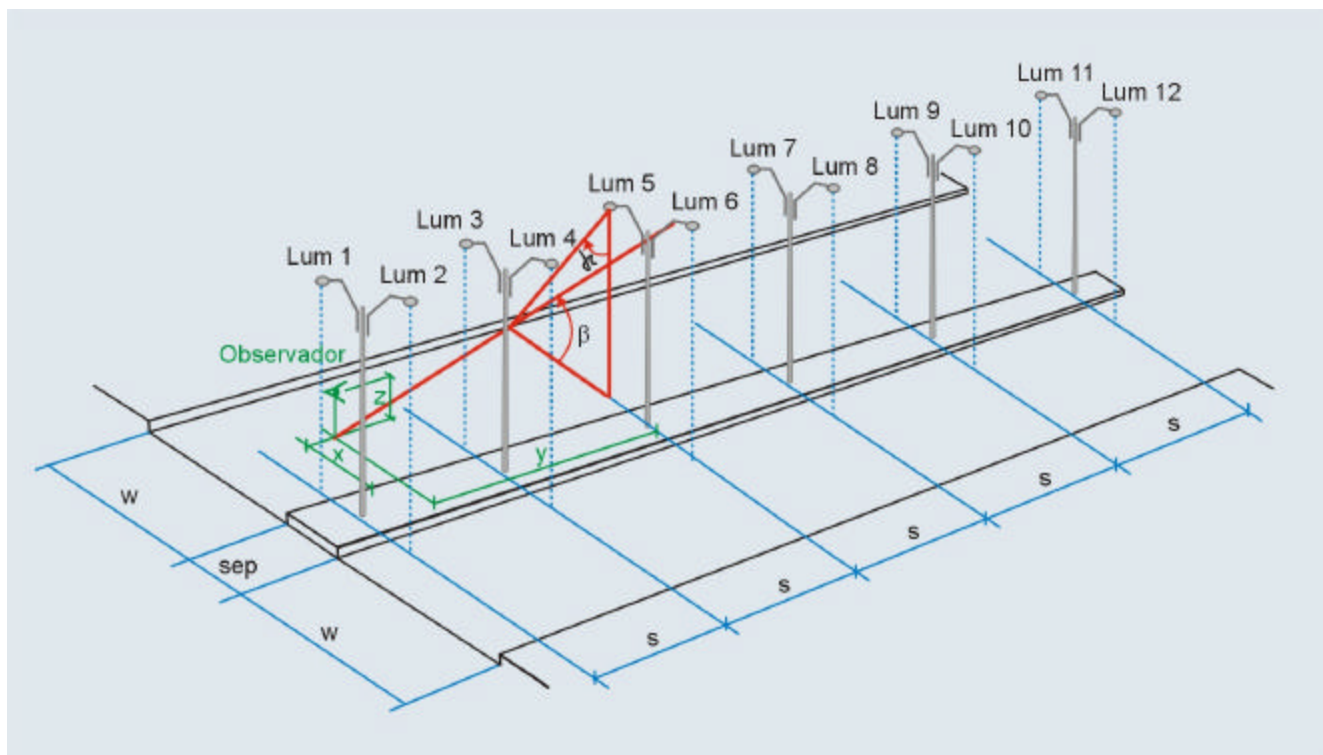


Figura 2.46. Cálculo de luminancia sobre la vía



2.6.5 Cálculo de la Luminancia promedio sobre la vía

Es necesario definir primero la *zona de cálculo*. Esta zona corresponde a un sector típico de la vía entre dos luminarias consecutivas colocadas sobre un mismo lado en el sentido longitudinal. En sentido transversal la zona de cálculo cubre el ancho total de la calzada. Es necesario aclarar que cada carril de circulación deberá cumplir con los requerimientos mínimos de la uniformidad longitudinal.

Una vez definida esta zona, es necesario ubicar los *puntos de cálculo*. Para este efecto, se siguen las siguientes reglas:

- Longitudinalmente deben ser por lo menos 10 puntos, para interdistancias hasta de 50 metros entre luminarias. Si la interdistancia es mayor, el número de puntos es un entero tal que la separación entre puntos conocida como d sea inferior a 5 m.
- En dirección transversal se toman 3 ó 5 puntos por carril. Uno de estos puntos, cada vez, debe estar en el centro del carril y los dos puntos extremos se colocan a $1/6$ ó $1/10$ respectivamente del ancho del carril medido desde el borde exterior del carril.

Así, un cálculo sencillo para una vía de dos (2) carriles e interdistancia menor a 50 m involucra 60 ó 100 puntos; y un cálculo muy preciso para una vía de cuatro (4) carriles y una interdistancia de 45 m involucra 120 ó 200 puntos.

