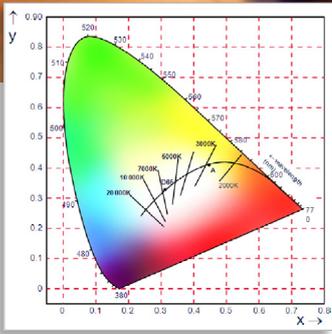




Philips Lighting University

Take the lead in light



Fundamentos sobre la generación de la luz y el alumbrado

Wout van Bommel

Abdo Rouhana

PHILIPS

sense and simplicity

Prefacio

La conexión entre el aspecto humano y el técnico es lo que hace de la iluminación un tema tan atractivo y especial, y que interese a profesionales de campos totalmente distintos. Todos aquellos que trabajan en el mundo de la iluminación, ya sea en el área de la técnica, en el diseño artístico, en el área comercial o administrativa, se beneficiaran de contar con unos conocimientos básicos sobre la luz y el alumbrado. Les proporcionará no solo la capacidad para realizar mejor su trabajo cotidiano, sino que les abrirá posibilidades profesionales y lo más probable es que les haga disfrutar más de su trabajo.

En este primer volumen de una serie de libros de formación se analizan los conceptos básicos de la luz y la iluminación. Se explica qué es la luz, cómo funciona nuestra visión, como se produce la luz artificial, y cómo se utilizan los fenómenos ópticos en las luminarias para dirigir la luz a donde se la necesita. Las unidades típicas de luz basadas en cómo el ojo percibe la definición de los objetos, como son las relaciones entre la luz por una parte y la visión, el color y la salud, por otra. En los capítulos finales se indica cómo se puede determinar la calidad de las instalaciones de iluminación de forma que la luz se traduzca en buen rendimiento visual, en mayor comodidad visual y en bienestar y salud, sin afectar negativamente al medio ambiente. Todos estos temas de “conceptos básicos de la luz y la iluminación” se exponen de la forma más sencilla posible y recurriendo lo menos posible a las matemáticas. En la versión para libro electrónico se utilizan ilustraciones animadas, para mayor claridad.

En los próximos libros se analizarán en mayor detalle los temas relacionados con las luminarias y sus aplicaciones.

Philips Lighting University
Take the lead in light

Dirección de correo electrónico:
Lighting_university@philips.com

Página de Intranet:
<http://pww.lighting.philips.com/university#sf>

Contenido

Prefacio	2	4.4.1 Flujo luminoso e iluminancia media	23
1 Luz y radiación	5	4.4.2 Intensidad luminosa e iluminancia	24
1.1 Teoría de las ondas electromagnéticas	5	4.4.3 Iluminancia y luminancia	26
1.1.1 Características de las ondas electromagnéticas	5	4.4.4 Flujo luminoso e intensidad luminosa	27
1.1.2 El espectro electromagnético	6	4.5 Medición de cantidades de luz	27
1.1.3 El espectro electromagnético	6	4.5.1 Iluminancia	27
1.2 Teoría cuántica	7	4.5.2 Intensidad luminosa	27
2 ¿Cómo se produce luz?	8	4.5.3 Flujo luminoso	28
2.1 Radiadores térmicos	8	4.5.4 Luminancia	28
2.1.1 El cuerpo negro	8	5 Luz y visión	29
2.1.2 Lámparas incandescentes	9	5.1 El proceso visual y el ojo	29
2.1.3 Lámparas incandescentes halógenas	9	5.1.1 Bastones y visión escotópica	30
2.2 Radiadores de descarga	10	5.1.2 Conos y visión fotópica	30
2.2.1 Principio de descarga	10	5.1.3 Curvas de sensibilidad espectral del ojo estandarizadas	31
2.2.2 Equipos eléctricos	10	5.1.4 Visión mesópica	31
2.2.3 Lámparas de descarga de baja presión	11	5.1.5 Mecanismos de ajuste del ojo	31
2.2.4 Lámparas de descarga de alta presión	11	5.2 Rendimiento y comodidad visual	33
2.2.5 Lámparas sin electrodos	11	5.2.1 Agudeza visual	33
2.2.6 Fluorescencia	12	5.2.2 Detección de contraste	33
2.2.7 Temperatura de color correlacionada	12	5.2.3 Deslumbramiento	36
2.2.8 Distribución espectral de energía	12	5.2.4 Rendimiento visual y el envejecimiento	37
2.3 Radiadores de estado sólido	13	5.3 Aspectos psicológicos y emocionales de la visión	37
2.3.1 Principio de funcionamiento	13	5.3.1 El ojo ve, el cerebro percibe	37
2.3.2 Drivers	13	5.3.2 Efectos emocionales de la luz	37
2.3.3 LED	14	6 Luz y color	39
2.3.4 OLED	15	6.1 Combinación de colores	39
2.4 Tipos de lámpara	15	6.1.1 Mezcla aditiva	39
2.4.1 ¿Por qué hay tantos tipos de lámpara?	15	6.1.2 Mezcla sustractiva	40
2.4.2 Familias de lámparas	15	6.2 Triángulo de color	40
3 Direccionalidad y control de la luz	16	6.2.1 Temperatura de color y el triángulo de color	41
3.1 Reflexión	16	6.2.2 Temperatura de color correlacionada y el triángulo de colores	41
3.1.1 Reflexión especular	16	6.3 Aspecto de color y temperatura de color	42
3.1.2 Reflexión difusa	16	6.4 Adaptación cromática	43
3.1.3 Reflexión mixta	17	6.5 Reproducción del color e índice de reproducción cromática	43
3.1.4 Reflexión interna total	17	7 Luz y salud	46
3.2 Absorción	17	7.1 Ritmos circadianos	46
3.3 Transmisión	17	7.2 Sensibilidad espectral biológica no visual	47
3.4 Refracción	18	7.3 Iluminación y terapia	47
3.5 Interferencia	19	8 Iluminación de calidad	48
4 Magnitudes y unidades	20	8.1 Nivel de iluminación	48
4.1 ¿Por qué se usan unidades especiales?	20	8.1.1 Luminancia e iluminancia	48
4.2 La sensibilidad espectral del ojo y las unidades de luz	20	8.1.2 Efectos del nivel de iluminación	48
4.3 Magnitudes y unidades fotométricas	20	8.1.3 Planos para la especificación del nivel de iluminación	49
4.3.1 Flujo luminoso	20		
4.3.2 Intensidad luminosa	21		
4.3.3 Iluminancia	21		
4.3.4 Luminancia	22		
4.4 Relaciones prácticas entre cantidades de luz	23		

8.2 Distribución espacial de la luz	49
8.2.1 Relaciones de uniformidad y luminancia	49
8.2.2 Limitación del deslumbramiento	50
8.3 Direccionalidad de la luz	50
8.3.1 Luz direccional	51
8.3.2 Luz difusa	52
8.3.3 Luz indirecta	52
8.3.4 Distribución luminosa de las luminarias	53
8.4 Color de la luz	53
8.4.1 Reproducción del color	53
8.4.2 Temperatura de color	53
8.4.3 Luz de colores	53
8.5 Economía de la luz	54
8.5.1 Instalación de iluminación	54
8.5.2 Control de iluminación	54
9 La luz y el medio ambiente	55
10 Índice	56
Sobre los autores	59
Agradecimientos	60

Animaciones Flash

Puede ver las animaciones a toda pantalla.

Para ello, inicie la animación una vez y haga clic con el botón derecho.

I Luz y radiación

Los científicos necesitaron mucho tiempo para formular una teoría bien fundamentada sobre la naturaleza y el comportamiento de la luz. Surgieron dos teorías que, en conjunto, describen todos los aspectos de la luz de forma satisfactoria: la teoría de ondas electromagnéticas y la teoría cuántica o de fotones.

1.1 Teoría de las ondas electromagnéticas

Maxwell ofrece la definición más sencilla, al considerar la luz una radiación electromagnética formada por ondas que se transmiten en todas las direcciones desde su origen. Las ondas de luz no están formadas por partículas materiales, como las ondas sonoras, sino por ondas de los campos eléctrico y magnético. A diferencia del sonido, en que la vibración de las partículas sigue la dirección de desplazamiento (figura 1.1), la luz tiene una vibración transversal, perpendicular a la dirección del desplazamiento (figura 1.2). Las ondas eléctricas y magnéticas se desplazan de forma perpendicular unas respecto a las otras. No están formadas por partículas, por lo que, a diferencia de las ondas sonoras, pueden desplazarse en el vacío.

¿Qué pasaría si el sonido pudiera desplazarse por el vacío?: en la tierra podría escucharse el ruido extremadamente alto de todas las erupciones solares y de las estrellas.

Haga clic en la imagen para reproducir la animación...

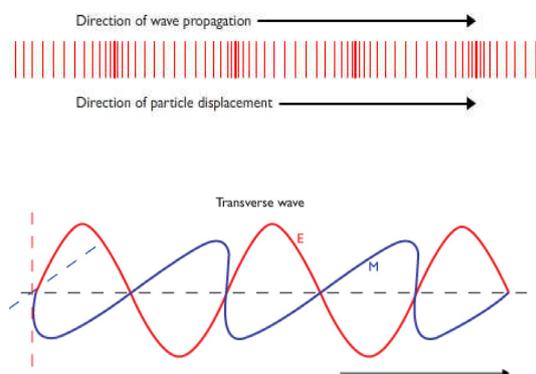


Fig. 1.2. Ondas electromagnéticas transversales.

La vibración transversal se puede demostrar muy fácilmente tirando una piedra a un estanque (figura 1.3).



Fig. 1.3. Ondas transversales en el agua.

Haga clic en la imagen para reproducir la animación...



1.1.1 Características de las ondas electromagnéticas

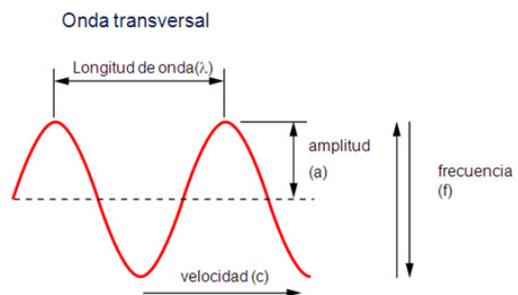
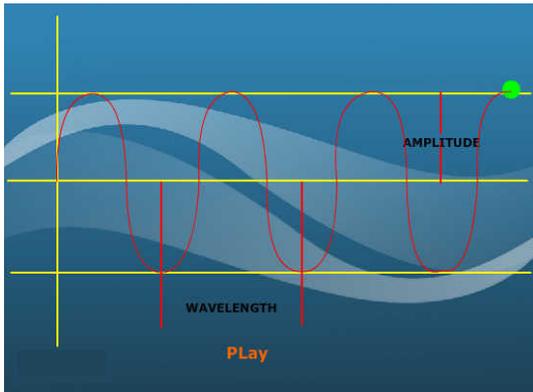
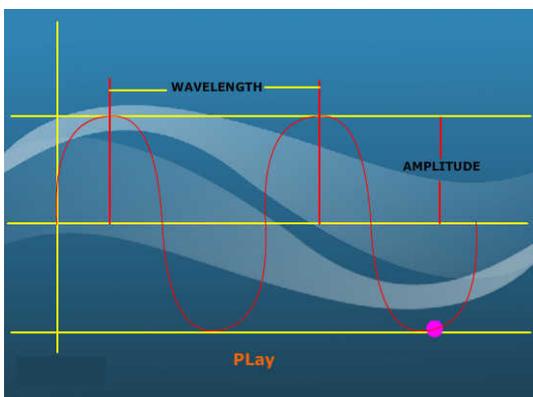


Fig. 1.4. Características de las ondas.

Haga clic en la imagen para reproducir la animación...



Haga clic en la imagen para reproducir la animación...



La distancia entre la parte superior de una onda y la siguiente se denomina longitud de onda (λ). Muchas de las propiedades de la radiación electromagnética se explican por la diferencia en las longitudes de onda.

El número de vibraciones por segundo se denomina frecuencia (ν). La frecuencia se expresa en hercios (Hz), o ciclos por segundo. Existe una relación directa entre la frecuencia y la longitud de onda de las ondas electromagnéticas:

$$\nu = \lambda \cdot \nu$$

Albert Einstein descubrió, con su teoría de la relatividad, que la velocidad de la radiación electromagnética, y por tanto de la luz, en el vacío no solo es la velocidad más alta posible, sino también la única verdadera constante del universo. La velocidad de la luz (ν) es casi de 300.000 km por segundo.

1.1.2 El espectro electromagnético

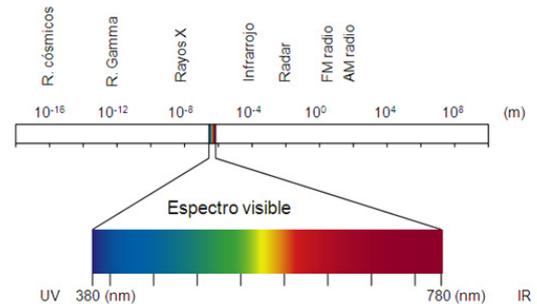


Fig. 1.5. El espectro electromagnético.

El espectro de la radiación electromagnética es extremadamente amplio. Comenzando por las longitudes de onda de la transmisión de radio de onda larga que son extremadamente grandes (hasta 2.000 metros); pasando a longitudes de onda más cortas como las de la radio AM y FM, las microondas, las transmisiones de TV y las transmisiones de radar (longitudes de un metro o menos). Llegamos a longitudes de onda del calor, o radiación infrarroja, que miden menos de una milésima de milímetro. Por debajo de estos valores, existe radiación con una longitud de onda de entre 780 y 380 nanómetros, la parte visible del espectro electromagnético, que se conoce como luz. Un nanómetro equivale a la milésima parte de un milímetro, o a 10^{-9} metros.

Las distintas longitudes de onda de la parte visible del espectro generan distintas impresiones de color, empezando por el rojo, naranja, amarillo, verde, azul, hasta llegar al violeta, según disminuye la longitud de onda. En las longitudes de onda más bajas se encuentra la región de los rayos ultravioleta: las longitudes de onda más largas de los rayos ultravioleta forman parte de la radiación que recibimos del sol y se consideran beneficiosos (UVA), y son los responsables del bronceado de la piel. La radiación ultravioleta de ondas más cortas (UVB), por el contrario, puede ser perjudicial para los ojos y la piel, si bien es necesaria en pequeñas cantidades porque los rayos UVB producen vitamina D. Los rayos UVC se pueden usar como desinfectante porque matan las bacterias. Las longitudes de onda todavía más cortas nos llevan primero a los rayos X, que pueden atravesar el cuerpo, y después a los rayos gamma, sumamente peligrosos, que se generan en la descomposición nuclear. En último lugar están los rayos cósmicos, generados por las colisiones entre partículas que se mueven a altísimas velocidades y se desplazan desde los confines del universo. Los rayos cósmicos tienen longitudes de onda de hasta 10^{-18} metros.

La luz blanca que emiten el sol o las lámparas incandescentes, es una combinación de todas las longitudes de onda del espectro visible. Su espectro contiene también radiación de las regiones adyacentes infrarroja y ultravioleta.

Una forma muy sencilla de separar las longitudes de onda que componen la luz blanca consiste en utilizar un prisma (figura 1.6). El espectro que se obtiene muestra los colores del arcoíris: rojo, naranja, amarillo, verde, azul y violeta. Las longitudes de onda correspondientes son más o menos las siguientes:

Rojo	630 – 780 nm
Naranja	600 – 630 nm
Amarillo	565 – 600 nm
Verde	500 – 565 nm
Azul	435 – 500 nm
Violeta	380 – 435 nm

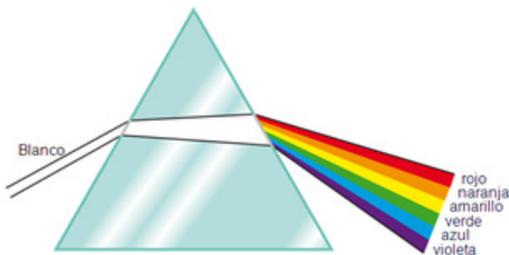


Fig. 1.6. Separación de la luz blanca en un prisma.

No todas las longitudes de onda producen la misma sensación de luminosidad en el ojo humano. La más alta sensibilidad del ojo se encuentra en la región del verde a 555 nm. Este fenómeno se describe en mayor detalle en la sección 4.2. Con la teoría de las ondas electromagnéticas se puede calcular y predecir no solo la velocidad de la luz, sino además otros aspectos como la reflexión, absorción, transmisión, refracción, interferencia y polarización de la luz. Sin embargo, el cálculo de la energía de la radiación para distintas longitudes de onda no se puede realizar con la teoría de ondas. Es necesario aplicar la teoría cuántica, en la que la luz se considera un fenómeno de cuantos o fotones.

1.2 Teoría cuántica

En 1900, Max Planck asumió que la energía de la radiación se emite en partes indivisibles independientes, que denominó cuantos (figura 1.7). En el caso de la radiación visible (luz) se usa el término fotón.

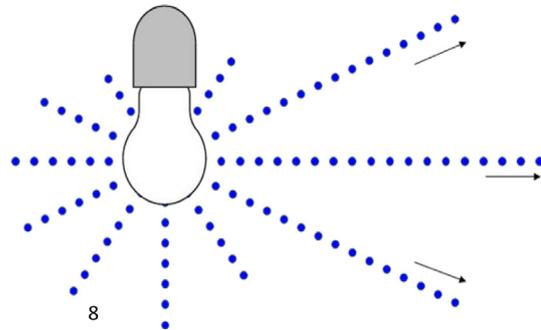


Fig. 1.7. La luz tratada como cuantos o fotones.

El contenido de energía de un cuanto de radiación está directamente relacionado con su frecuencia o longitud de onda:

$$E = h \cdot \nu \text{ o } E = h \cdot c / \lambda$$

donde:

E = energía (julios)

ν = frecuencia (Hz)

h = constante de Planck ($6,626 \times 10^{-34}$ J s)

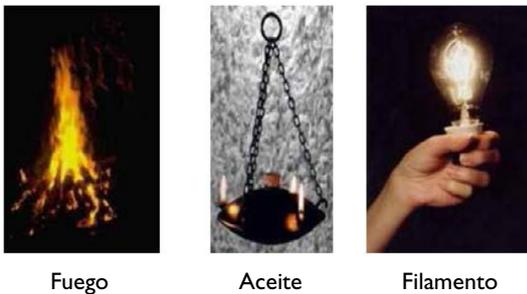
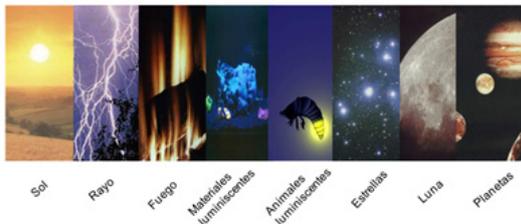
c = velocidad de la luz en el vacío ($2,998 \times 10^8$ m/s)

λ = longitud de onda (m)

Así, la teoría cuántica de Max Planck indica que cuanto más corta es la longitud de onda, más alta es la energía de la radiación. Y esto explica por qué no tenemos problemas con las ondas de radio: tienen longitudes de onda largas y, en consecuencia, poca energía. Explica también por qué tenemos que tener cuidado con las poderosas longitudes de onda cortas, llenas de energía, de los rayos ultravioleta, X y gamma.

2 ¿Cómo se produce luz?

La luz se puede generar de distintas formas. Mediante fenómenos naturales obtenemos luz (figura 2.1), procedente del sol, las estrellas, los relámpagos, etc., o se puede generar por diversos métodos artificiales, como se ve en la figura 2.2.



Fuego

Aceite

Filamento



Descarga en gas



LED, luz de estado sólido

Figs 2.1 and 2.2. Luz natural y artificial, respectivamente.

Las lámparas disponibles en la actualidad son fundamentalmente de tres tipos:

- radiadores térmicos
- radiadores de descarga
- radiadores de estado sólido

2.1 Radiadores térmicos

Los cuerpos que emiten radiación electromagnética al adquirir altas temperaturas se denominan radiadores térmicos. Ejemplos de radiadores térmicos son el sol y las lámparas incandescentes. Si se calienta un cuerpo sólido a una temperatura de unos 525°C, empezará a emitir una luz roja apagada. Cuando aumenta la temperatura, el color cambia de rojo apagado a rojo vivo, naranja, amarillo, blanco y, cuando se aproxima a la temperatura de fusión, blanco azulado.