Definidos los puntos, es necesario definir la *posición del observador*. De acuerdo con la NTC 900, el observador, debe estar:

- En sentido longitudinal, a 60 m antes de la primera fila de puntos
- En sentido transversal, a $1/4$ del ancho de la calzada a partir de su borde derecho.
- En sentido vertical, a 1.5 m sobre el nivel de la vía.

Para el cálculo de la luminancia en cada punto, se tendrán en cuenta todas aquellas *fuentes luminosas* situadas dentro de: 5 veces la altura de montaje hacia atrás de la primera fila de puntos; 12 veces la altura de montaje hacia adelante (aunque su aporte es muy pequeño o nulo) y 5 veces la altura de montaje hacia los lados de los puntos de cálculo.

Entonces, L_{prom} Corresponde al valor promedio calculado entre todos los n puntos considerados, desde el primero L_1 hasta el final L_n . La fórmula aplicable es:

$$L_{prom} = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} L_i}{n}$$



ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ D. C.
UNIDAD EJECUTIVA DE SERVICIOS PÚBLICOS
MANUAL ÚNICO DE ALUMBRADO PÚBLICO

CAPÍTULO II

FUNDAMENTOS

Revisión 00

Fecha 27-09-01

Pág. 59 de 64

2.6.6 Cálculo de la uniformidad general de luminancia en una instalación de alumbrado público

Los puntos de cálculo son los mismos definidos en la sección 2.6.5 del presente manual y que se usan para calcular la luminancia promedio sobre la calzada. Así, la *uniformidad general de luminancia* se calcula a partir de la fórmula general $U_o = L_{min}/L_{prom}$

Donde:

L_{min} corresponde al punto de *menor* luminancia entre todos los puntos calculados en el carril.

L_{prom} Corresponde a la *luminancia promedio* sobre la calzada

2.6.7 Cálculo de la uniformidad longitudinal de luminancia en una instalación de alumbrado público

La *zona de cálculo*. Es la misma utilizada para calcular la luminancia promedio en la sección 2.6.5

Una vez definida esta zona, es necesario ubicar los *puntos de cálculo*. Para este efecto, se siguen las siguientes reglas:

- Longitudinalmente deben ser por lo menos 10 puntos, para interdistancias hasta de 50 metros entre luminarias. Si la interdistancia es mayor, el número de puntos es un entero tal que la separación entre puntos conocida como d sea inferior a 5 metros.
- En dirección transversal se toma una fila de puntos, la cual estará en el centro del carril.

Así, un cálculo sencillo para una vía de dos (2) carriles e interdistancia menor a 50 m involucra dos series de 10 puntos; y un cálculo para una vía de cuatro (4) carriles y una interdistancia de 45 m involucra cuatro series.

Definidos los puntos, es necesario definir la *posición del observador*. De acuerdo con la NTC 900, el observador, debe estar:

- En sentido longitudinal, a 60 m antes de la primera fila de puntos
- En sentido transversal, estará en el eje de cada carril.
- En sentido vertical, a 1.5 m sobre el nivel de la vía.

La *Uniformidad longitudinal de luminancia* se calcula como $U_L = L_{min}/L_{max}$ para cada uno de los carriles que tenga la vía.

Los requisitos posteriores de U_L mínimo se deberán cumplir para cada carril que tenga la vía.



2.6.8 Cálculo de la luminancia de velo (L_v)

Como se había explicado anteriormente en la sección 2.5.6.2 la luminancia de velo L_v corresponde a una de las medidas del deslumbramiento inhabilitador. Su cálculo se basa en los estudios de Holladay y en las confirmaciones realizadas, para pequeños niveles de luminancia, por Adrian en 1961, Fisher en 1967 y Hartmann en 1963 y 1968. La luminancia de velo, de acuerdo con la CIE, puede calcularse mediante la siguiente fórmula empírica:

$$L_v = K \sum_{i=1}^{i=n} \left(\frac{Eg_i}{q_i^2} \right) \quad \text{en } \text{Cd} / \text{m}^2$$

Donde:

- K = Factor que depende de la edad del observador (se asume un observador de 30 años).
 $K=10$ si el ángulo q esta en *grados* y $K=10^{-3}$ si el ángulo q esta en *radianes*
- Eg_i = Componente de iluminancia (es decir, en un plano perpendicular a la línea de visión del ojo) que proviene de la fuente i -ésima lumínica generadora de deslumbramiento. También puede entenderse como la iluminancia en el ojo del observador producida por la fuente deslumbrante en el plano perpendicular a la línea de visión, expresada en luxes). El subíndice i varía entre 1 y n
- q_i = ángulo (en grados) formado por una línea entre la fuente luminosa y el observador y la línea entre el observador y un punto de visión. En la figura 2.47 corresponde a la suma de los ángulos q_{1i} y q_{2i}