2.1.1 El cuerpo negro

Las propiedades exactas de la radiación que produce un cuerpo al calentarse dependen en cierta medida del tipo de cuerpo (tipo de material) de que se trate. Por ello, para poder analizar esas propiedades con precisión se necesita una definición clara del tipo del cuerpo sometido a calor. Con esta finalidad se usa un cuerpo ideal, que absorbe la luz de forma perfecta: es lo que se denomina “radiador de cuerpo negro”. A temperaturas demasiado bajas para que la emisión de radiación sea visible, tendrá un aspecto totalmente negro y, de ahí, la denominación de radiador de cuerpo negro.

Espectro de la luz

La composición de la luz emitida por una fuente de luz se conoce como espectro. Dicho de otro modo, el espectro de la luz muestra la composición de los diversos colores o longitudes de onda de la luz que se emite. Todas las longitudes de onda visibles están presentes en distinta proporción en el espectro de un radiador térmico. Dicho espectro se denomina espectro continuo (figura 2.3).



Fig. 2.3. Espectro continuo de un radiador térmico.

Temperatura de color

La temperatura a la que se encuentra el cuerpo negro determina exactamente el espectro de la radiación y, en consecuencia, el color percibido de la luz emitida. Por ello, para denominar el color de los radiadores térmicos utilizamos la expresión “temperatura de color”, que es la temperatura del cuerpo sometido a calor. Convencionalmente, la temperatura de color se expresa en K (Kelvin) donde:

$$K = ^\circ C + 273$$

La llama de una vela (formada por partículas de carbono resplandecientes a aproximadamente a 2000K) emite una luz amarilla. El filamento de una lámpara incandescente (temperatura entre 2700K y 2800K) es blanco amarillento, y el sol del mediodía (temperatura 5500K) es blanco. Cuanto más baja es la temperatura, más cálido (más rojizo) es el color de la luz y mayor la cantidad de radiación infrarroja producida. Por el contrario, cuanto más alta es la temperatura de color, más frío (más azulado) es el color de la luz y mayor la cantidad de radiación ultravioleta producida.

Distribución espectral de la energía

Las distribuciones espectrales de energía de los radiadores de cuerpo negro de distintas temperaturas de color dan las proporciones de energía de una serie de longitudes de onda, como se ve en la Fig. 2.4. La energía se irradia en la región visible e infrarroja y, con temperaturas superior a 3000K, también en el ultravioleta. Conforme aumenta la temperatura del cuerpo emisor el pico de la energía radiada se desplaza hacia las longitudes de onda más cortas (región azul del espectro). En la temperaturas comprendidas entre los 3700K y los 7600K este pico se encuentra en la región visible.

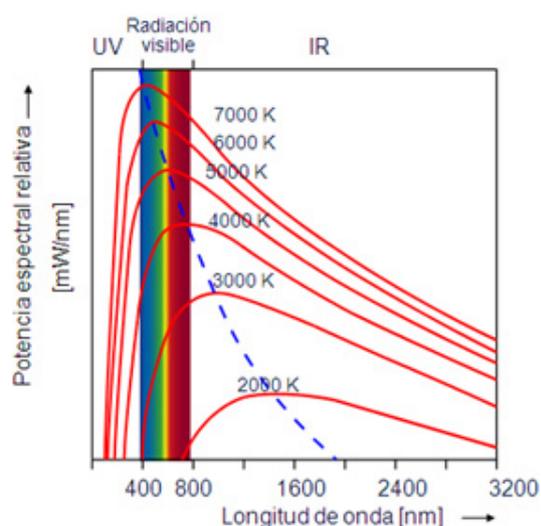


Fig 2.4 Curvas de distribución de la energía de radiadores de cuerpo negro de distintas temperaturas de color

2.1.2 Lámparas incandescentes



Las lámparas incandescentes son las únicas fuentes de luz que generan luz por el calentamiento de un filamento. Para hacer un análisis práctico de las propiedades de las lámparas incandescentes, normalmente se pueden usar los conceptos teóricos del cuerpo negro descritos anteriormente. Así, en la figura 2.4 podemos ver que una lámpara incandescente con una temperatura de color de entre 2700K y 2800K emite casi toda su energía en forma de radiación infrarroja, o calor. Esta es la razón por la que las lámparas incandescentes son tan ineficientes si se compara la cantidad de luz emitida con la energía consumida. Solo en torno al 5 por ciento de la energía que consume una lámpara incandescente se convierte en radiación visible, o luz.

Puesto que el filamento de la lámpara tiene que alcanzar una temperatura muy elevada para dar luz, el material del filamento se evapora con relativa rapidez. Es por ello que las lámparas incandescentes tienen una vida útil relativamente corta: 1.000 horas.

2.1.3 Lámparas incandescentes halógenas

En la figura 2.4 se ve también que un radiador térmico es más eficiente conforme aumenta su temperatura. En una lámpara incandescente halógena la temperatura del filamento aumenta a 3000K, y, en consecuencia, su eficiencia es entre 2 y 3 veces superior a la de las lámparas incandescentes normales. Mediante la introducción de un halógeno en la bombilla, las lámparas halógenas se pueden poner a esta alta temperatura sin que el filamento se evapore más rápidamente. El material del filamento evaporado (tungsteno) reacciona químicamente con el halógeno de forma que una parte importante del material del filamento evaporado vuelve al filamento. Este proceso se conoce como ciclo halógeno y, gracias a él, la vida útil de la lámpara halógena es más larga que la de la lámpara incandescente normal: de 2.000 a 4.000 horas.



2.2 Radiadores de descarga

A menos que se encuentre a una presión extremadamente elevada (como en el centro del sol), un gas no se enciende cuando se calienta como lo hace un cuerpo incandescente. Con todo, se puede hacer que los gases emitan radiación electromagnética. La forma más eficaz de hacer que un gas emita luz es enviar un haz de electrones a través del gas (figura 2.5). Es lo que sucede, por ejemplo, en las conocidas lámparas fluorescentes y otras lámparas de descarga, y también en la naturaleza, en los relámpagos.

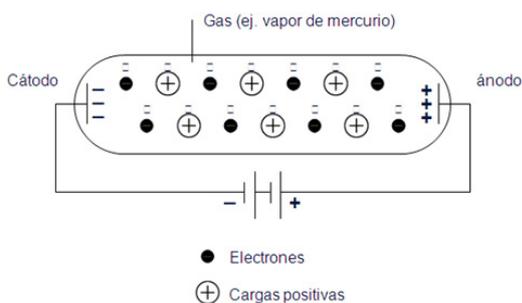


Fig. 2.5 Haz de electrones e iones en un tubo de descarga moviéndose a alta velocidad hacia los electrodos, es decir, ánodo y cátodo respectivamente.

2.2.1 Principio de descarga

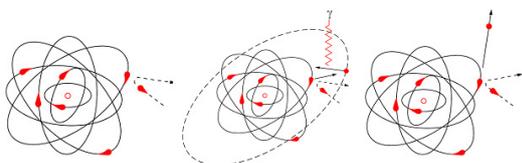


Fig. 2.6 a, b y c. Colisión elástica, de excitación e ionizante de un electrón libre con un átomo de gas.

La razón por la que un haz de electrones desplazándose por un gas produce luz es que los electrones libres interactúan con los átomos del gas. Para tener electrones libres en un gas, el gas se pone en un tubo transparente sellado con un electrodo en cada extremo. El electrodo positivo, o ánodo, recibe una carga positiva y el electrodo negativo, o cátodo, recibe una carga negativa (véase la figura 2.5). El tubo transparente se denomina tubo de descarga. Si se aplica una diferencia de tensión entre los electrodos, se extraen electrones libres del electrodo con carga negativa y se desplazan hacia el ánodo con carga positiva. Cada átomo de gas consta de un núcleo con carga positiva y una serie de electrones con carga negativa que giran en torno al núcleo. Si un átomo colisiona con un electrón libre que se mueve a alta velocidad, pueden suceder tres cosas, en función de la velocidad relativa de las partículas que colisionan:

1. Si la velocidad es relativamente baja, el átomo absorberá parte de la energía cinética del electrón, pero su estructura no cambiará (Fig 2.6 a). Es lo que se conoce como “colisión elástica” y produce un aumento de la temperatura del gas.

2. Si la velocidad es moderada, la colisión expulsará uno de los electrones del átomo de gas temporalmente a una órbita superior de mayor energía (Fig 2.6 b). Es lo que se denomina “colisión de excitación”. El electrón expulsado vuelve rápidamente a su órbita original de menor energía. La diferencia en energía se emite como radiación electromagnética. La longitud de onda de la radiación depende del tipo de átomo de gas y la presión del gas. Esta longitud de onda podría estar en la parte visible, infrarroja o ultravioleta del espectro, dando lugar a la generación de luz visible, calor o radiación ultravioleta, respectivamente.

3. Si la velocidad es alta, uno de los electrones externos del átomo de gas podría ser expulsado por completo (figura 2.6 c). Es lo que se denomina “colisión ionizante” y como consecuencia se generan nuevas partículas libres: iones con carga positiva y electrones con carga negativa. Los iones positivos y electrones negativos generados por el proceso de ionización se desplazarán hacia el cátodo y el ánodo, respectivamente (véase la figura 2.5). En su desplazamiento podrían colisionar con átomos neutros del gas y contribuir así al proceso de descarga.

2.2.2 Equipos eléctricos

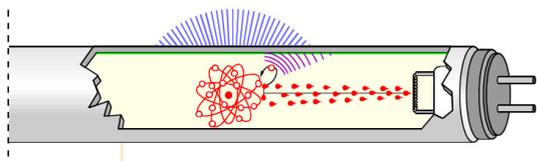
Como ya se ha explicado, el proceso de ionización aumenta el número de electrones libres. Con este aumento, aumenta también la corriente eléctrica en el tubo de descarga y es necesario un dispositivo limitador de la corriente para evitar su incremento ilimitado. Este dispositivo se llama, según como funcione, balasto resistivo, inductivo (imagen de la izquierda) o equipo electrónico (imagen de la derecha).



En la mayoría de las lámparas de descarga la diferencia de voltaje entre los electrodos exclusivamente no es suficiente para empezar a extraer electrones del cátodo. Se necesita un dispositivo de arranque que proporcione un pico de voltaje temporal que ayude a arrancar la lámpara. Los cebadores pueden ser elementos independientes o, en dispositivos más avanzados, la función puede estar integrada en el balasto electrónico.

2.2.3 Lámparas de descarga de baja presión

En las lámparas de descarga de baja presión, la presión del gas en el tubo de descarga se aproxima al vacío (aproximadamente 10⁻⁵ de una atmósfera). La temperatura de funcionamiento es relativamente baja y la lámpara relativamente larga (las lámparas de baja presión compactas se doblan varias veces). Las lámparas de descarga de baja presión utilizadas en iluminación contienen gas de mercurio o de sodio: lámparas de mercurio de baja presión y de sodio de baja presión. Las primeras se suelen denominar “lámparas fluorescentes” y Philips las denomina lámparas TL.



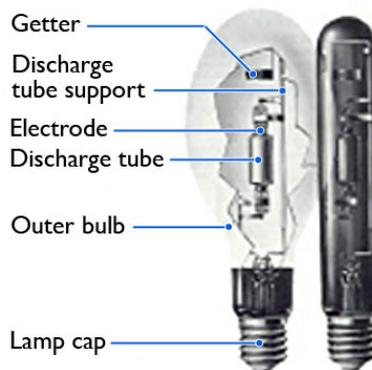
Las lámparas de descarga son mucho más eficientes que las incandescentes: las lámparas de mercurio de baja presión son hasta 8 veces más eficientes y las de sodio de baja presión, con una característica luz amarillenta, hasta 15 veces. Como no utilizan un filamento sometido a calor para dar luz, las lámparas de descarga tienen una vida útil mucho más larga que las incandescentes: las lámparas de baja presión pueden durar de 10.000 a más de 25.000 horas, y algunos tipos especiales pueden durar más de 60.000 horas (véase la sección 2.2.5, lámparas sin electrodos).

Las lámparas de descarga de neón de baja presión, que no son lámparas de mercurio de baja presión, no se suelen usar en iluminación y se usan sobre todo en anuncios publicitarios.

2.2.4 Lámparas de descarga de alta presión

En las lámparas de descarga de alta presión, la presión del gas en el tubo de descarga es de en torno a una atmósfera. La temperatura del gas puede estar entre los 4.000 y los 6.000 grados centígrados. Las lámparas de alta presión son mucho más compactas que las de baja presión. Al igual que en las de baja presión, en las lámparas de alta presión se utiliza gas de mercurio o de sodio. Los tipos de lámparas comunes en las que se usa mercurio, además de las lámparas HPL de mercurio de alta presión, son las lámparas de halogenuros metálicos. Los tipos de lámparas en las que se usa sodio son las lámparas SON y SON blanca de sodio de alta presión. Las lámparas de descarga de alta presión se denominan a veces lámparas HID (descarga de alta intensidad).

Como ya se ha mencionado, las lámparas de descarga son mucho más eficientes que las incandescentes: las lámparas de alta presión pueden serlo hasta 10 veces más. También su vida útil es mucho más larga: pueden durar de 10.000 a más de 25.000 horas.



2.2.5 Lámparas sin electrodos

Lámparas de inducción

La principal causa de que las lámparas de descarga dejen de funcionar al final de su vida útil es que se estropeen los electrodos. Por ello, los diseñadores de lámparas trataron de conseguir lámparas de descarga sin electrodos. La lámpara de inducción que se introdujo a principios de los años noventa del siglo pasado es de ese tipo.

En esta lámpara de descarga de mercurio de baja presión, que puede llegar a tener una vida útil de más de 60.000 horas, los electrones libres no se extraen de los electrodos, sino que el gas de mercurio los libera mediante un proceso de inducción. El proceso de inducción se conoce bien por los transformadores, en los que una corriente alterna que fluye por una bobina principal enrollada en un núcleo de hierro inicia una corriente en una bobina secundaria. En la lámpara de inducción, una bobina principal enrollada en un núcleo de hierro se pone en el interior o en torno al tubo de descarga. El mercurio del tubo de descarga, como también es un metal, actúa como bobina secundaria en la que se inicia la “corriente secundaria”, formada por electrones libres. Estos electrones libres generan luz exactamente de la misma que los electrones libres de las lámparas de descarga normales. La luz es igual que la de una lámpara normal de descarga de mercurio de baja presión.



Lámparas de microondas

Los electrones libres no son la única forma de poner un gas en movimiento. También se puede lograr mediante radiación electromagnética, fenómeno que abre otra posibilidad para conseguir lámparas de descarga sin electrodos: la lámpara de microondas. En ella, la radiación electromagnética con una longitud de onda de microondas (más cortas que las ondas de radio) pone en movimiento el gas de una bombilla de descarga. En estas lámparas se puede usar sulfuro como gas emisor de luz; el sulfuro no se puede usar en lámparas de descarga convencionales porque es demasiado agresivo para los electrodos. Este tipo de lámparas se calienta mucho durante su funcionamiento, por lo que hay que tomar medidas de enfriamiento especiales, por ejemplo un enfriamiento activo forzado. Las lámparas de microondas se han desarrollado como lámparas de descarga de alta intensidad.

2.2.6 Fluorescencia

En algunas lámparas de descarga toda la radiación que se produce no está en el intervalo visible. En el caso de las lámparas de mercurio de baja presión, por ejemplo, la parte más importante de la radiación está en el intervalo ultravioleta, junto a una pequeña cantidad de luz azul visible. La radiación ultravioleta se convierte en luz visible mediante el revestimiento del interior del tubo de descarga con polvo fluorescente (Fig 2.7). Este proceso se utiliza en las lámparas de mercurio de baja presión en forma de tubo que, por ello, se denominan tubos fluorescentes. Las lámparas de inducción, que son de hecho lámparas de mercurio de baja presión, también contienen polvos fluorescentes.

Existen diversos tipos de polvo fluorescente para convertir la radiación ultravioleta en luz visible de distintas longitudes de onda (colores). Si se mezclan distintos polvos fluorescentes en distintas proporciones, se pueden fabricar lámparas que generen distintos tonos de luz blanca. Así es como se fabrican los distintos colores de lámparas fluorescentes.

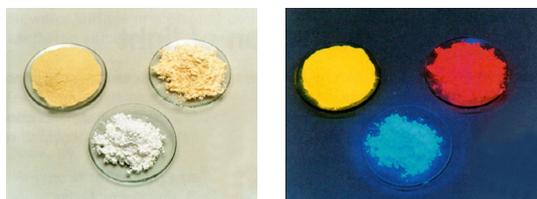


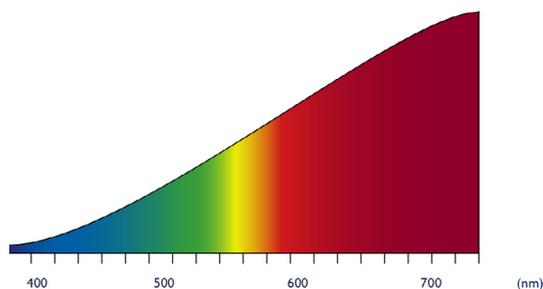
Fig. 2.7. Izquierda: tres tipos de polvo fluorescente bajo una luz blanca. Derecha: los mismos polvos fluorescentes bajo radiación ultravioleta.

2.2.7 Temperatura de color correlacionada

En la sección sobre el radiador de cuerpo negro (2.1.1) se ha explicado el concepto de temperatura de color como medida de la impresión de color de la luz emitida. Este concepto no se puede usar para las lámparas de descarga porque la temperatura del gas en la descarga no tiene relación con el color de la luz. Por ello, se introdujo el concepto de temperatura de color correlacionada para cuantificar las características de color de las lámparas de descarga. El concepto se basa en la comparación del color de la luz de la lámpara de descarga con el color del radiador de cuerpo negro, cuya temperatura se puede cambiar. Cuando el color de la fuente de luz y el del radiador de cuerpo negro son muy parecidos, utilizamos la temperatura de color de este último como medida del color de la lámpara de descarga. Es lo que se denomina temperatura de color correlacionada. En la realidad, no es necesario repetir esta “prueba” para cada una de las lámparas nuevas, porque la temperatura de color correlacionada se puede calcular a partir de la distribución espectral de energía de la lámpara de descarga. En el capítulo 6, “Luz y color”, se proporciona más información.

2.2.8 Distribución espectral de energía

Como ya se ha descrito, un filamento sometido a calor produce un espectro continuo, es decir, en el espectro están presentes todas las longitudes de onda. En la figura 2.8 se muestra la distribución espectral de la energía de una lámpara incandescente. Las lámparas de descarga, por el contrario, tienen un espectro discontinuo. En la figura 2.8 b se muestra un ejemplo en cierta medida extremo. Los “picos y valles” del espectro de una lámpara de descarga afectan a las propiedades del color de su luz, como se explica en el capítulo 6, “Luz y color”.



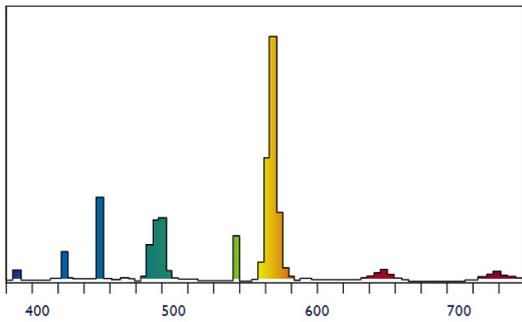


Fig. 2.8 a y b. Ejemplo de distribución espectral de la energía de una lámpara incandescente y una lámpara de descarga, respectivamente.

2.3 Radiadores de estado sólido

2.3.1 Principio de funcionamiento

Como el nombre indica, los radiadores de estado sólido son fuentes de luz en las que la luz se crea dentro de materiales en estado sólido. La emisión de luz se obtiene por la interacción de un campo eléctrico con el material sólido. El proceso físico se llama “electroluminiscencia”. Este fenómeno se descubrió ya en 1907 y el primer producto práctico basado en él se creó en 1962. El material sólido utilizado es un material semiconductor que, como los chips de diodos habituales, tiene capas en forma de unión p-n, lo que da lugar al nombre diodo emisor de luz o LED. El material n tiene un exceso de electrones, mientras al material p le faltan electrones: huecos de electrones. Si se aplica un voltaje a la unión p-n los átomos se dirigen hacia la unión de los dos materiales, donde electrones del material n caen en los huecos del material p. Así, los electrones van de un nivel de energía más alta a otro de menor energía y la diferencia de energía se emite en forma de luz (figura 2.9).

Todos los diodos emiten radiación electromagnética. El material semiconductor usado en los LED se selecciona de forma que emita en el intervalo visible. Materiales distintos producen luz con distintas longitudes de onda y distintos colores.

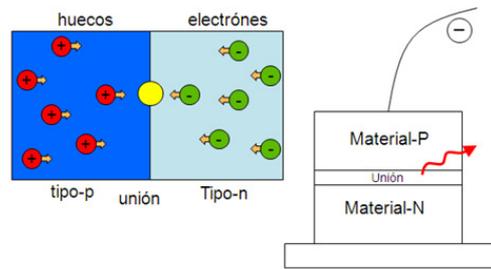
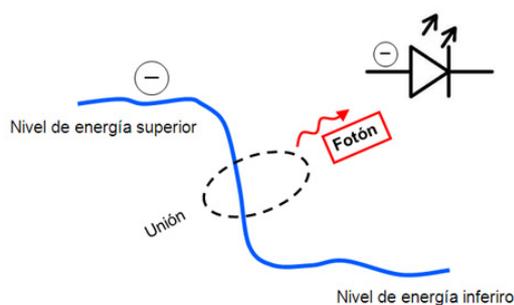


Fig. 2.9. Principio del funcionamiento de los radiadores de estado sólido.

Por supuesto, es esencial obtener la luz del material en estado sólido sin demasiada pérdida por absorción. En este aspecto se han realizado grandes avances. Hasta mediados de los años noventa, los LED tenían un flujo luminoso bajo y poca eficacia, por lo que solo eran adecuados para lámparas de señalización. En la actualidad, la eficacia de los LED es comparable a la de las lámparas de descarga y el flujo luminoso de un solo LED puede ser mayor que el de una lámpara incandescente de 75 vatios. Los LED pueden tener una vida útil de hasta 50.000 horas y se esperan nuevas mejoras que harán que los LED blancos tengan una eficacia de en torno a 15 veces la de las lámparas incandescentes.

2.3.2 Drivers

En los LED la corriente aumenta con gran rapidez cuando aumenta el voltaje, por lo que pequeñas fluctuaciones de voltaje pueden dañarlos. Es necesario usar un “controlador” denominado driver, que regule la energía de entrada al LED. El driver es un circuito electrónico que hace que la corriente sea constante a pesar de las fluctuaciones del voltaje para que los LED puedan funcionar con cualquier fuente de alimentación normal. Los drivers pueden tener también una función de regulación, de forma que el flujo luminoso de los LED se puede regular del 0 al 100%.

2.3.3 LED

Los chips de LED son pequeñas fuentes de luz puntuales, que se pueden usar individualmente o en grupos de varios. En torno a los chips de LED se puede usar todo tipo de materiales ópticos para dirigir y apantallar la luz (figura 2.10). Si los chips de LED, con el controlador, se colocan en una bombilla con la forma de una lámpara convencional, disponemos de un sustituto perfecto para una lámpara incandescente: una lámpara LED.



Fig. 2.10. LED de gran flujo y paraseñalización, respectivamente.

Distribución espectral de energía

Los distintos materiales semiconductores generan espectros distintos y los materiales disponibles en la actualidad permiten fabricar LED de cualquier color. La distribución espectral de la energía es siempre estrecha (figura 2.11).

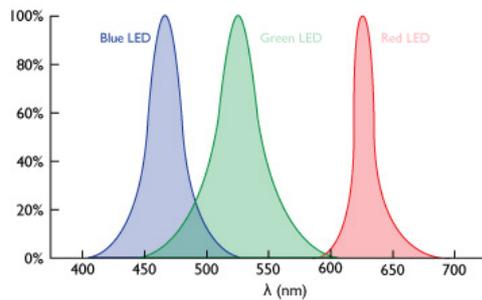


Fig. 2.11. Distribuciones espectrales de energía de LED azul, verde y rojo típicos.

LED blancos

Puesto que el espectro de un solo LED es siempre estrecho, todavía no se pueden fabricar chips de LED blancos, si bien se puede obtener luz de LED blanca mediante la combinación de al menos tres chips de LED de distintos colores. Un método habitual consiste en combinar chips de LED rojos, verdes y azules en un solo módulo o sistema para producir luz blanca (LED RGB, Fig. 2.12).

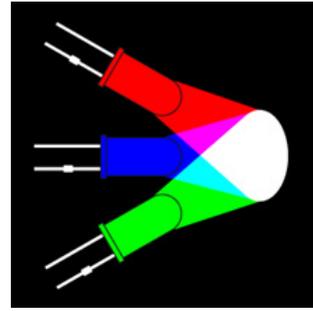


Fig. 2.12. Luz blanca mediante la combinación de luz de LED roja, verde y azul.

Con todo, la reproducción de color de este sistema de “luz blanca RGB” no es de buena calidad, porque hay grandes áreas del espectro de colores que no se incluyen. Se está investigando para fabricar chips LED únicos con varias capas, cada una de las cuales produzca un color de luz concreto. Un único LED que genere luz roja, verde y azul produciría luz blanca. La luz blanca de calidad, muy importante cuando se trata de lograr la buena reproducción cromática, se obtiene mediante el uso de un chip de LED azul junto con material fluorescente que convierte gran parte de la luz azul en luz de distintas longitudes de onda distribuida por casi todo el espectro visible (figura 2.13). En la tecnología de LED ese material fluorescente se conoce como fósforo y, en consecuencia, el LED blanco basado en este principio se denomina “LED de fósforo blanco”. En la figura 20 se muestra la distribución espectral de la energía de un LED de fósforo blanco, donde se ve que la luz se emite ahora sobre prácticamente todo el espectro visible.

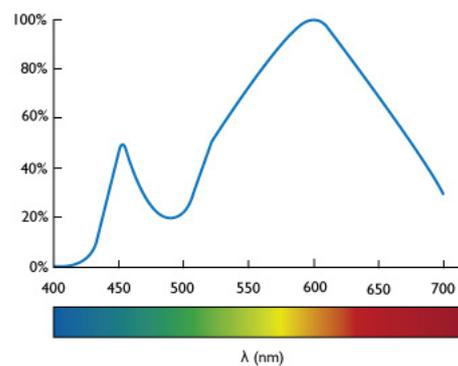


Fig. 2.13. Distribución espectral de energía de un LED de fósforo blanco típico.

2.3.4 OLED

Los LED están hechos de material semiconductor inorgánico; por su parte los más recientes OLED están hechos de material semiconductor orgánico. A diferencia de los LED, que son fuentes puntuales, los OLED son superficies de luz (figura 2.14). Como los LED, se pueden fabricar de muchos colores distintos. Su eficacia es menor que la de los LED, el tamaño de los paneles OLED que se fabrican está aumentando rápidamente, lo mismo que su eficacia.



Fig. 2.14. OLED de varios paneles.

2.4 Tipos de lámpara

Los detalles de los distintos tipos de lámpara se tratarán en un libro posterior de esta serie; aquí vamos a explicar por qué hay tantos tipos distintos de lámparas y cuál es la relación entre ellos.

2.4.1 ¿Por qué hay tantos tipos de lámpara?

Los catálogos de los fabricantes de lámparas contienen muchos tipos de lámpara distintos. La razón para ello es simplemente que la lámpara perfecta no existe. Las propiedades de un tipo de lámpara concreto pueden ser adecuadas para un uso de iluminación específico, pero la misma lámpara puede no resultar útil para otro uso. Cada aplicación de alumbrado requiere una lámpara con unas propiedades específicas. En la tabla 2.1 se describen algunas de las propiedades más importantes, que pueden variar en función de los tipos de lámpara. El diseñador de iluminación debe elegir las propiedades de lámpara más adecuadas para la aplicación concreta.

Flujo luminoso	Precio
Eficacia	Forma y dimensiones
Color de luz	Peso
Reproducción del color	Luminancia
Vida útil	Temperatura de la lámpara
Depreciación del flujo luminoso	Sensibilidad a la temperatura
Balasto sí / no	Posición de funcionamiento
Arrancador si / no	Tiempo de encendido
Sistema óptico integrado sí / no	Materiales no respetuosos con el medio ambiente

Tabla 2.1. Algunas de las propiedades más importantes de las lámparas.

2.4.2 Familias de lámparas

No es fácil recordar todas las propiedades de tantos tipos de lámpara distintos. El diagrama de la figura 2.15 puede ayudar en este sentido.

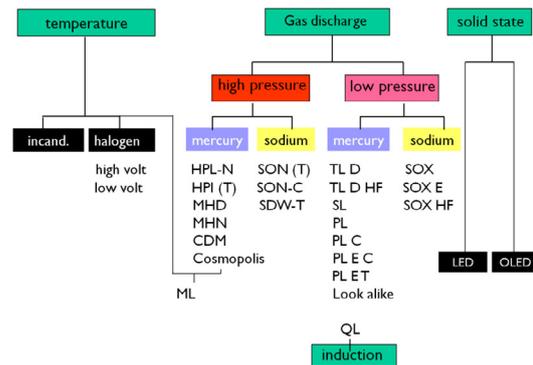


Fig. 2.15 Tipos de lámpara, con el nombre de Philips, clasificados en grupos.

3 Direccionalidad y control de la luz

La luz producida por una lámpara se debe dirigir de modo eficiente a donde se necesita. Además, se debe apantallar para evitar que se creen deslumbramientos. Para dirigir y apantallar la luz se utilizan materiales que reflejan, refractan, absorben o transmiten la luz. En las luminarias se utilizan uno o más de estos métodos.

3.1 Reflexión

En condiciones normales, solo se reflejará parte de la luz que incide sobre una superficie. La cantidad de luz reflejada depende del tipo de superficie, el ángulo de incidencia de la luz y la composición espectral de la misma. La reflexión puede ser un porcentaje muy bajo en el caso de superficies oscuras, como terciopelo negro, o ser más del 90 por ciento en el caso de aluminio, plata y ciertos tipos de pintura blanca. La relación entre la luz reflejada y la incidente se denomina reflectancia de la superficie y se indica con el símbolo ρ , que puede tener un valor entre 0% y 100 %. Normalmente, la reflectancia no es igual para todos los colores del espectro. Una superficie roja, por ejemplo, reflejará sobre todo luz roja. Este tema se describe en el capítulo 6, "Luz y color".

La forma en que se refleja la luz también depende de la textura de la superficie. Se pueden distinguir tres tipos de reflexión: especular, difusa y mixta.

3.1.1 Reflexión especular

La Reflexión especular es la que se produce en una superficie lisa, por ejemplo el agua en calma o el cristal pulido. La superficie actúa como un espejo y el ángulo de incidencia de la luz es igual que el ángulo de reflejado (figura 3.1).

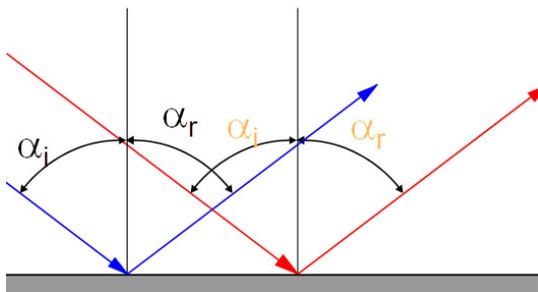


Fig. 3.1 Reflexión especular.

Este tipo de reflejo se denomina especular o de reflexión. Por su poco peso y su gran eficiencia, los reflectores de espejo, sobre todo los curvos, se utilizan mucho cuando se requiere un control de la luz preciso, por ejemplo en proyectores, focos, y lámparas de alumbrado público e interiores. Los reflectores pueden ser parte de la luminaria o formar parte de la propia lámpara. Según la forma del espejo (esférico, elíptico o parabólico) y la posición de la fuente de luz (divergente, paralela o convergente) es muy fácil generar haces de luz (figura 3.2).

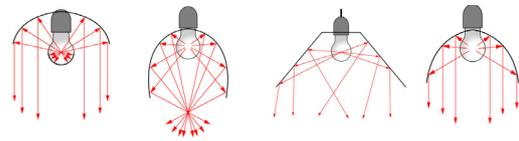


Fig. 3.2 Los espejos de forma distinta generan diferentes haces de luz.

3.1.2 Reflexión difusa

Si la superficie tiene cierta irregularidad se produce un tipo de reflexión distinta y la luz incidente se reflejará en todas direcciones. Este tipo de reflexión se le denomina difusa (figura 3.3).

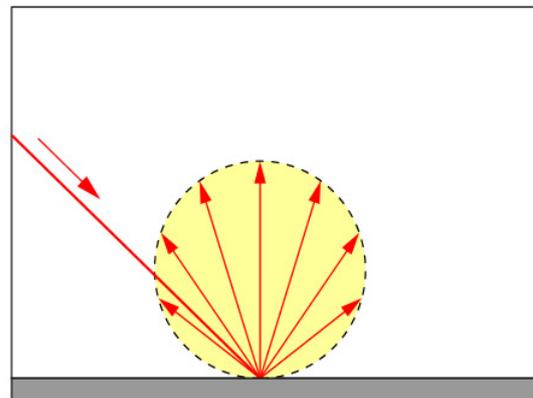


Fig. 3.3 Reflexión difusa.

3.1.3 Reflexión mixta

Existen muchas formas de reflexión mixta entre la especular y la difusa. Una es la reflexión difusa, que es en esencia especular, pero la luz reflejada forma un haz que se difunde (figura 3.4). Un buen ejemplo es la superficie de una carretera húmeda, o una superficie corrugada, amantillada, estampada o deslustrada.

Otra forma es reflexión compuesta, que es una reflexión difusa con una gran componente en la dirección especular. Las superficies con pintura mate, las piedras y la superficie de carreteras secas tienen este tipo de reflexión.

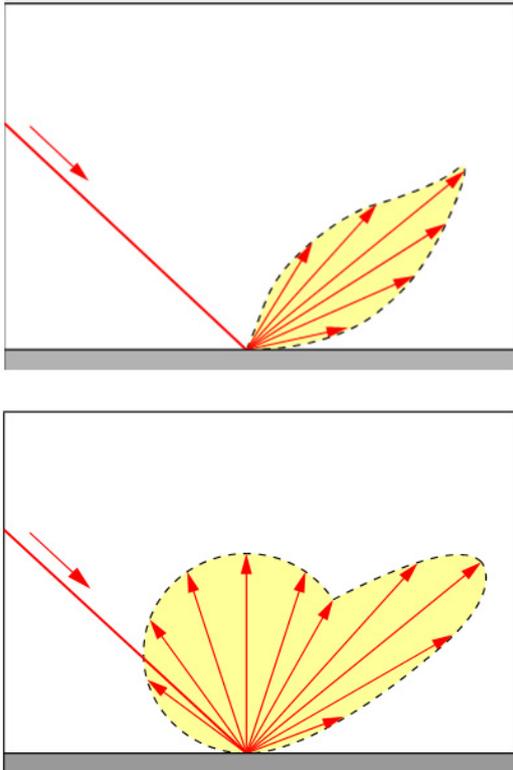


Fig. 3.4 Izquierda: reflexión difusa; derecha: Reflexión compuesta.

3.1.4 Reflexión interna total

Si la luz se desplaza por un medio de mayor densidad óptica que la del medio que lo rodea, por ejemplo en una varilla de vidrio rodeada de aire, se reflejará totalmente desde el límite entre los dos medios siempre que el ángulo de incidencia con respecto al normal supere un cierto valor crítico. Este fenómeno se denomina reflexión interna total (figura 3.5). El valor del ángulo crítico para vidrio y aire es 42° . Si la varilla de vidrio mencionada no tiene curvas pronunciadas, la luz no podrá salir de ella, salvo por los extremos, y se puede transmitir a largas distancias con pequeñas pérdidas debidas a la absorción. Este es el fenómeno que se usa en las fibras de vidrio.

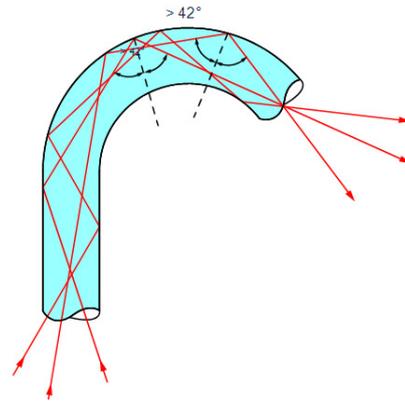


Fig. 3.5 Reflexión interna total en una fibra de vidrio.

3.2 Absorción

La luz que incide sobre una superficie y no se refleja es absorbida o transmitida.

Si el material de la superficie sobre la que incide la luz no es transparente, la luz no reflejada “desaparece” en la superficie y se convierte en otra forma de energía, que al final es calor. El porcentaje de luz que absorbe una superficie depende de su ángulo de incidencia y su longitud de onda. Por ejemplo, una superficie roja refleja la luz roja pero absorbe la mayor parte de los demás colores.

3.3 Transmisión

Si el material sobre el que incide la luz tiene cierta transparencia, parte de la luz pasará a través de él. Es lo que se conoce como transmisión. Algunos materiales, como el agua y el vidrio transparentes, transmiten casi toda la luz que no se refleja. Otros, como una hoja de papel, solo transmiten una pequeña parte de la luz incidente. La proporción de luz transmitida en relación con la luz incidente recibe el nombre de transmitancia. La transmisión depende de la longitud de onda: un material transparente de color rojo solo transmite la parte roja del espectro y el resto se absorbe. Los filtros basados en este efecto se llaman filtros de color de absorción.

3.4 Refracción

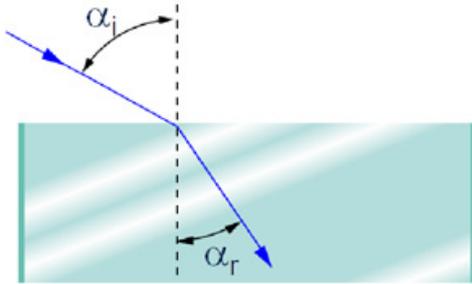


Fig. 3.6 Refracción.

Si un rayo de luz pasa de un medio a otro de distinta densidad con un ángulo que no sea perpendicular al medio, el rayo se quebrará. Este fenómeno se llama refracción y está relacionado con el cambio de velocidad de la luz al pasar de un medio a otro de distinta densidad. Las propiedades refractivas de un medio se expresan mediante el índice de refracción n , que varía con la longitud de onda de la luz incidente: las ondas cortas (por ejemplo la luz azul) se refractan más que las largas (por ejemplo la luz roja).

La refracción, como la reflexión especular, se puede calcular con precisión (figura 3.6).

$$\frac{\sin \alpha_r}{\sin \alpha_i} = \frac{n_1}{n_2}$$

con:

n_1 = índice de refracción del aire (= 1)

n_2 = índice de refracción del vidrio
(vidrio transparente = 1,5)

Esta posibilidad es muy útil en la fabricación de refractores y espejos, que se usan a menudo para dirigir y apantallar la luz en distintos tipos de luminarias.

El efecto de interferencia se puede comparar al efecto de dos ondas en el agua que se juntan y amplifican una a la otra (como cuando se juntan los picos de dos ondas, ondas en fase), o debilitan la una a la otra (como cuando los picos de una onda se juntan a los valles de otra onda, ondas fuera de fase). Lo que sucede con la pompa de jabón es que la luz se refleja en el exterior y el interior de la finísima película de jabón. En la vía de retorno las dos ondas reflejadas se juntan e interactúan: pueden amplificarse, debilitarse o incluso desaparecer. Las ondas desaparecen cuando el grosor de la capa equivale a $\frac{1}{4}$ de la longitud de onda de la luz. La razón es que, entonces, la onda reflejada en el lado interior (parte inferior de la figura 3.7) se ha desplazado una distancia adicional "arriba y abajo" por la anchura de $\frac{1}{4}$ de la capa en relación con la onda reflejada en el lado exterior (parte superior de la figura 3.7). Esto quiere decir que las dos ondas reflejadas están fuera de fase (los picos se juntan a los valles). Las ondas con esta longitud de onda desaparecen y no se reflejan, solo se transmiten por la capa mientras todas las demás longitudes de onda se reflejan.