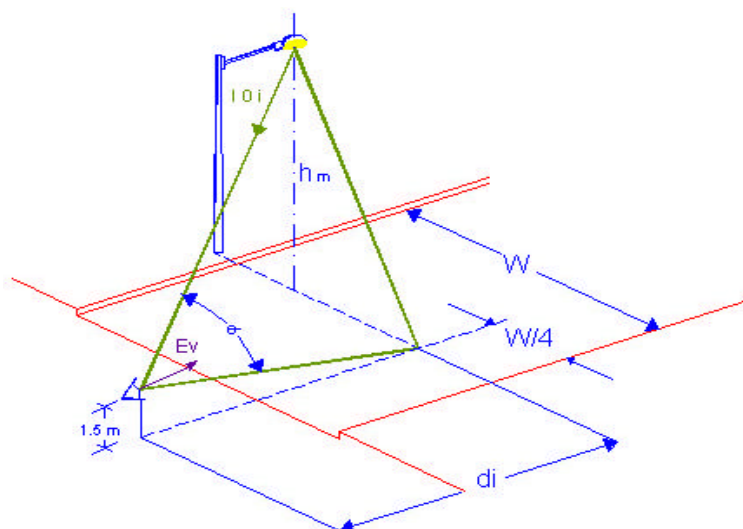


Figura 2.47. Cálculo de Luminancia de Velo



ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ D. C.
UNIDAD EJECUTIVA DE SERVICIOS PÚBLICOS
MANUAL ÚNICO DE ALUMBRADO PÚBLICO

CAPÍTULO II

FUNDAMENTOS

Revisión 00

Fecha 27-09-01

Pág. 61 de 64

Restricciones y alcance en la aplicación de las fórmulas anteriores:

- El ángulo q_i está comprendido entre 1.5° y 60° (en la práctica se limita a 20°)
- El observador está mirando a un punto de la vía a 90 m delante de él y colocado a la misma distancia que él, del lado de la carretera, de la primera luminaria que se incluye en el cálculo.
- El punto de visión del observador se encuentra a $\frac{1}{4}$ del ancho de la calzada (de derecha a izquierda) justo al frente de la primera luminaria y el ángulo de visión comprende hasta 20° por encima de la visual, debido a la forma del vehículo.
- Se involucran el cálculo 12 luminarias (o 24 para disposición bilateral) sin embargo, solo las cuatro primeras tienen un aporte significativo.
- Las luminarias deben estar colocadas de modo que su reparto sea longitudinal al eje de la vía

De acuerdo con la IES, la luminancia de velo se calcula con una fórmula parecida a la de CIE, que igualmente es empírica. Se calcula la contribución de cada luminaria y se suman para obtener el valor final de la luminancia de velo. La fórmula es:

$$L_v = \sum_{i=1}^n \frac{10E_{vi}}{q^2 + 1.5q}$$

Donde

L_v = Luminancia de Velo.

E_v = Iluminancia vertical en el plano de la pupila del observador, en luxes.

f = ángulo entre la línea de circulación y la luminaria, en grados. La línea de circulación es una línea paralela a la vía localizada a $\frac{1}{4}$ del ancho de la vía a la altura del ojo del observador, a 1.45 m.

n = Número de luminarias del proyecto que se ven directamente desde el punto de evaluación de la luminancia de velo. Debe ser desde el mismo punto y las mismas luminarias a las utilizadas para evaluar la luminancia de la calzada.

2.6.9 Cálculo del incremento del umbral (T_i) en una instalación de alumbrado público

Es una medida de la pérdida de visibilidad causada por un deslumbramiento enceguedor originado por la luminaria. Por tanto, es una medida del deslumbramiento fisiológico. La fórmula para calcular este valor se basa en calcular porcentualmente la diferencia de luminancia necesaria para volver a ver el objeto en presencia de un nivel de deslumbramiento dado, respecto a la diferencia de luminancia necesaria para ver el objeto pero en ausencia del deslumbramiento.



ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ D. C.
UNIDAD EJECUTIVA DE SERVICIOS PÚBLICOS
MANUAL ÚNICO DE ALUMBRADO PÚBLICO

CAPÍTULO II

FUNDAMENTOS

Revisión 00

Fecha 27-09-01

Pág. 62 de 64

Así, la fórmula parte de:

$$Ti = \frac{\Delta L_g - \Delta L_o}{\Delta L_o} \times 100$$

De acuerdo con la Recomendación CIE 31 y partiendo de la definición anterior, se calcula el incremento del umbral como:

$$Ti = 65 \left(\frac{L_v}{(L_{prom})^{0.8}} \right) \text{ en } \%$$

Donde

L_v = Luminancia de velo calculada según la sección 2.6.8 en Cd/m^2

L_{prom} = Luminancia promedio sobre la vía calculada según la sección 2.6.5 en Cd/m^2

Restricciones en la aplicación de las fórmulas anteriores:

- La luminancia promedio L_{prom} debe estar entre 0.05 y 5.0 Cd/m^2
- Valores por debajo de 2% en el cálculo de Ti se desprecian

2.6.10 Cálculo del Índice de confort (G) en una instalación de alumbrado público

La apreciación subjetiva del deslumbramiento y por tanto los valores correspondientes del **índice de confort G** se obtienen en función de ciertas características fotométricas de las luminarias consideradas en la instalación y en algunos elementos de la geometría de la instalación.

La fórmula que relaciona estas funciones es empírica y ha sido considerada en la norma CIE-31:

$$G = f(I_{80}, I_{88}, F, L, h', p)$$

De tal modo que G puede expresarse como:



ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ D. C.
UNIDAD EJECUTIVA DE SERVICIOS PÚBLICOS
MANUAL ÚNICO DE ALUMBRADO PÚBLICO

CAPÍTULO II

FUNDAMENTOS

Revisión 00

Fecha 27-09-01

Pág. 63 de 64

$$G = 13.84 - 3.31 \log(I_{80}) + 1.3 \log(I_{80} / I_{88})^{1/2} - 0.08 \log(I_{80} / I_{88}) + 1.29 \log(F) + C + 0.97 \log(L_{prom}) + 4.41 \log(h') - 1.46 \log(p)$$

Donde:

- I_{80}, I_{88} = Intensidades luminosas en Cd . con un ángulo de elevación de 80° y 88° respectivamente en dirección paralela al eje de la calzada (en el modelo CIE corresponde a $C=0^\circ$. En el modelo IES, $C=90^\circ$)
- F = Superficie aparente del área limitada de la luminaria vista bajo un ángulo de 76° expresada en m^2
- L_{prom} = Luminancia promedio de la calzada en Cd/m^2
- h' = Distancia entre el nivel de los ojos y en nivel a la altura de montaje de la luminaria en m .
- p = Número de luminarias por Km . de la instalación
- C = Factor cromático. Para fuentes LPS, $C=0.4$; Para el resto, $C=0.0$

Para facilitar su cálculo, se define el SLI con todos los elementos que dependen de la luminaria, de modo que:

$$SLI = 13.84 - 3.31 \log(I_{80}) + 1.3 \log(I_{80} / I_{88})^{1/2} - 0.08 \log(I_{80} / I_{88}) + 1.29 \log(F) + C$$

Restricciones en la aplicación de las fórmulas anteriores:

- I_{80} = Entre 50 y 7000 candelas
- I_{80} / I_{88} = Entre 1 y 50
- F = Entre 0.007 y 0.4 metros cuadrados
- L_{prom} = Entre 0.3 y 7 candelas por metro cuadrado
- h' = Entre 5 y 20 metros
- p = Entre 20 y 100

2.6.11 Cálculo del valor **SR**

La relación **SR** es el cociente entre la iluminancia promedio sobre franjas adyacentes: una ubicada en la vía y otra en la acera. Cada una de estas franjas tiene un ancho igual a la mitad del ancho de la



ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ D. C.
UNIDAD EJECUTIVA DE SERVICIOS PÚBLICOS
MANUAL ÚNICO DE ALUMBRADO PÚBLICO

CAPÍTULO II

FUNDAMENTOS

Revisión 00

Fecha 27-09-01

Pág. 64 de 64

calzada o el ancho máximo que permita la geometría del andén, sin exceder de 5 m de ancho.

Por ejemplo: al tomar el diseño de iluminación sobre una calzada compuesta por dos elementos: la vía, por donde circulan los vehículos y el andén, por donde circulan los peatones. Ahora, suponga que el carril más próximo al andén tiene un ancho de 3.0 m y se le ha calculado una iluminancia promedio de 32.2 Luxes. Si la relación mínima **SR** es de 0.5, se deduce que **$SR \times E_{prom}$** es al menos 16.1 Luxes. Así que el cálculo de iluminancia sobre la acera deberá dar un resultado al menos igual a este valor (16.1 Luxes). Esta luminancia promedio deberá mantenerse en toda la extensión del andén. Supóngase que este andén tiene 1.5 m