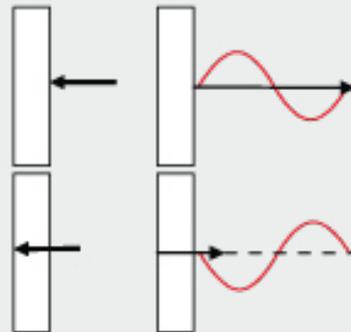


Fig. 3.7 Interferencia en una capa con un grosor de $\frac{1}{4}$ de la longitud de onda de la luz. Para que se vea más claramente, el efecto del reflejo en los lados externo e interno de la capa se dibuja por separado (arriba y abajo, respectivamente), la luz incidente a la izquierda y la luz reflejada a la derecha. La onda reflejada del lado interno es $\frac{1}{2}$ de una longitud de onda fuera de fase, porque se ha desplazado una distancia adicional "arriba y abajo" por la anchura de $\frac{1}{4}$ de la capa. Las dos ondas fuera de fase se cancelan una a la otra.

3.5 Interferencia

La naturaleza de ondas de la luz también puede dar lugar al interesante efecto de interferencia, que se puede ver por ejemplo en la superficie de un CD o el patrón de colores de las pompas de jabón. En la práctica se usa para dividir la luz transmitida y reflejada en luz de distintas longitudes de onda. Para hacerlo se aplican a las superficies revestimientos muy finos ($\frac{1}{4} \lambda$), que se denominan revestimientos dicroicos.



Así es como se fabrica el vidrio anti deslumbramiento de las pantallas de vídeo y las gafas: la luz con longitudes de onda en el intervalo visual se transmite desde la superficie de vidrio recubierta, pero no se refleja. El efecto de interferencia también se usa para fabricar filtros de color de calidad. Estos filtros de interferencia, o dicroicos, son más precisos que los filtros normales de absorción de color y no se calientan, porque no se produce absorción de luz en el vidrio. Las capas de interferencia o dicroicas se utilizan también para dividir la radiación en la parte de infrarrojos (calor), que se refleja, y la parte visible, que se transmite. Esta tecnología se usa en las lámparas halógenas de haz frío y las lámparas de sodio de baja presión.

4 Magnitudes y unidades

4.1 ¿Por qué se usan unidades especiales?

En iluminación se ha adoptado un conjunto de conceptos y medidas que no tienen relación directa con los utilizados en otros campos de la física. La principal razón para ello es que las unidades de iluminación tienen que tener en cuenta el contenido de energía de la radiación y la sensibilidad del ojo humano a dicha radiación.

4.2 La sensibilidad espectral del ojo y las unidades de luz

En varias de las secciones anteriores hemos visto que puede haber luz natural y artificial con distintas longitudes de onda. Dentro del intervalo visible del espectro electromagnético, la sensibilidad del ojo varía mucho en función de las distintas longitudes de onda del mismo contenido energético. Por ejemplo, con niveles de luz diurna el ojo es unas 20 veces más sensible a luz con una longitud de onda de 555 nm (amarillo-verde) que a longitudes de onda de 700 nm (rojo oscuro) o 450 nm (violeta-azul). Ya en 1924, la Comisión Internacional de la Iluminación (CIE) definió una curva de sensibilidad del ojo estándar. En esta curva, denominada curva $V(\lambda)$, la sensibilidad relativa del ojo se considera una función de la longitud de onda. (figura 4.1).

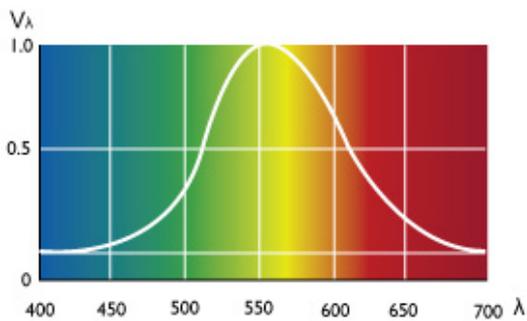


Fig. 4.1 Curva estándar de la sensibilidad espectral del ojo para visión fotópica $V(\lambda)$, según la CIE.

En todas las unidades de luz, el contenido energético de la radiación se compara con la sensibilidad espectral del ojo $V(\lambda)$. Dicho de otro modo, todas las unidades de luz tienen en cuenta el contenido energético de la radiación y la sensibilidad del ojo a las longitudes de onda contenidas en dicha radiación.

4.3 Magnitudes y unidades fotométricas

4.3.1 Flujo luminoso

El flujo luminoso (Φ) es la cantidad de luz que irradia una fuente de luz por segundo. La unidad del flujo luminoso es el *lumen (lm)* y su símbolo es Φ .

El flujo luminoso se usa para especificar la cantidad total de luz emitida por una lámpara, pero no especifica en qué direcciones se irradia la luz (figura 4.2).

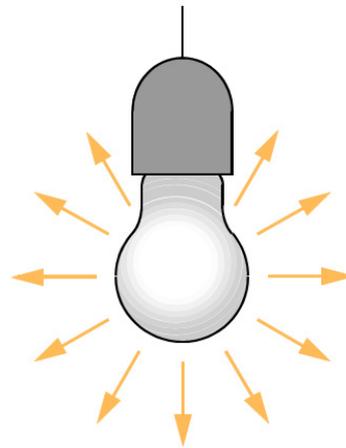


Fig. 4.2 Flujo luminoso: cantidad total de luz emitida.

Haga clic en la imagen para reproducir la animación...



Se incluye a menudo en las especificaciones de las lámparas en catálogos, hojas informativas y el embalaje de la lámpara. Por acuerdo internacional (norma IEC), el flujo luminoso (lúmenes de la lámpara) se mide bajo condiciones de funcionamiento especificadas de laboratorio.

La relación entre el flujo luminoso de una lámpara y la energía que se disipa en dicha lámpara es su 'eficacia luminosa' y se expresa en lúmenes por vatio (**lm/W**). Es la medida de la eficiencia energética de la producción de luz y sus valores pueden ser de en torno 10 lm/W en el caso de una lámpara incandescente, 100 lm/W en el caso de un tubo fluorescente y 175 lm/W en el caso de una lámpara de sodio de baja presión.

4.3.2 Intensidad luminosa

La intensidad luminosa **I** es la cantidad de luz emitida por segundo en una dirección determinada. La unidad es la candela (**cd**).



Así, la intensidad es una unidad de luz que se puede usar para especificar la cantidad, o concentración, de luz en una dirección determinada. La intensidad luminosa se define como el flujo luminoso en una dirección determinada, irradiada por unidad de ángulo sólido ω (figura 4.3)

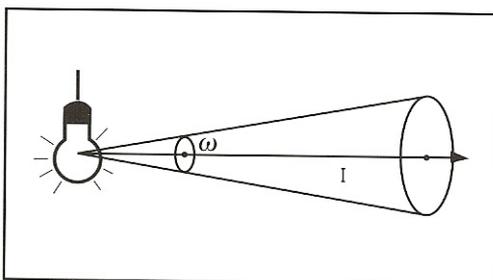


Fig. 4.3 Ángulo sólido ω e intensidad **I**. Un ángulo sólido se puede describir como el ángulo de apertura de un cono. La intensidad es el flujo lumínico que hay en un cono infinitamente pequeño dividido por el ángulo sólido del cono.

4.3.3 Iluminancia

La iluminancia **E** es la cantidad de luz, o flujo luminoso ϕ , que cae sobre una superficie (figura 4.4). La unidad es el **lux**, que equivale a un lumen de luz incidente por metro cuadrado de la superficie que recibe la luz.

$$E = \phi / A$$

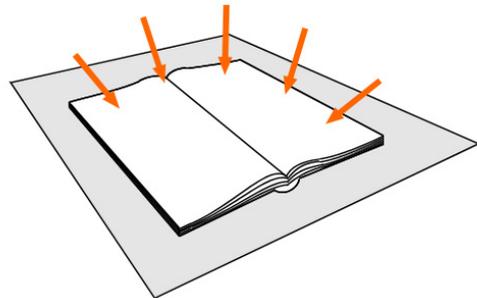


Fig. 4.4 Iluminancia: flujo que incide sobre una superficie.

La iluminancia es independiente de la dirección desde la que el flujo luminoso incide sobre la superficie. La tabla 4.1 contiene diversos valores típicos de iluminancia.

Valores de iluminancia [lux] típicos		
Día soleado de verano		100.000 lux
Cielo cubierto		5.000 lux
Una oficina iluminada		750 lux
Una habitación de hotel		100 lux
Noche de luna llena		0,25 lux

Tabla 4.1 Valores de iluminancia típicos en distintas condiciones.

4.3.4 Luminancia

La luminancia L de un objeto o superficie que emite luz es la intensidad luminosa I emitida por unidad de área (aparente) de esa superficie A_a en una dirección determinada (figura 4.5). La unidad es candela por metro cuadrado (cd/m^2).

$$L = I / A_a$$

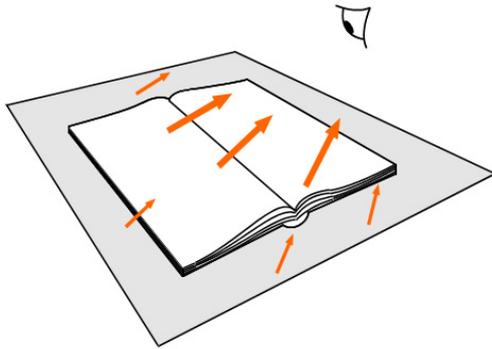
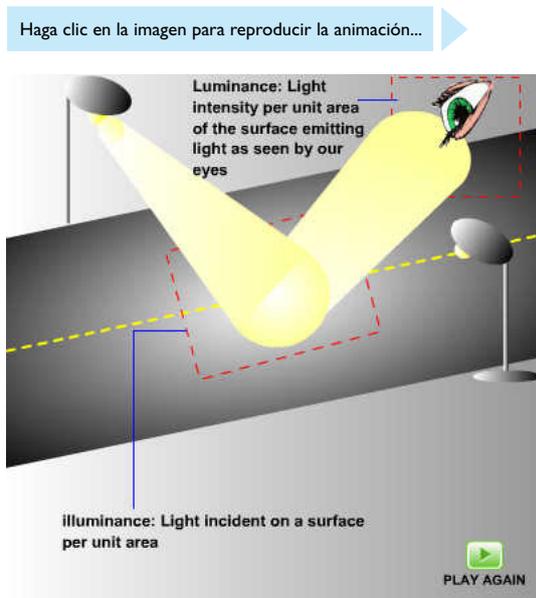


Fig. 4.5 Luminancia: intensidad emitida desde una superficie por unidad de área.



La superficie puede ser la parte emisora de luz de una lámpara o luminaria, pero también puede ser una superficie desde la que se refleja luz. En este último caso se habla de fuentes de luz secundarias, por ejemplo un libro o las paredes en una habitación iluminada, o la superficie de una calle iluminada por la instalación correspondiente. Por lo general, nos interesa la luminancia en la dirección de un observador que mira hacia la superficie emisora de luz. Lo que percibimos de superficies iluminadas como libros, paredes o carreteras no es la luz que incide sobre ellas, sino la luz que se refleja desde ellas. Dicho de otro modo, lo que “vemos” no son iluminancias sino luminancias o, más exactamente, variaciones de luminancia en el campo de visión. En consecuencia, es la magnitud más importante en la ingeniería de iluminación, si bien las otras tres (flujo luminoso, intensidad luminosa e iluminancia) suelen ser más fáciles de manejar al realizar cálculos o mediciones.

La tabla 4.2 contiene diversos valores típicos de luminancia.

luminancia [cd/m^2] Valores típicos		
Superficie del sol		1650 Mcd/ m^2
Filamento incandescente		7 000 000 cd/m^2
Cielo cubierto		2000/8000 kcd/ m^2
fluorescente		5000-15000 cd/m^2
Mesa despacho		100 cd/m^2
Calzada (calle)		0.5-2.0 cd/m^2

Área aparente

Se entiende por área aparente la proyección de cualquier área de la superficie en cuestión sobre un plano situado en ángulo recto a la dirección de visión (figura 4.6)

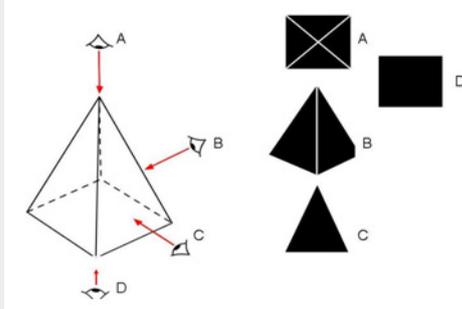


Fig. 4.6 Valores de luminancia típicos en distintas condiciones.

En la figura 1.35 se puede ver que incluso para una superficie de radiación homogénea (intensidades iguales en todas las direcciones), la luminancia depende en gran medida de la dirección de observación. Para una dirección determinada, la intensidad luminosa y el área aparente son independientes de la distancia de observación, de forma que, con un cielo despejado, la luminancia también independiente de la distancia.

Luminosidad

Las luminancias de las superficies emisoras de luz dan la sensación de luminosidad si miramos hacia ellas. La luminancia es una medida objetiva y la luminosidad es una evaluación subjetiva del observador. Esa evaluación subjetiva depende en gran medida de la luminancia de la superficie y de otros factores como la distribución general de la luminancia en el campo de visión. Dos superficies con la misma luminancia pueden dar distintas impresiones de luminosidad. El cuadrado gris de la figura 4.7 parece más oscuro sobre el fondo blanco que sobre el fondo negro, aunque las luminancias son iguales.

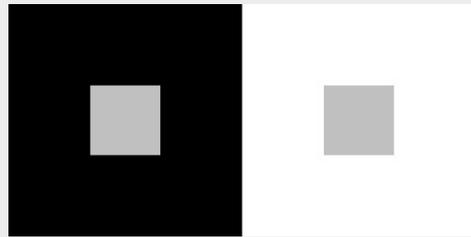
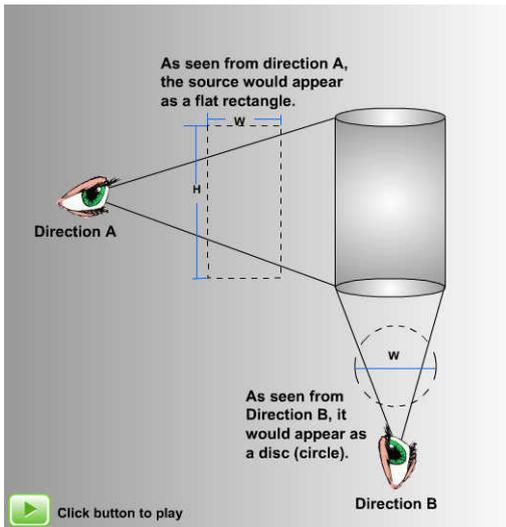


Fig. 4.7 El mismo tono de gris se percibe de forma distinta sobre fondos distintos.

Haga clic en la imagen para reproducir la animación...



4.4 Relaciones prácticas entre cantidades de luz

4.4.1 Flujo luminoso e iluminancia media

La iluminancia media E_{med} sobre una superficie es igual al flujo luminoso (Φ_{inc}) que incide sobre la superficie dividido por el área (A) de la superficie (figura 4.8). Entonces:

$$E_{av} = \frac{\Phi_{inc}}{A}$$

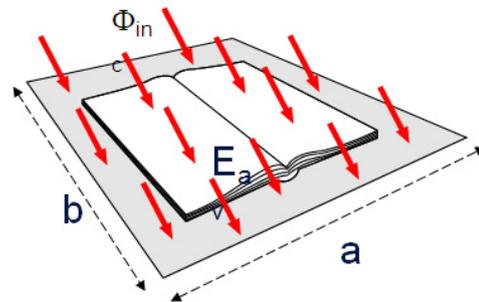


Fig. 4.8 Relación entre la iluminancia media E_{med} y el flujo luminoso incidente Φ_{inc} sobre una superficie con el área A ($a \times b$).

Si un flujo luminoso de 10.000 lm incide sobre una superficie con un área de 12 m², la iluminancia media será 10.000/12 = 833 lux

4.4.2 Intensidad luminosa e iluminancia

Ley de la inversa del cuadrado

La iluminancia sobre un punto de un plano perpendicular a la dirección de la incidencia de la luz equivale a la intensidad luminosa en la dirección del punto dividida por el cuadrado de la distancia entre la fuente de luz (puntual) y el punto en cuestión (figura 4.9). Si llamamos a la distancia, se utiliza esta fórmula:

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

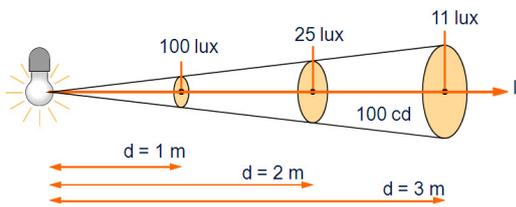
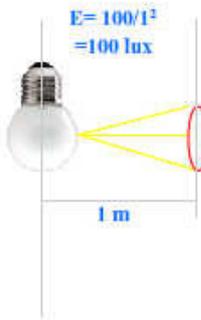


Fig. 4.9 Ley de la inversa del cuadrado.

Haga clic en la imagen para reproducir la animación...



Haga clic en la imagen para reproducir la animación...



Por ejemplo, si una fuente de luz puntual emite una intensidad luminosa de 1.200 cd en dirección perpendicular a una superficie a una distancia de 3 metros, la iluminancia E en el punto en que la luz toca la superficie será 1.200 / 3² = 133 lux. Si la superficie está a una distancia de 6 metros de la fuente de luz, la iluminancia será: 1.200 / 6² = 33 lux.

Esta relación, que se conoce como 'ley de la inversa del cuadrado', es muy importante en iluminación y solo se puede aplicar a fuentes puntuales.

Ley del coseno

La iluminancia sobre un punto de un plano no perpendicular a la dirección de la incidencia de la luz equivale a la intensidad luminosa en la dirección del punto dividida por el cuadrado de la distancia entre la fuente de luz y el punto en cuestión, multiplicado por el coseno del ángulo que forma la dirección de la luz incidente con la normal (perpendicular) al plano (figura 4.10).

$$E_p = \frac{I}{d^2} \cos \beta$$

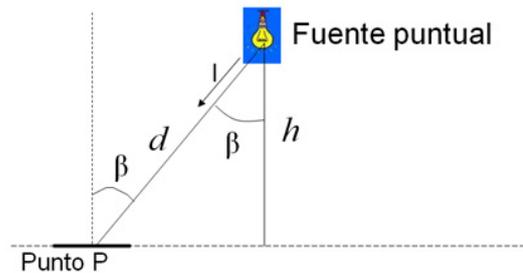


Fig. 4.10 Iluminancia en un punto P.

Es denominada ley del coseno. Por ejemplo, si una fuente de luz puntual emite una intensidad luminosa de 1.200 cd en la dirección de un punto sobre una superficie a 3 metros de distancia y la luz llega la superficie con un ángulo de 60° respecto a la normal de la superficie, la iluminancia (E_p) en ese punto será igual a:

$$(1.200 / 3^2) \times \cos 60^\circ = 67 \text{ lux.}$$

Iluminancia horizontal

En el caso de superficies horizontales, es probable que sea más práctico modificar la fórmula anterior sustituyendo la distancia (d) entre la fuente de luz y el punto de cálculo por la altura vertical (h) de la fuente de luz sobre la superficie (figura 4.11). En cada punto de la superficie horizontal la distancia d es distinta, mientras que la “altura de montaje” h es la misma.

El resultado se conoce como iluminancia horizontal en el punto y la fórmula cambia a:

$$E_{hor} = \frac{I}{h^2} \cos^3 \gamma$$

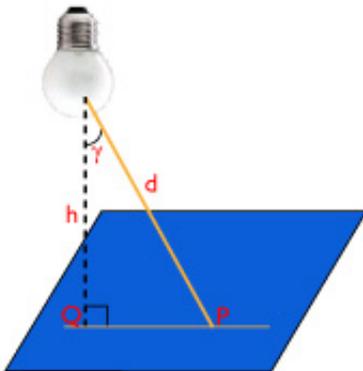


Fig. 4.11 Iluminancia horizontal en el punto P.

El concepto de iluminancia horizontal se suele usar como medida de la cantidad de luz en el “plano de trabajo”, por ejemplo en una oficina (la zona de la mesa) o una instalación deportiva (el campo de juego).

Iluminancia vertical

Si giramos el sistema de la iluminancia horizontal en 90° obtenemos la iluminancia en una superficie vertical (figura 4.12). Entonces:

$$E_{vert} = \frac{I}{d^2} \cos \gamma$$

Es lo que se denomina iluminancia vertical en un punto. Por razones prácticas, la fórmula se suele modificar para cambiar el ángulo entre el ángulo de incidencia de la luz y el normal a la superficie vertical, el ángulo vertical entre la dirección del ángulo de incidencia y el normal a la superficie horizontal, y el ángulo horizontal que indica la orientación de la superficie vertical respecto al plano de la incidencia de la luz (figura 4.13). Entonces:

$$E_{vert} = \frac{I}{h^2} \sin \alpha \cos^2 \alpha \cos \beta$$

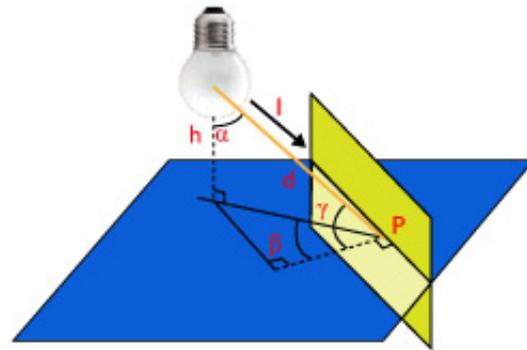
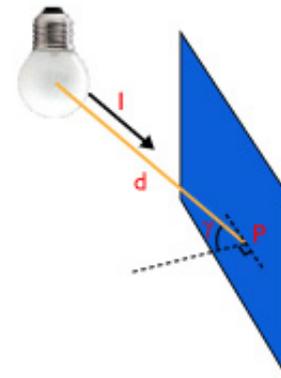


Fig. 4.12 a y b Iluminancia vertical en el punto P.

Iluminancia cilíndrica media

La iluminancia cilíndrica media sobre un cilindro infinitamente pequeño (figura 4.14) se puede expresar como:

$$E_{cyl,av} = \frac{I}{\pi h} \sin \alpha \cos^2 \alpha$$

El concepto de iluminancia cilíndrica media se usa a veces para comprobar si los objetos, personas y paredes de una habitación reciben suficiente luz.

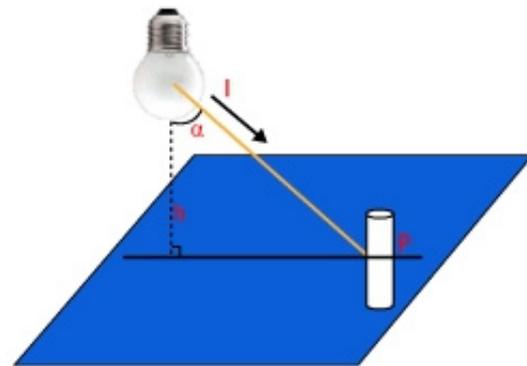


Fig. 4.14. Iluminancia cilíndrica media.

Iluminancia semiesférica y semicilíndrica

La iluminancia sobre la superficie curvada de una semiesfera infinitamente pequeña (figura 4.15) se puede expresar como:

$$E_{\text{hemisfere}} = \frac{I}{4h^2} \cos^2 \gamma (1 + \cos \gamma)$$

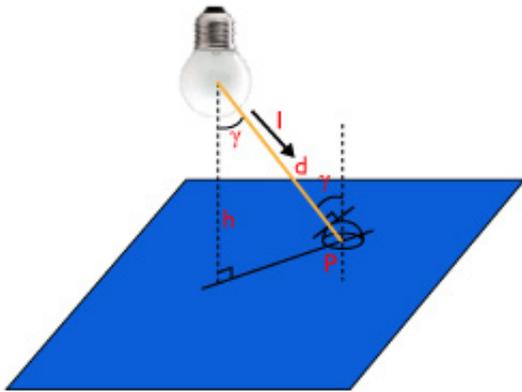


Fig. 4.15 Iluminancia semiesférica.

La iluminancia sobre la superficie curvada de un semicilindro vertical infinitamente pequeño se puede expresar como (figura 4.16):

$$E_{\text{semicyl}} = \frac{I}{\pi h} \sin \alpha \cos^2 \alpha (1 + \cos \beta)$$

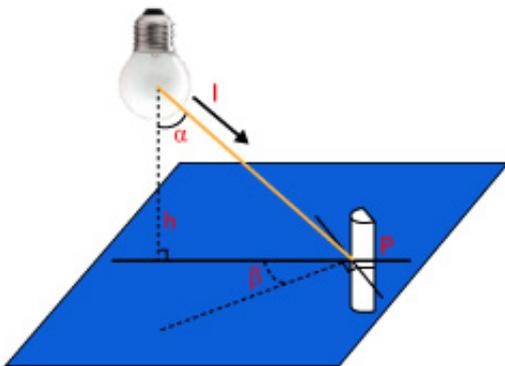


Fig. 4.16 Iluminancia semicilíndrica.

Los conceptos de iluminancia semiesférica y semicilíndrica son importantes en la iluminación de calles y zonas residenciales, donde la iluminancia sobre superficies no planas como el rostro humano ayuda al reconocimiento facial.

4.4.3 Iluminancia y luminancia

En el caso de una superficie reflectora de luz, la intensidad luminosa que la superficie emite suele ser desconocida, pero a menudo se sabe cuál es la iluminancia sobre la superficie. Baste pensar, por ejemplo, en la superficie de una carretera iluminada por una instalación de alumbrado público o en un campo de hierba iluminado por proyección de luz. En el caso de superficies perfectamente difusoras, existe una relación entre la iluminancia (E) sobre la superficie, la superficie reflectante (p) y la luminancia L de la superficie (figura 4.17):

$$L = \frac{p \cdot E}{\pi}$$

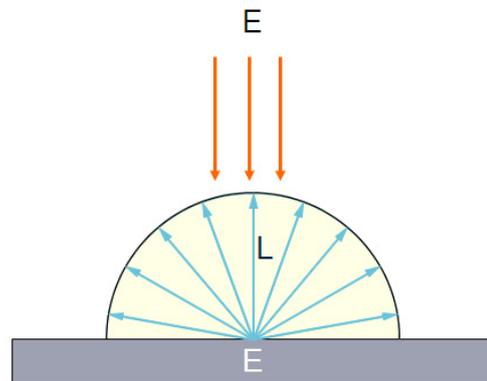


Fig. 4.17 Relación entre la iluminancia y la luminancia de una superficie reflectante difusa.

Por ejemplo, si una hoja de papel mate se ilumina con un nivel de iluminancia de 500 lux y la reflectancia del papel es 0,7 (70%), la luminancia de la hoja de papel en todas las direcciones es

$$500 \times 0,7 / \pi = 111 \text{ cd/m}^2$$

La fórmula no es válida para superficies especulares o superficies que tengan reflexiones mixtas (véase la sección 3.1.3), como las superficies de las carreteras, cuando se observan en la dirección de la componente especular.

4.4.4 Flujo luminoso e intensidad luminosa

La intensidad luminosa I en cualquier dirección de una fuente de luz cuya distribución de luz sea uniforme en todas las direcciones equivale al flujo luminoso dividido por 4π .

$$I = \frac{\Phi}{4\pi}$$

Por ejemplo, una lámpara incandescente de 1.000 lúmenes alojada en una luminaria de globo de vidrio opal con una transmitancia de 0,9 tendrá en todas las direcciones la intensidad lumínica de $1.000 \times 0,9 / 4\pi = 72 \text{ cd}$.

Esta ecuación tiene un interés práctico limitado, ya que solo es válida para fuentes de luz que irradian la misma intensidad luminosa en todas las direcciones.

4.5 Medición de cantidades de luz

Todos los medidores de luz disponen de una fotocélula que genera una pequeña corriente eléctrica o cambia una corriente eléctrica cuando la luz incide en su superficie (figura 4.18). En la actualidad, las células fotovoltaicas fabricadas con materiales semiconductores se usan sobre todo para realizar mediciones de luz.

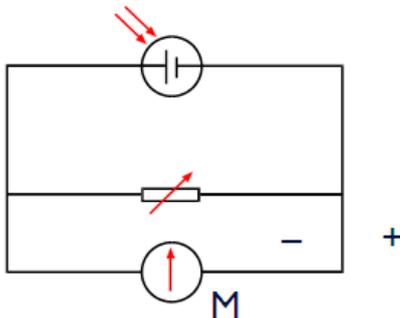


Fig. 4.18 Principio de una fotocélula.

En esencia, todas las mediciones de luz son mediciones de iluminancia: se mide la cantidad de luz incidente sobre la fotocélula. Si se necesita otra cantidad, como el flujo luminoso, la intensidad o la luminancia, la iluminancia medida por la fotocélula se convierte a la medición necesaria mediante las relaciones descritas en la sección anterior.

Las respuestas de casi todas las fotocélulas a las distintas longitudes de onda del espectro es bastante distinta a la sensibilidad estandarizada del ojo $V(\lambda)$, en la que se basan las cantidades de iluminación. El fabricante del aparato de medida corrige la sensibilidad de color de la célula aplicando muchas capas de distintos filtros de color. Cuantos más filtros se usen, el aparato será más preciso y tendrá un precio más elevado.

4.5.1 Iluminancia

En la fotografía de la figura 4.19 se ve un típico luxómetro utilizado normalmente para medir la iluminancia sobre el terreno y comprobar la calidad de instalaciones de iluminación.



Fig. 4.19 Ejemplo de luxómetro.

4.5.2 Intensidad luminosa

La mayoría de las mediciones de intensidad luminosa se realizan en los laboratorios de fabricantes de luminarias con objeto de conocer las características de intensidad luminosa, o distribución de luz, de una combinación concreta de lámpara y luminaria. La medición se realiza midiendo la iluminancia sobre la fotocélula en distintas direcciones en torno a la luminaria. Para este trabajo se utilizan goniofotómetros (figura 4.20), en los que la luminaria o un sistema de espejos (o ambas cosas) van girando con respecto a una fotocélula estacionaria.

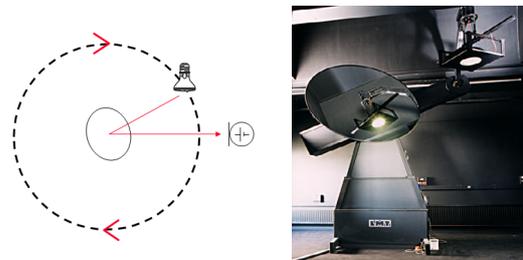
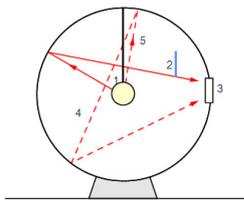
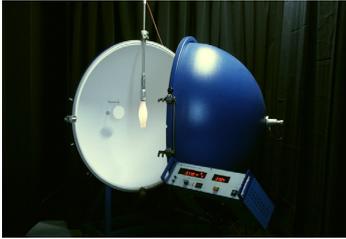


Fig. 4.20 Ejemplo de goniofotómetro utilizado para medir la distribución de luz.

4.5.3 Flujo luminoso

El flujo luminoso de una lámpara se suele medir en el fotómetro conocido como “esfera de Ulbricht” (figura 4.21). La lámpara que se va a medir se cuelga en el centro de una gran esfera hueca pintada en blanco mate para que la difusión sea perfecta. Como consecuencia del efecto de difusión uniforme, la iluminancia sobre cualquier parte de la superficie interna de la esfera es proporcional flujo luminoso total de la lámpara. Se pone una fotocélula en un pequeño agujero de la pared de la esfera para medir esa iluminancia y poder calcular el flujo luminoso a partir de ella. Por lo general, el cálculo de la medición es automático.



1. fuente
2. pantalla opaca
3. fotocélula
4. rayo reflejado (una vez)
5. rayo reflejado (dos veces)

Fig. 4.21 Esfera de Ulbricht utilizada en la medición del flujo lumínico.

4.5.4 Luminancia

Si la imagen de la superficie cuya luminancia se va a medir se proyecta en la superficie de una fotocélula, la lectura de la iluminancia medida es proporcional a la luminancia de la superficie en la dirección de medición. Por lo tanto, un medidor de luminancia consta de una fotocélula y un sistema óptico que proyecta en la superficie de la célula una imagen del área que se va a medir (figura 4.22). El circuito de medición se calibra de forma que proporcione los valores de luminancia en cd/m^2 .



Fig. 4.22 Ejemplo de un luminancímetro de mano.

5 Luz y visión

El efecto fundamental de la luz es que nos permite ver el mundo que nos rodea, gracias a un órgano extremadamente delicado, el ojo humano. El papel que juega la luz en nuestro contacto con el entorno es importantísimo: más del 80 por ciento de la información que recibimos del mundo exterior “pasa por nuestros ojos”. Existe una relación muy estrecha entre cómo se nos presenta la realidad visual y capacidad del ojo de realizar su trabajo correctamente. La realidad visual se crea de una manera que tiene mucho que ver con la iluminación. Para comprender los distintos criterios sobre la iluminación, y su relación con el rendimiento visual y el confort visual, es necesario comprender el funcionamiento del ojo humano.

5.1 El proceso visual y el ojo

El ojo humano es más o menos esférico y tiene un diámetro de 25 milímetros (figura 5.1). Seis músculos de posición le permiten girar en cualquier dirección. Nuestros ojos funcionan de forma parecida a una cámara tradicional con una lente que proyecta una imagen invertida de la escena en una película interna sensible a la luz. En el ojo, la función de la película corresponde a la retina, formada por terminaciones nerviosas sensibles a la luz. En la retina, la luz se transforma mediante un proceso fotoquímico en una corriente eléctrica y se transmite a través de los nervios al cerebro, que la interpreta como información visual. El iris se puede abrir o cerrar, como el diafragma de una cámara, para controlar la cantidad de luz que entra en el ojo. La abertura del centro del iris es la pupila. Cuando en el ojo incide mayor cantidad de luz, la pupila se hace más pequeña y, una vez más como en una cámara, la profundidad del enfoque (distancia a la que podemos ver con nitidez) aumenta. Esta mejor profundidad del enfoque es una de las ventajas de tener más luz.

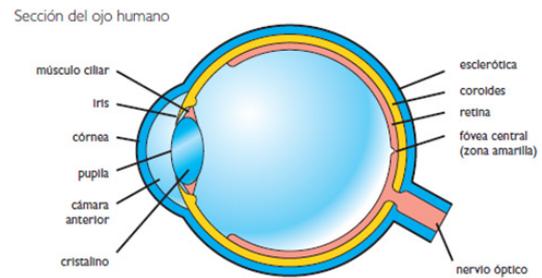
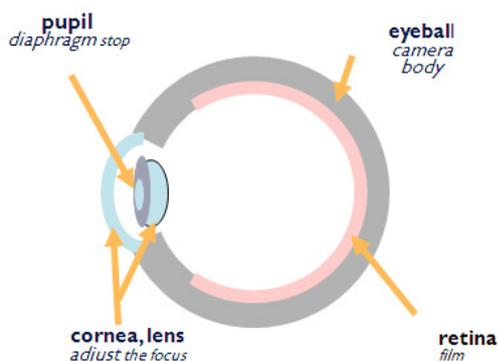
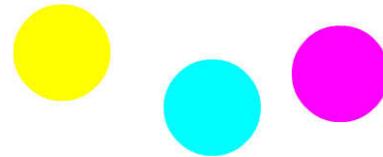


Fig 5.1 Secciones del ojo humano.

Haga clic en la imagen para reproducir la animación...



La retina es el comienzo del sistema nervioso que lleva al cerebro; está formada por más de cien millones de terminaciones nerviosas de dos tipos sensibles a la luz, que por su forma se llaman conos y bastones (figura 5.2). El número de bastones es entre 10 y 15 veces superior al de los conos. Los bastones están distribuidos de forma bastante homogénea por la retina, excepto en el centro del eje visual, denominado fovea, donde no hay ninguno. Los conos, por su parte, se concentran en la fovea y están muy poco presentes en las demás partes de la retina. Los conos y bastones se conectan con el cerebro mediante las células ganglionares y fibras nerviosas.

Las propiedades únicas del ojo, sensible a un enorme intervalo de niveles de iluminación en el rango entre 1 a 10 millones y la capacidad de distinguir 100.000 tonos de color, se logran mediante la “división del trabajo” entre los altamente especializados conos y bastones. Los bastones son muy sensibles a la luz y se ocupan sobre todo de la detección de formas y movimiento en general, pero no distinguen los colores. Los conos por su parte son menos sensibles a la luz, pero distinguen los colores y nos permiten ver los detalles.

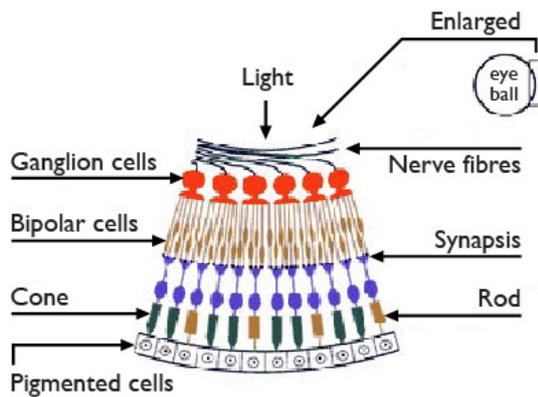


Fig. 5.2 Sección de la retina del ojo

A principios de este siglo se descubrió que en torno al 1 por ciento de las células ganglionares también son sensibles a la luz. Participan en los efectos biológicos no visuales de la luz y, por lo tanto, son importantes en ciertos aspectos de la iluminación y la salud (véase el capítulo 7).

5.1.1 Bastones y visión escotópica

Con niveles de iluminación muy bajos, de menos de $0,01 \text{ cd/m}^2$ (por debajo de la luz proporcionada por la luna llena), la sensibilidad de los conos es tan reducida que no pueden funcionar. En ese caso, la visión se obtiene exclusivamente a través de los bastones y se denomina visión escotópica. Grupos de varios centenares de bastones se conectan a una misma fibra nerviosa que se dirige al cerebro; de esta forma, se unen los estímulos de muchos bastones y dichos grupos son extremadamente sensibles a la luz. La formación de estos grupos hace que no se conozca la posición exacta de procedencia de la luz. Cuando la visión procede solo de los bastones obtenemos imágenes bastante borrosas.

Como ya se ha mencionado, no hay bastones en la fovea, el punto en torno al centro del eje visual que coincide con la dirección de la visión. La mayor concentración de bastones se da a unos 15° de distancia de la dirección de la visión, por lo que la visión escotópica es periférica, alejada del eje. Si bien los colores no se distinguen con los bastones, su sensibilidad hacia los distintos colores espectrales cambia: la sensibilidad máxima se observa a una longitud de onda de 507 nm (azul-verde) y se reduce acusadamente hacia el extremo rojo del espectro (figura 5.3, curva en rojo).

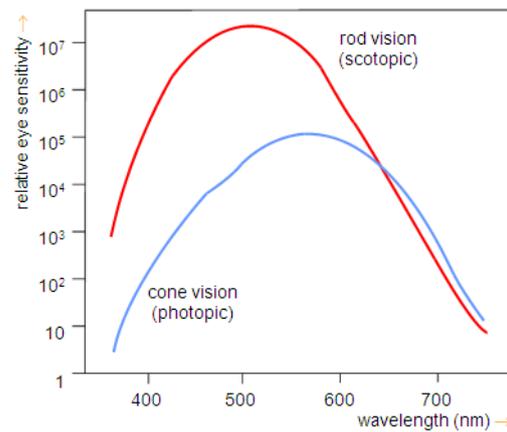


Fig. 5.3 Curvas de sensibilidad espectral de los conos (azul) y los bastones (rojo)

5.1.2 Conos y visión fotópica

Los conos se ocupan por sí solos de la visión a niveles de iluminación por encima de unos 3 cd/m^2 (luminosidad algo superior a la de una autopista iluminada). Es lo que se conoce como visión fotópica. A diferencia de los bastones, cada uno de los conos se conecta al cerebro mediante una única fibra nerviosa. La agudeza visual o capacidad de precisión de la visión de los conos es muy superior a la visión de los bastones, es decir, vemos imágenes muy nítidas. Los conos se concentran en la fovea, punto en torno al centro del eje visual que coincide con la dirección de la visión y su presencia es escasa en las demás partes de la retina. Por ello, la visión fotópica es en esencia una visión central y un campo de apertura de dos grados. Las escenas más grandes se ven como una imagen completa mediante la exploración continua e inconsciente y el movimiento muy rápido de los ojos.

La sensibilidad de los conos es muy inferior a la de los bastones, precisamente lo que se necesita a niveles elevados de iluminación. La curva de sensibilidad espectral global de los conos es distinta a la de los bastones. El punto de la máxima sensibilidad está en 555 nm (verde-amarillo) y su reducción hacia el lado rojo del espectro es menos pronunciada (figura 5.3, curva en azul).

Los conos nos permiten distinguir los colores, algo posible porque, de hecho, hay tres tipos de conos con pigmentos sensibles a las partes roja, verde y azul del espectro, respectivamente (figura 5.4). Las personas que carecen de un tipo de cono son, parcialmente daltónicas. En casos muy poco frecuentes solo funciona un tipo de cono y las personas con este defecto son daltónicas.

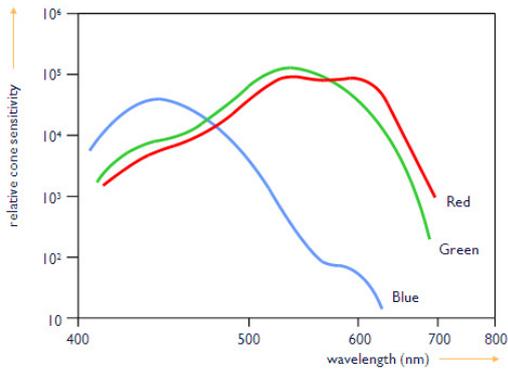


Fig. 5.4 Curvas de sensibilidad espectral de los tres receptores de color de los conos

5.1.3 Curvas de sensibilidad espectral del ojo estandarizadas

El cambio de sensibilidad espectral entre los conos y bastones se aprecia mejor si las curvas se dibujan en relación con su sensibilidad máxima (véase la figura 5.5).

La Comisión Internacional de la Iluminación (CIE) normalizó la curva fotópica $V(\lambda)$ ya en 1924 y la curva escotópica $V'(\lambda)$ en 1951. La curva fotópica resulta del efecto combinado de los tres tipos de conos y se toma como base para todas las unidades fotométricas, como el lumen, la candela y el lux.

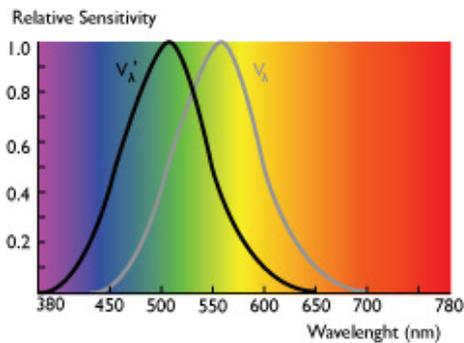


Fig. 5.5 Curvas de sensibilidad espectral relativa de la visión fotópica $V(\lambda)$ y escotópica $V'(\lambda)$ definidas por la CIE.

5.1.4 Visión mesópica

A niveles de iluminación intermedios con relación a los niveles escotópico y fotópico (aproximadamente entre $0,01 \text{ cd/m}^2$ y 3 cd/m^2) están activos tanto los conos como los bastones. La transición de niveles de iluminación altos a bajos hace que los conos tengan menos importancia. La sensibilidad espectral global cambia gradualmente de $V(\lambda)$ a $V'(\lambda)$, es decir, hacia longitudes de onda cortas (azul). Este efecto dependiente de la adaptación se conoce como “efecto Purkinje”. La visión aguda centrada en el eje se va alejando del eje, se hace menos aguda y periférica, y la visión del color desaparece poco a poco.

Haga clic en la imagen para reproducir la animación...



5.1.5 Mecanismos de ajuste del ojo

Acomodación

El enfoque a distintas distancias no se logra alterando la distancia entre la lente y la retina, como en las cámaras, si no cambiando el poder de refracción (longitud focal) de la lente. Los músculos pueden contraer la lente del ojo para hacerla más convexa y acortar la distancia focal. Este proceso se denomina acomodación (figura 5.6).

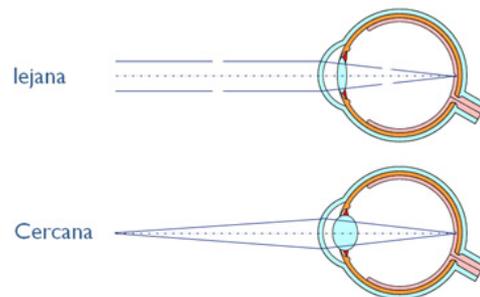
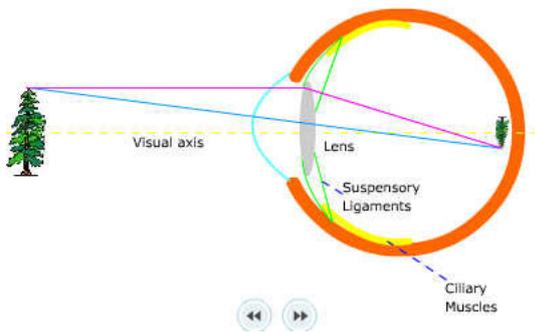


Fig. 5.6 Acomodación mediante el cambio del poder de refracción de la lente del ojo.

Haga clic en la imagen para reproducir la animación...

Click on the buttons below to move the tree either away from or closer to the eye and see how our eye accommodates the different distances.



El proceso de ajuste tiene lugar de forma inconsciente y la velocidad del ajuste depende de la luminosidad de la escena general y el grado de cansancio del sujeto. Además, la capacidad de acomodación cambia mucho con la edad. Por ejemplo, los niños pueden ver con nitidez en distancias de menos de 10 cm, mientras que la mayoría de los adultos que pasan de los 50 años necesitan ayuda, las gafas de cerca, para ver claramente a menos de 30 cm. Como ya se ha dicho, el tamaño de la pupila es menor cuanto mayor es el grado de luminosidad y, en consecuencia, es mayor la distancia de enfoque o distancia de visión nítida. Esta es una de las causas por las que las personas mayores necesitan más luz.

Adaptación

La adaptación es el mecanismo utilizado por el ojo para cambiar su sensibilidad a la luz y consta de tres procesos: cambio del tamaño de la pupila (entre 2 y 8 mm), cambio del sistema neural de la retina y el nervio óptico, y sobre todo, cambio de la composición química de los pigmentos sensibles a la luz de conos y bastones.

La adaptación de la oscuridad a la luz suele tomar menos de un minuto, pero la adaptación de la luz a la oscuridad puede llevar entre 5 y 30 minutos dependiendo de la diferencia de la transición (figura 5.7). Este hecho tiene importancia en la iluminación de túneles, porque durante el día la adaptación del exterior luminoso al interior oscuro del túnel exige mucha luz artificial a su entrada para reducir el tiempo de adaptación.

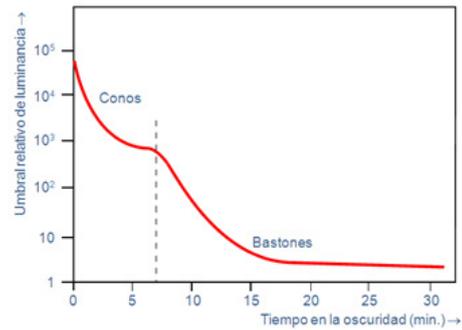


Fig. 5.7 Tiempo de adaptación de la luz a la oscuridad.

Convergencia

Utilizamos los dos ojos para mirar a un único objeto, para lo que giramos los ojos de manera inconsciente. Este fenómeno se llama convergencia. Al mirar a un objeto las líneas de visión de los dos ojos se juntan en el punto de destino y cuanto más cerca esté el objeto, mayor será el giro de los ojos hacia el centro (figura 5.8). La cantidad de giro necesaria es una medida de la distancia del objeto como la percibe el cerebro. Una buena profundidad de visión requiere los dos ojos y los músculos del ojo controlan el giro.

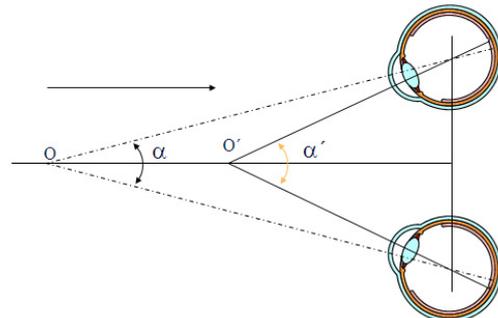
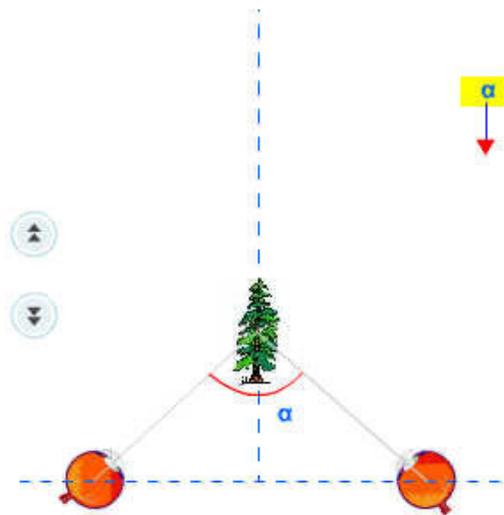


Fig. 5.8 Los distintos ángulos de convergencia para objetos situados a diferentes distancias nos ayudan a percibir la profundidad.

Haga clic en la imagen para reproducir la animación...



E Z O P
E T D O P
E C P L E
F P E D C
P O P T C
Z P C T O F

Fig. 5.9 Gráfico de la prueba de agudeza visual.

5.2 Rendimiento y comodidad visual

Constantemente seleccionamos y procesamos, de forma más o menos inconsciente, la parte de la información visual que nos interesa. En este proceso dependemos en gran medida de nuestra capacidad de ver contrastes y detalles.

La iluminación debe facilitarnos un buen rendimiento visual. En la mayoría de las situaciones, el simple umbral de visibilidad no es suficiente. Necesitamos facilitar el rendimiento, esto exige un nivel superior al umbral de visibilidad para que estemos cómodos en el entorno visual. En consecuencia, la iluminación debe proporcionar buen rendimiento visual y comodidad visual.

5.2.1 Agudeza visual

Agudeza visual es la capacidad de distinguir pequeños detalles (figura 5.9).

La agudeza visual se expresa como el ángulo mínimo al que dos objetos se pueden seguir viendo separados. Los ópticos miden la agudeza visual para determinar las gafas que mejor corrigen un problema de visión determinado.

La agudeza visual depende sobre todo de la calidad de ojo, pero también cambia con la luminosidad ambiental, el contraste de los objetos y la calidad de la iluminación. La agudeza visual se reduce considerablemente con la edad.

5.2.2 Detección de contraste

Casi toda la información visual que recibimos es consecuencia de las diferencias luminosas del campo de visión. El contraste expresa la diferencia de luminancia o color entre zonas contiguas de una escena.

Contraste de luminancia

El contraste de la luminancia se puede expresar de varias formas; la más sencilla es la relación de luminancia que resulta de la diferencia de reflectancia en la superficie según la ecuación:

$$C = L_{\text{alta}} / L_{\text{baja}}$$

donde C= contraste

L_{alta} = luminancia más alta

L_{baja} = luminancia más baja



Fig. 5.10 Contraste entre las letras oscuras y el papel blanco.

El contraste se usa, por ejemplo, para evaluar la calidad del texto negro o gris impreso sobre el papel blanco de un libro (figura 5.10) o para evaluar la relación de luminosidad entre las paredes y la superficie de la carretera en un túnel iluminado (figura 5.11). Cuando se tiene en cuenta una escena completa es importante diferenciar entre el objeto de interés con su fondo inmediato y la luminancia general de la escena (figura 5.12.)



Fig. 5.11 Contraste entre la superficie de la carretera y las paredes de un túnel.



Fig. 5.12 El contraste entre objetos en muchas ubicaciones distintas puede ser de interés en esta situación visual compleja.

Haga clic en la imagen para reproducir la animación...



Por ello, el concepto que más utilizan los ingenieros de iluminación es el valor de contraste, con la ecuación

$$C = L_o - L_f / L_f$$

donde C= contraste

L_o = luminancia del objeto

L_f = luminancia del fondo

La capacidad del ojo de detectar contrastes de luminancia depende mucho del estado de adaptación del ojo, determinado por la luminancia general de la escena. Dicha capacidad, que también se conoce como sensibilidad de contraste, aumenta con la mayor luminancia de adaptación (figura 5.13).

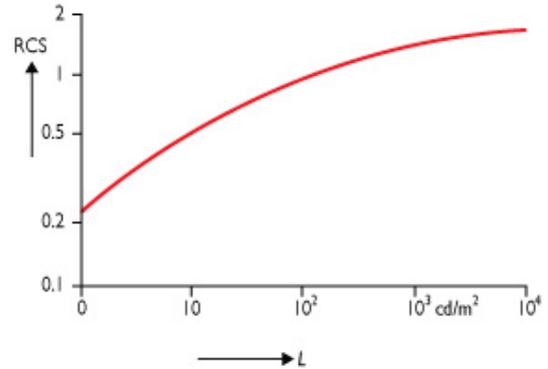


Fig. 5.13 Sensibilidad de contraste relativa, RCS, establecida arbitrariamente como 1 a 100 cd/m², como función de la luminancia de adaptación L.

Esta es una causa importante de que el rendimiento visual aumente normalmente con el aumento del nivel de iluminación general: es más fácil para nuestros ojos detectar contrastes. Con la edad, la sensibilidad de contraste se reduce significativamente, sobre todo en luminancias de adaptación menores, otra razón por la que las personas de edad avanzada necesitan niveles de iluminación más altos. El tamaño del objeto en contraste y el tiempo de observación también son factores que afectan a la detección de contraste. Por lo general, la iluminación se debe diseñar de forma que aumente el contraste de las tareas visuales; con todo, los contrastes excesivos pueden empeorar el rendimiento visual y crear una sensación de malestar, una de las muchas razones por las que se debe evitar una iluminación de muy baja uniformidad.



Fig. 5.14a De izquierda a derecha: 1. Contraste de luminancia: demasiado bajas. 2. Contraste de luminancia: demasiado altas 3. Contraste de luminancia: correctamente equilibrada

El ojo no evalúa los valores de luminancia de la misma forma en todas las situaciones. Si en el campo de visión se producen grandes contrastes de luminancia, se exagerarán las impresiones de luminosidad subjetiva. Una superficie gris sobre un fondo negro parecerá más clara que sobre un fondo blanco (figura 5.14). Estos efectos de gran contraste se usan en ocasiones en el mundo de la publicidad para llamar más la atención.

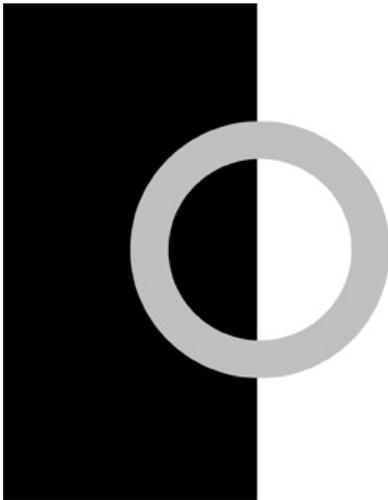


Fig. 5.14b El mismo gris se ve de distinta forma sobre un fondo negro y un fondo blanco.

Contraste de color

Aunque es difícil de cuantificar, se acepta de forma generalizada que los contrastes de color contribuyen a la información visual en menor medida que los contrastes de luminancia. Con todo, pueden ser muy importantes para crear sensaciones agradables. Por ejemplo, una foto en blanco y negro proporciona prácticamente toda la información, pero una foto en color suele ser más atractiva. Por ello, los contrastes de color tienen especial interés para los decoradores de interiores y los diseñadores de iluminación. Determinan en qué medida los efectos de color mejoran o empeoran el resultado global de un ambiente.

Los colores contrastados se afectan mutuamente. Por ejemplo, los círculos rojos y verdes tienen un aspecto de luminosidad distinto sobre el fondo amarillo y sobre el fondo azul (figura 5.15). En los mercados, los carniceros sacan partido de este efecto y exponen la carne sobre hojas de lechuga para que tenga un aspecto rojo y fresco.

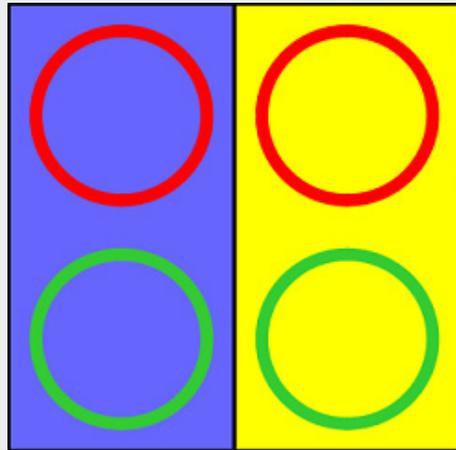
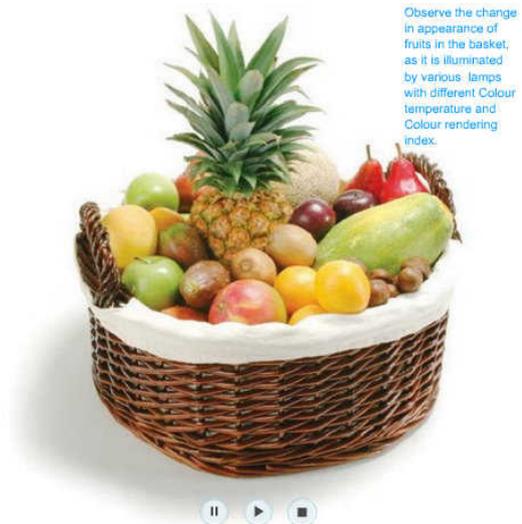


Fig. 5.15 Los círculos tienen una luminosidad aparente distinta según el color del fondo.



Observe the change in appearance of fruits in the basket, as it is illuminated by various lamps with different Colour temperature and Colour rendering index.

5.2.3 Deslumbramiento

Deslumbramiento es la sensación negativa generada por luminancias del campo visual que son mucho mayores que la luminancia a la que están adaptados los ojos y causan molestias, visibilidad reducida o las dos cosas.

El deslumbramiento puede ser de dos tipos: deslumbramiento de incomodidad o deslumbramiento de incapacidad. En ocasiones tienen lugar por separado, pero a menudo se dan simultáneamente. El problema del deslumbramiento es especialmente importante para los ingenieros de iluminación, porque se puede hacer mucho para evitarlo mediante el diseño adecuado de las instalaciones de iluminación.

Incomodidad visual por deslumbramiento

La incomodidad visual por deslumbramiento es una sensación de molestia, incluso dolor, causada por un exceso de luminancias en el campo de visión. Los parámetros físicos que determinan el grado de incomodidad son prácticamente desconocidos. Se pueden usar para predecir si la incomodidad visual por deslumbramiento en distintas situaciones de iluminación será aceptable o no. Los parámetros más importantes son la luminancia de la fuente del deslumbramiento en la dirección del observador, la luminancia de fondo, el tamaño de la fuente del deslumbramiento (cuanto más pequeño sea hay más probabilidades de molestias) y la posición de las fuentes en relación con la dirección de visión.

Incapacidad visual por deslumbramiento

La incapacidad visual por deslumbramiento reduce el rendimiento visual y el exceso de luminancias lleva a la pérdida de visibilidad. La causa más importante, con toda probabilidad, es la dispersión de la luz procedente de la fuente de deslumbramiento en el sistema óptico del ojo (figura 5.16), especialmente en la córnea, la lente y la cámara del ojo, hasta un grado tal que sobre la retina se crea un velo luminoso. Este velo reduce los contrastes perceptibles de la escena visual y dificulta la visibilidad, en un efecto que se puede comparar con el del velo de un traje de novia. La dispersión en el ojo y el valor de la luminancia que crea el velo con pérdida de visibilidad se pueden calcular, de forma que también se puede predecir si el grado de incapacidad visual por deslumbramiento en distintas condiciones de iluminación es aceptable.

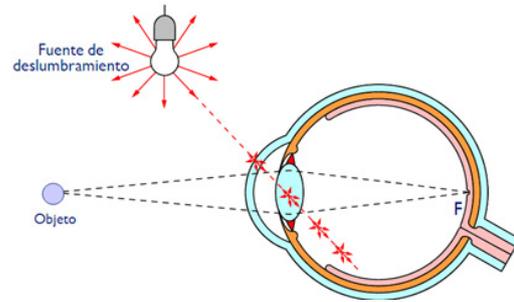


Fig. 5.16 Dispersión en el ojo de la luz procedente de una fuente de deslumbramiento.

Deslumbramiento superior

Las fuentes de deslumbramiento que se encuentran fuera de nuestro campo de visión, como las que están situadas más o menos por encima de nuestras cabezas, también pueden generar cierto deslumbramiento. Es posible que esto se deba a la luz que se refleja en los ojos desde la nariz o las gafas y crea un velo molesto. Este problema solo sucede con fuentes de luz muy intensas, como el sol. Cuando el sol está prácticamente sobre nuestras cabezas, una gorra puede proporcionar la protección suficiente (figura 5.17). Las luminarias de interiores con un haz estrecho y dirigidas hacia abajo también pueden dar lugar al deslumbramiento superior.



Fig. 5.17 Una gorra ofrece protección contra el deslumbramiento del sol del mediodía.

5.2.4 Rendimiento visual y el envejecimiento

La vista se deteriora con la edad, primero gradualmente y después con mayor rapidez. Las causas principales son la reducción del tamaño de la pupila, la pérdida de transparencia del humor vítreo (sustancia gelatinosa que hay entre el ojo y la retina), y el endurecimiento y amarilleamiento de la lente. El endurecimiento de la lente lleva a la reducción de la capacidad de acomodación, lo que empeora la vista cercana y suele conllevar el uso de gafas de lectura. El amarilleamiento de la lente (catarata) reduce la sensibilidad general, agudeza visual, sensibilidad de contraste y sensibilidad de color (el azul desaparece gradualmente). Además, la ruta nerviosa que conecta el ojo con el cerebro es cada vez menos eficiente. La combinación de todas estas condiciones afecta al ojo en tal medida que una persona de 60 años puede necesitar hasta 15 veces más de luz que un niño de 10 años para realizar la misma tarea visual, por ejemplo leer, con el mismo grado de comodidad y eficacia (figura 5.18).

Cuando se crean niveles de iluminación más elevados para las personas mayores es necesario tomar precauciones especiales para evitar el deslumbramiento. El humor vítreo dispersa más luz al ir perdiendo transparencia, por lo que los ojos de los ancianos son más sensibles al deslumbramiento.

Haga clic en la imagen para reproducir la animación...

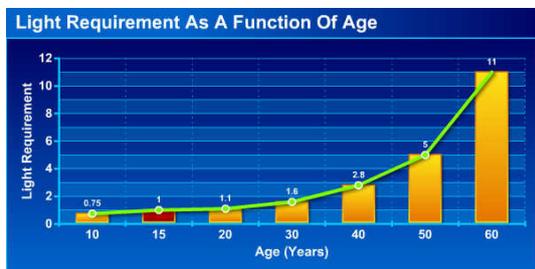


Fig. 5.18 Necesidades de luz para una tarea de lectura concreta en relación con la edad.

5.3 Aspectos psicológicos y emocionales de la visión

5.3.1 El ojo ve, el cerebro percibe

Nuestro cerebro ha aprendido a interpretar los estímulos visuales que reciben los ojos como una representación del mundo que nos rodea. El ojo explora una escena visual total en partes pequeñas, de dos grados, y el cerebro las “ensambla” para formar una imagen completa. Además, el cerebro puede hacer correcciones como, por ejemplo, darnos la impresión de que es más oscura una superficie gris a pleno sol con una luminancia más alta que una superficie blanca en la sombra. Por su parte, una imagen visual puede “engañar” al cerebro, como sucede con las bien conocidas ilusiones ópticas (figura 5.19).

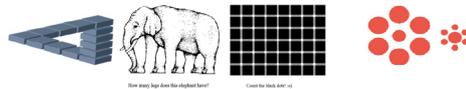


Fig. 5.19 Ilusiones ópticas. De izquierda a derecha: perspectiva, imagen doble, contraste y tamaño.

5.3.2 Efectos emocionales de la luz

Todos notamos de vez en cuando que la luz tiene un efecto emocional directo, pero todavía se sabe muy poco del proceso que lo genera. A veces puede tener que ver con nuestra propia experiencia: una cara fuertemente iluminada desde abajo (figura 5.20) puede darnos miedos, porque estamos acostumbrados a la luz que viene desde arriba.



Fig. 5.20 Una cara iluminada desde abajo no parece natural y da miedo.

Es especialmente clara la influencia del color en el estado de ánimo de las personas. Los colores rojo y amarillo crean una sensación de calidez y confort, el azul da una impresión de frescor y estimula la actividad, y el verde suele transmitir una sensación de descanso y relajación. Una vez más, nuestra experiencia juega un papel en ello y los mismos colores pueden tener un efecto emocional distinto sobre personas de distintos lugares del mundo. Los colores pueden afectar también a nuestra sensación de espacio: una habitación con las paredes rojas parece más pequeña que otra de las mismas dimensiones y paredes azules o blancas. La luz blanca por sí sola se puede usar para cambiar las dimensiones percibidas de un espacio y se hace que sean más luminosos el techo y las partes altas de las paredes de una habitación, la habitación parecerá tener más altura.

Existe una relación emocional entre el nivel de iluminación y el tono de la luz blanca. En el hogar, muchas personas tendrán una sensación relajante con niveles de luz relativamente bajos y un color de luz cálido (temperatura de color baja). En los lugares donde se necesita un ambiente más activo y estimulante, como oficinas, fábricas y escuelas, suele ser preferible un nivel de luz más elevado con un color más fresco (temperatura de color alta). La investigación sobre la relación entre el nivel de iluminación y la temperatura de color preferidos, realizada por Kruithof en 1941 en un laboratorio de Philips, es muy conocida. El resultado de esta investigación se muestra en las curvas de la figura 5.21, curvas que se encuentran en prácticamente todos los libros sobre iluminación. La zona blanca entre las dos curvas representa la zona de confort. Por encima del límite superior (alto nivel de iluminación / temperatura de color relativamente baja) o por debajo del límite inferior (bajo nivel de iluminación / temperatura de color relativamente alta) el espacio iluminado genera una sensación emocional desagradable y poco natural. Una vez más, nuestra experiencia es importante: la sensación emocional con luz de una temperatura de color determinada puede cambiar tras un tiempo.

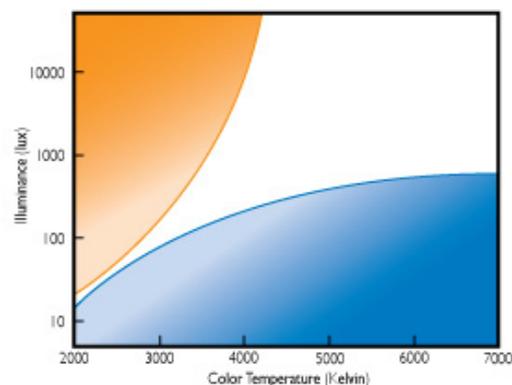


Fig. 5.21 Preferencia de temperatura de color de la luz en relación con el nivel de iluminación, según Kruithof.

6 Luz y color

La luz blanca está formada por una mezcla de colores. Ya hemos visto que la luz de un radiador térmico, como el sol o una lámpara incandescente, se puede dividir en toda la gama de colores del espectro: rojo, naranja, amarillo, verde, azul y violeta. Todos los colores del espectro no están presentes en todas las fuentes de luz y cuando lo están, pueden estarlo en distintas proporciones.

Cuando la luz blanca incide sobre una superficie, normalmente todos sus colores no se reflejan en igual medida. Los que se reflejan en mayor grado determinan en conjunto la impresión de color de esa superficie; así, una superficie verde reflejará la luz de la parte verde del espectro, pero absorberá el rojo y el violeta.

6.1 Combinación de colores

6.1.1 Mezcla aditiva

Si se mezclan luces de colores, el resultado siempre será más luminoso que cada uno de los colores por separado. Es lo que se denomina combinación de colores aditiva. Lo que sucede en la combinación de colores aditiva se entiende si se tienen en cuenta los tres colores básicos del espectro visible, rojo, verde y azul. Estos tres colores básicos son los **colores primarios** (RGB). Cuando se mezclan estos colores primarios se obtiene luz blanca (figura 6.1).

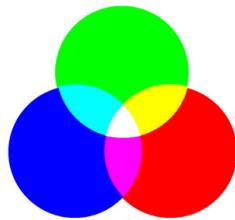


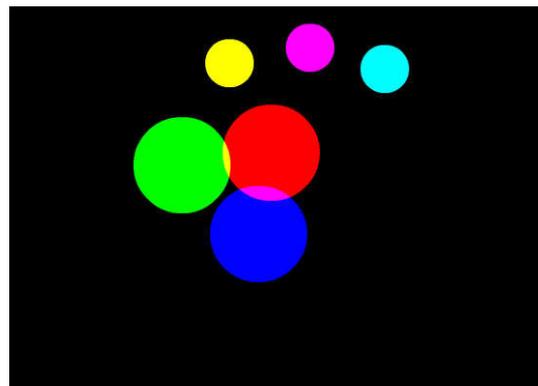
Fig. 6.1 Mezcla de colores aditiva de la luz.

El amarillo, magenta y cian se denominan **colores secundarios**, porque cada uno está formado por una mezcla de dos colores primarios (figura 6.2). También se conocen como **colores complementarios** porque cuando uno de ellos se mezcla con el color primario que no contiene, una vez más se obtiene luz blanca.

	+		=			
Blue		Green		Cyan		
	+		=			
Green		Red		Yellow		
	+		=			
Red		Blue		Magenta		
	+		+		=	
Red		Green		Blue		White
Rules of additive colour mixing						

Fig. 6.2 De izquierda a derecha: los colores secundarios amarillo, magenta y cian.

Haga clic en la imagen para reproducir la animación...



El color complementario amarillo mezclado con el color primario azul da luz blanca; el color secundario magenta mezclado con el color primario verde o el color complementario cian con el rojo también dan luz blanca (figura 6.3).

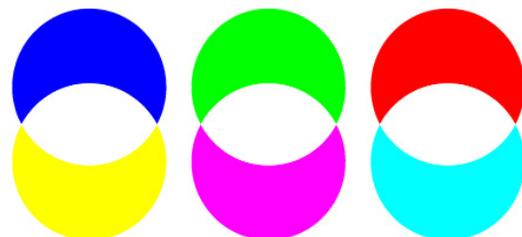


Fig. 6.3 La mezcla aditiva de un color complementario con el color primario adecuado da blanco.

6.1.2 Mezcla sustractiva

Si se mezclan pinturas de colores, el resultado siempre será más oscuro que cada una de las pinturas iniciales (figura 6.4). Esta forma de mezcla de colores se denomina mezcla sustractiva. La mezcla de dos o tres colores de pintura primarios dará negro.

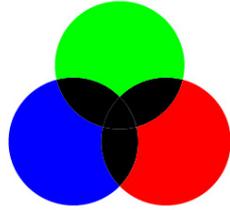


Fig. 6.4 Mezcla de colores sustractiva con pinturas.

La mezcla sustractiva de los colores complementarios volverá a producir los colores primarios. Así, el amarillo y el magenta dan rojo; el amarillo y el cian dan verde; y el magenta y el cian dan azul. La mezcla de cian, magenta y amarillo da negro (figura 6.5). Esta es la razón por la que cian, magenta y amarillo (y “key”, negro) son los colores de tinta que se usan en la impresión en color (impresión CMYK).

	+		=			
Yellow		Magenta		Red		
	+		=			
Cyan		Yellow		Green		
	+		=			
Magenta		Cyan		Blue		
	+		+		=	
Cyan		Yellow		Magenta		Black
Rules of subtractive colour mixing						

Fig. 6.5 La mezcla sustractiva de los colores complementarios cian, magenta y amarillo da negro.

Haga clic en la imagen para reproducir la animación...



6.2 Triángulo de color

Con objeto de caracterizar el color de la luz con precisión, la Comisión Internacional de la Iluminación (CIE) diseñó el diagrama de cromacidad, también llamado “triángulo de color de la CIE”, en 1931. Se basa en la teoría de la mezcla aditiva. A lo largo de los lados del triángulo se dibujan los colores espectrales, con los colores primarios rojo, verde y violeta-azul en las esquinas (figura 6.6). Los colores más saturados están en el borde del triángulo de colores. Hacia el interior se hacen más claros y menos saturados, y el centro del triángulo donde se mezclan todos los colores, es blanco. A lo largo de los ejes X e Y se indican valores numéricos de color, de forma que cada color se puede definir por sus valores X e Y, que se llaman coordenadas de cromacidad. A partir de la distribución de la energía espectral de una lámpara se pueden calcular los ejes X e Y y, así, se puede determinar la posición de su color de luz en el triángulo de colores. Esta posición (coordenadas X e Y) de una fuente de luz es el punto de color de la fuente.

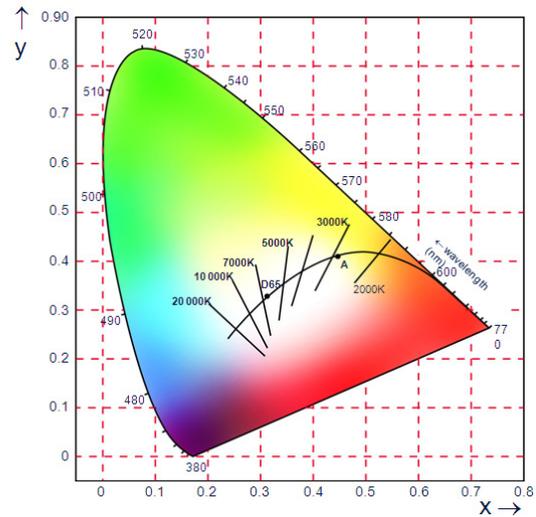


Fig. 6.6 Diagrama de cromacidad de la CIE (triángulo de colores de la CIE). La línea curva es el locus del cuerpo negro

6.2.1 Temperatura de color y el triángulo de color

En la sección 2.1.1 se explica que un cuerpo sólido, si se calienta por encima de una temperatura determinada, emite radiación visible de un color concreto para la temperatura del cuerpo. Es lo que se conoce como temperatura de color, en grados Kelvin. Con objeto de tener una definición precisa de ese tipo de radiador, se definió el radiador de cuerpo negro. Si se dibujan las coordenadas X e Y de un radiador de cuerpo negro de distintas temperaturas en el triángulo de la CIE se obtiene una línea curva conocida como curva del cuerpo negro. Si nos desplazamos de derecha a izquierda sobre la curva del cuerpo negro pasamos de radiadores con una temperatura de color baja (luz blanca-roja) a radiadores con una temperatura de color alta (luz azul-blanca). Todos los radiadores térmicos tienen su lugar en la curva del cuerpo negro, o muy próximo a él. Por ejemplo, el punto A de la figura 6.6 es el punto de color de una lámpara incandescente (2750K).

6.2.2 Temperatura de color correlacionada y el triángulo de colores

A diferencia de los radiadores térmicos, la luz blanca de fuentes de luz como lámparas de descarga y de estado sólido puede corresponder a cualquier punto de color aleatorio alejado la curva del cuerpo negro. En el caso de estas lámparas ya se ha explicado en la sección 2.2.7 el concepto de temperatura de color correlacionada. La temperatura de color correlacionada es la temperatura de color de un radiador de cuerpo negro cuyo color se parece mucho al de la fuente de luz de descarga o de estado sólido en cuestión. En el triángulo de colores de la CIE se han dibujado líneas de temperatura correlacionada constante, también denominadas isolíneas de temperatura de color. Si en primer lugar se valora el punto de color de la fuente en cuestión y, después, se sigue la isolínea de temperatura de color correspondiente hasta su punto de intersección con la curva del cuerpo negro, se puede determinar la temperatura de color correlacionada de la fuente (figura 6.7). Este método solo es válido si el punto de color de la fuente de luz no está demasiado alejado la curva del cuerpo negro.

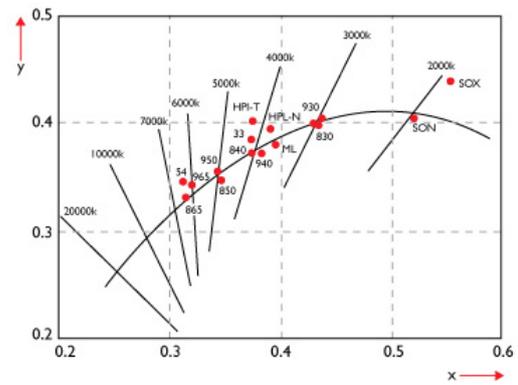


Fig. 6.7 Puntos de color de diversos tubos fluorescentes y lámparas de descarga de alta intensidad en el triángulo de colores de la CIE.

Ejemplos de lámparas con su temperatura de color correlacionada:

Color de lámpara TL 827:	2700K
Color de lámpara TL 830:	3000K
Color de lámpara TL 840:	4000K
Color de lámpara TL 865:	6500K
SON de sodio de alta presión:	2000K
HPL de mercurio de alta presión:	3800K
HPI de halogenuro metálico:	4200K

Haga clic en la imagen para reproducir la animación...



6.3 Aspecto de color y temperatura de color

El aspecto de color de una fuente de luz que emita algún tipo de luz blanca se ve muy afectado por la composición espectral de su luz y se puede caracterizar por su temperatura de color (correlacionada). Una fuente de luz blanca con una alta proporción de rojo y baja temperatura de color, por ejemplo una lámpara incandescente (figura 6.8), tendrá un aspecto más cálido; por su parte, una fuente de luz blanca con una mayor proporción de azul y más alta temperatura de color, como la luz diurna natural (figura 6.9), tendrá un aspecto más frío.

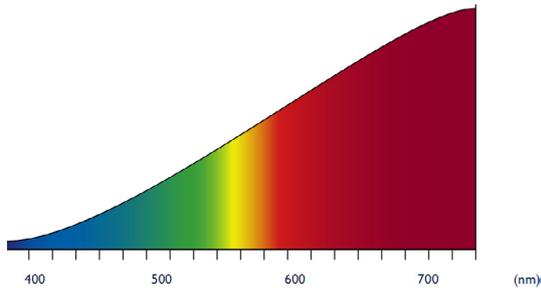


Fig. 6.8 Distribución espectral de la energía de una lámpara incandescente.

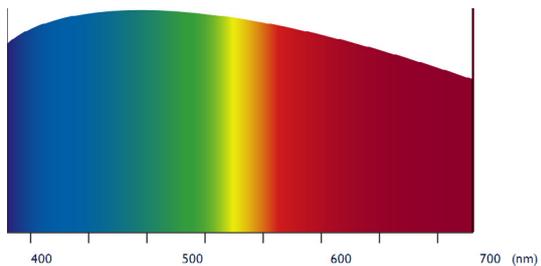


Fig. 6.9 Distribución espectral de la energía de la luz diurna natural.

Como hemos visto, también se puede obtener luz blanca mezclando ciertas longitudes de onda y con ausencia total de otras longitudes de onda, por ejemplo mezclando rojo, verde y azul, o solo azul y amarillo. Estas fuentes de luz, como las lámparas de descarga o de estado sólido, tienen un espectro discontinuo (figura 6.10), distinto al espectro continuo de una lámpara incandescente o la luz natural (figuras 6.8 y 6.9).

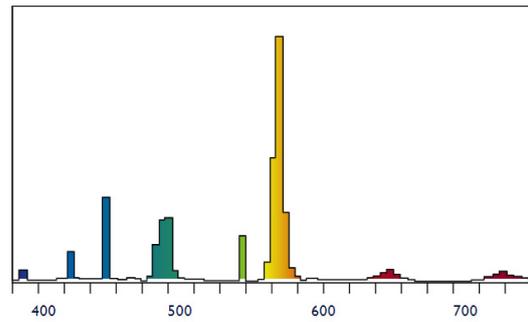
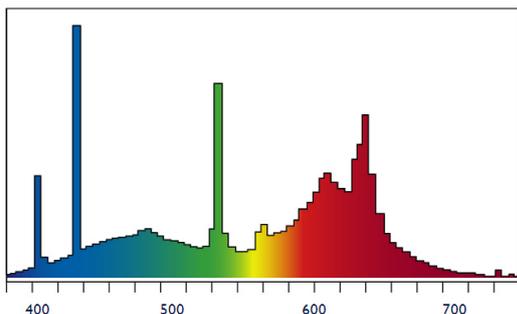


Fig. 6.10 Espectros discontinuos de dos lámparas de descarga distintas.

Con objeto de caracterizar los distintos tipos de luz blanca de las lámparas con un espectro discontinuo se usa la temperatura de color correlacionada de la misma forma que la temperatura de color se usa para los radiadores térmicos. Así, una lámpara de descarga o de estado sólido con una alta proporción de rojo y baja temperatura de color correlacionada tendrá un aspecto más cálido; por su parte, una fuente de luz blanca con una mayor proporción de azul y más alta temperatura de color correlacionada tendrá un aspecto más frío.

La temperatura de color (correlacionada) se usa también para clasificar grupos de temperatura de color / apariencia de color (tabla 6.1).

Temperatura de color	Aspecto de color
menos de 3300K	blanco cálido (amarillento)
3300K – 5000K	blanco neutro / intermedio
más de 5000K	blanco frío (azulado)

Tabla 6.1 Clasificación de grupos de temperatura de color / apariencia de color



Fig. 6.11 Espacios iluminados con lámparas de alta temperatura de color (izquierda) y lámparas de baja temperatura de color (derecha), con distintos aspectos y ambientes.

En la sección 5.3.2, “Efectos emocionales de la luz” hemos visto que la temperatura de color preferida de la iluminación de un espacio depende a menudo del nivel de iluminación instalado. Por lo general, con un nivel de iluminación menor se prefiere una temperatura de color más baja, mientras que con un nivel de iluminación superior es preferible una temperatura de color más alta (figura 6.11).

6.4 Adaptación cromática

El ojo se adapta a un color determinado y, cuando no hay indicaciones de lo contrario, tendemos a percibir ese color como “blanco”. Un ejemplo llamativo de este hecho es la lámpara incandescente normal: cuando se observa a plena luz del día parece bastante amarilla (figura 6.12), pero si se observa al atardecer, cuando la luz del día no se puede usar como referencia, es marcadamente blanca. De la misma forma, si se instalan varios “colores” distintos de lámpara fluorescentes en el mismo techo, cada una mostrará claramente un tono de color diferente (figura 6.13), mientras que todas se percibirán como “blanco” cuando no se pueden hacer comparaciones directas.

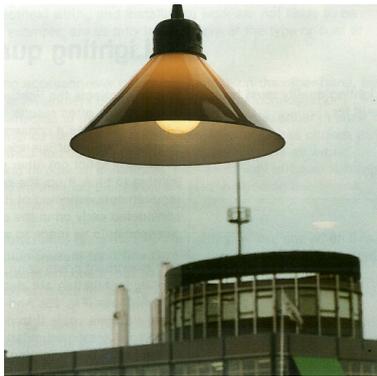


Fig. 6.12 Una lámpara incandescente a plena luz del día tiene un aspecto amarillento en lugar de blanco.



Fig. 6.13 Si distintos tubos fluorescentes TL se observan juntos parecen tener colores distintos, que no son blanco.

6.5 Reproducción del color e índice de reproducción cromática

Los colores de los objetos juegan un papel muy importante en la percepción de casi todas las escenas y la iluminación artificial afecta al aspecto de esos colores. Los objetos rojo, azul y verde de la figura 6.14 solo se percibirán con sus colores verdaderos si la luz incidente tiene como mínimo rojo, verde y azul en su espectro.

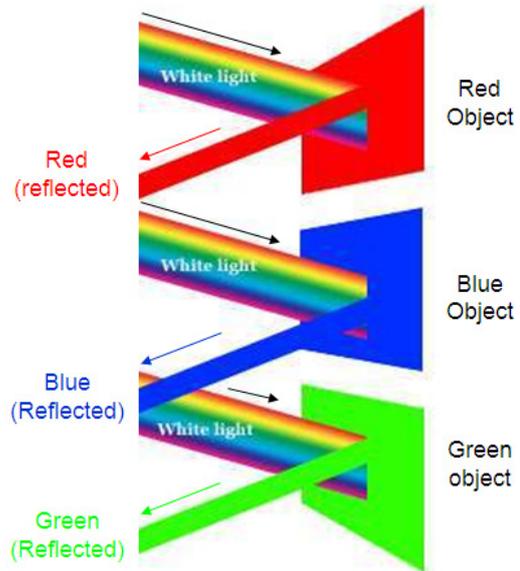


Fig. 6.14 Luz blanca incidente reflejada desde superficies de distintos colores.

La reproducción del color es la capacidad de la luz artificial de reproducir con fidelidad los colores de los objetos. Las fuentes de luz con espectro continuo tienen una mayor capacidad de reproducción que las fuentes de luz con un espectro discontinuo.

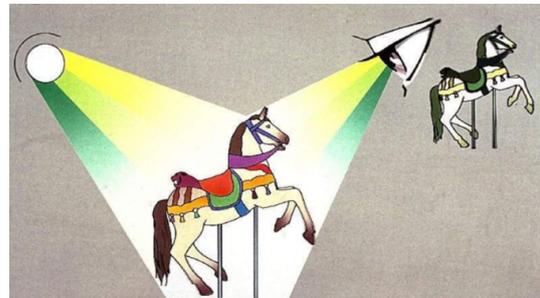
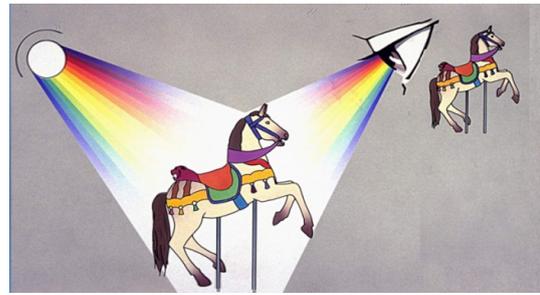
Haga clic en la imagen para reproducir la animación...



Al hablar de la reproducción del color es importante tener en cuenta que los “colores verdaderos” no existen. Se tiende a juzgar los colores en las circunstancias de iluminación que se consideran naturales o reales, y se suele asumir erróneamente que la luz diurna natural crea esas circunstancias. Los colores observados en un día de sol pueden ser muy distintos a los observados en un día nublado, hecho que se debe a que la distribución espectral de la luz diurna natural no es constante, si no que cambia de hora en hora y de estación en estación. Es necesario evaluar los colores con el mismo tipo de iluminación existente en el lugar donde se vayan a ver permanentemente. Por ejemplo, un traje de noche se debe elegir en un lugar con iluminación incandescente, si es el tipo de iluminación del lugar donde se va a llevar.



Fuentes de luz que tienen la misma temperatura de color y, por tanto, el misma apariencia de color, no siempre reproducen de la misma forma las superficies de color. Dos luces que parecen ser del mismo blanco pueden derivar de dos composiciones distintas de longitudes de onda. Un trozo de tela roja solo parecerá roja de verdad si está iluminada por luz blanca con un espectro continuo, pero tendrá un aspecto marrón grisáceo bajo una luz, aparentemente blanca, que sea una mezcla de luz amarilla y azul. Como consecuencia de la ausencia de longitudes de onda rojas, no hay rojo que la tela pueda reflejar en el ojo. Este principio se ilustra en las figuras 6.15 y 6.16. La lámpara de espectro continuo de la figura 6.15, que emite luz de todos los colores, ilumina un caballito de juguete. La luz reflejada desde el caballito entra en el ojo del observador y genera la imagen del ángulo superior izquierdo. En la figura 6.16, no hay rojo en el espectro de la luz que incide sobre el caballo, por lo que no se refleja luz desde sus partes rojas, que parecerán oscuras a un observador.



Figs 6.15 y 6.16 Un caballito de juguete iluminado con luz con un espectro continuo y discontinuo, respectivamente. Las imágenes en color como las percibe el observador son muy distintas (ángulo superior derecho de las ilustraciones).

Con objeto de clasificar las fuentes de luz según sus capacidades de reproducción del color la CIE introdujo el “índice general de reproducción del color” R_a . Este índice se basa en el aspecto de ocho colores normalizados bajo una fuente de luz determinada comparados con su aspecto bajo una fuente de luz de referencia, es decir, el índice representa el cambio de color medio de estos ocho colores normalizados. Si no hay cambio alguno, como ocurre con fuentes de luz con un espectro continuo (por ejemplo, todos los radiadores térmicos), el valor de R_a es 100.

Si todos los colores desaparecen por completo, el valor de R_a es cero. Puesto que el índice general de reproducción del color R_a representa el cambio medio de ocho colores, fuentes de luz que tengan el mismo valor R_a pueden reproducir colores concretos de forma distinta.

En el caso de la iluminación de interiores, R_a se usa también para clasificar fuentes de luz en función de su calidad de reproducción del color (tabla 6.2.). La tabla 6.3 contiene los valores R_a reales de algunos tipos de lámpara.

Intervalo de R_a	Reproducción del color
90 – 100	Excelente
80 – 90	Buena
60 – 80	Moderada
< 60	Pobre

Tabla 6.2 Clasificación de la reproducción del color.

Tipo de lámpara	R _a
Incandescentes y halógenas	100
TL 940	90
TL 840	80
TL 640	60
LED blanco	60 - 95
Halogenuro metálico	70 - 90
Sodio de alta presión	25
Sodio de baja presión	0

Tabla 6.3 Índice de reproducción del color de distintos tipos de lámpara.

Índice de reproducción del color y LED

Las lámparas fluorescentes y los LED blancos más recientes tienen uno o varios picos en su espectro. El índice de reproducción del color Ra no produce siempre una representación fiel de la reproducción del color de estas fuentes de luz. La CIE estudia nuevos métodos para evaluar las propiedades de reproducción del color de fuentes de luz blanca con objeto de recomendar un nuevo indicador de la reproducción del color.

Las fuentes de luz con un índice de reproducción del color más bajo suelen ser más eficientes que las de índices superiores. En consecuencia, es importante que el diseñador de iluminación equilibre la importancia relativa de la eficiencia y la calidad de reproducción del color para cada uso distinto.

Haga clic en la imagen para reproducir la animación...

Colour temp. Vs Colour rendering

Video Courtesy: L.D.Norman
Southbank University



Durante unos 200 años, se pensó que los conos y bastones eran las únicas células fotorreceptoras del ojo. En el año 2000, los científicos descubrieron que en torno al uno por ciento de nuestras células ganglionares de la retina del ojo también son sensibles a la luz. Este tercer tipo de célula fotorreceptora se denomina célula ganglionar fotosensible, o ipRGC. Estas células tienen una conexión nerviosa con el “reloj biológico” del cerebro, el núcleo supraquiasmático (NSQ). El NSQ, a su vez, tiene una conexión nerviosa con la glándula pineal, que es la encargada de la regulación de ciertas hormonas (figura 7.1).

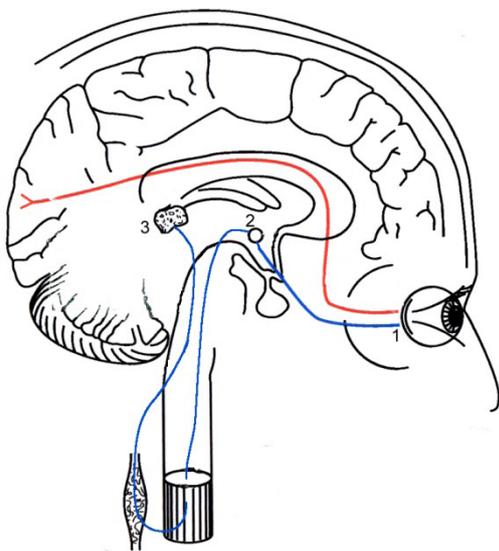


Fig. 7.1 Rutas visuales (rojo) y biológicas no visuales (azul) de la retina al cerebro. 1: retina con conos, bastones e ipRGC 2: NSQ y 3: glándula pineal.

Así, existe una conexión directa entre la luz, los tiempos del organismo y las hormonas. La luz ejerce un efecto visual y también un efecto biológico no visual, por lo que es importante para nuestra salud.

7.1 Ritmos circadianos

La rotación de la tierra en torno a su eje en exactamente 24 horas genera un ritmo de 24 horas de luz y oscuridad, que regula bastantes procesos de nuestro organismo. Como ejemplos se pueden citar el ritmo de sueño y vigilia, el ritmo de temperatura corporal y ritmo cardiaco, y el ritmo con que se producen algunas hormonas. Estos ritmos de 24 horas se llaman ritmos circadianos.

En la figura 7.2 se muestra el ritmo circadiano de nuestra temperatura corporal. En un estado de buena salud, nuestra temperatura corporal varía a lo largo del día y la noche en unos 0,4° centígrados por la influencia del ritmo natural de luz y oscuridad.

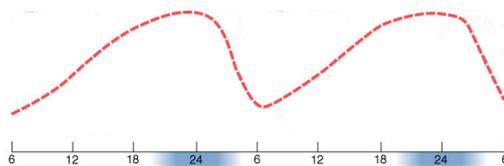


Fig. 7.2 Curva doble (2 x 24 horas) de los ritmos diarios típicos de la temperatura corporal (escala relativa).

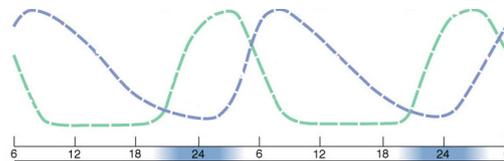


Fig. 7.3 Curva doble (2 x 24 horas) de los ritmos diarios típicos del cortisol (azul) y la melatonina (verde) (escala relativa).

El mismo mecanismo de luz y oscuridad controla las hormonas cortisol y melatonina en el transcurso del día y la noche (figura 7.3). Estas hormonas (cortisol, “hormona de la energía”, y melatonina, “hormona del sueño”) juegan un papel importante en la regulación de nuestro grado de atención y sueño. El cortisol, entre otras cosas, incrementa el azúcar en la sangre para dar energía al cuerpo; los niveles de cortisol aumentan por la mañana y se reducen gradualmente a lo largo del día, manteniendo siempre el nivel suficiente de producción de azúcar necesario para nuestra energía, y desciende al mínimo a medianoche. El nivel de melatonina, la hormona del sueño, desciende por la mañana para reducir la somnolencia. En las personas sanas, se eleva de nuevo al oscurecer para facilitar el sueño; el efecto de sueño se ve reforzado porque el cortisol en ese momento está en su nivel más bajo.

Además de regular todo esto, el ritmo de 24 horas de luz y oscuridad garantiza que nuestro reloj biológico se ajusta al ciclo de 24 horas. La luz de la mañana sincroniza todos los días nuestro reloj interno con el ciclo luz-oscuridad de 24 horas de la tierra. Si este proceso de sincronización dejara de existir nuestro cuerpo adoptaría gradualmente un ritmo incorrecto de vigilia y sueño, que llegaría a generar periodos de vigilia durante la noche y de sueño durante el día.

7.2 Sensibilidad espectral biológica no visual

La sensibilidad de la célula fotorreceptora descubierta en los últimos años varía a diferentes longitudes de onda de luz, lo mismo que la sensibilidad de los conos y bastones. En la figura 7.4 se muestran la curva de sensibilidad espectral biológica no visual y la curva de sensibilidad visual del ojo para la visión fotópica $V(\lambda)$, ambas como una función de la longitud de onda. Si se comparan las dos curvas se aprecia inmediatamente que la sensibilidad biológica para las longitudes de onda de la luz es bastante distinta a la sensibilidad visual: mientras que la sensibilidad visual máxima está en la región amarillo-verde de la longitud de onda, la sensibilidad biológica máxima está en la región azul del espectro. Así, la luz con alta temperatura de color es “biológicamente” más efectiva que la luz con baja temperatura de color. Este fenómeno es importante para especificar y diseñar instalaciones de iluminación saludables.

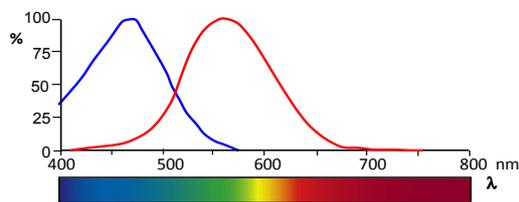


Fig.7.4 Curva de sensibilidad espectral biológica no visual (basada en la supresión de melatonina), en azul, y curva de sensibilidad visual del ojo $V(\lambda)$, en rojo.

7.3 Iluminación y terapia

En las secciones anteriores se ha descrito la importancia de la iluminación en la salud. Además, la iluminación se puede usar en ocasiones como terapia para personas con trastornos de su reloj biológico. Existen terapias para ciertos tipos de trastornos del sueño, sobre todo en personas mayores; trastornos afectivos estacionales (SAD, una forma de depresión invernal grave); ciertos tipos de trastornos alimenticios; para el agotamiento; y para problemas del ritmo sueño-vigilia frecuentes en pacientes con Alzheimer.

Los trastornos de nuestro reloj biológico se pueden deber también a nuestro estilo de vida y la iluminación adecuada puede contribuir a reducir estos problemas. Ejemplos de esta categoría son el “jet lag” consecuencia de vuelos largos a través de varias zonas horarias, y el trabajo por turnos.

8 Iluminación de calidad

La iluminación es un arte además de una ciencia, por lo que no hay reglas fijas que controlen el proceso de diseño de iluminación. Tampoco habrá una solución perfecta para un problema de iluminación concreto. Lo importante es que la solución elegida proporcione la calidad de iluminación que garantice un rendimiento y confort visuales correctos. La investigación llevada a cabo en todo el mundo durante mucho tiempo sobre el funcionamiento del ojo, el mecanismo de la vista y el papel de la luz ha dado lugar a los principales criterios de calidad de iluminación. Estos criterios se pueden describir como:

- Nivel de iluminación
- Distribución espacial de la luz en el campo visual
- Direccionalidad de la luz
- Color de la luz

8.1 Nivel de iluminación

El nivel de iluminación se usa para indicar la cantidad de luz existente. Se debe destacar, para dar una idea aproximada de los niveles de iluminación que pueden existir, que las iluminancias naturales generadas por la luz natural pueden ir de solo unas décimas de lux (por ejemplo, la luz de la luna) cuando la percepción humana es apenas posible, hasta una cifra de 100.000 lux a plena luz diurna en el verano (figura 8.1). En relación con este intervalo de niveles de luz natural, los niveles de iluminación artificial aceptados como satisfactorios son verdaderamente bajos: de 3 a 25 lux para el alumbrado público, de 10 a 50 lux como media para la iluminación ambiental de interiores, y de 300 a 1.000 lux para leer y trabajar.

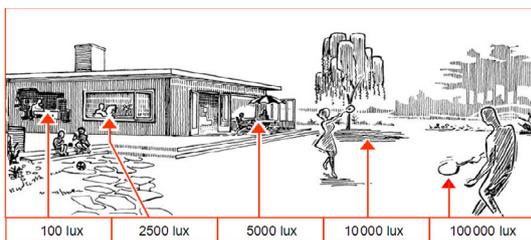


Fig. 8.1 Intervalo de niveles de iluminación en un día soleado.

8.1.1 Luminancia e iluminancia

Antes de ocuparnos del tema de la iluminación con mayor profundidad debemos saber cómo se mide. En la figura 8.1 se utiliza la denominada iluminancia horizontal para determinar la cantidad proporcionada por la luz natural. En realidad, lo que “vemos” a partir de toda esa luz natural es un patrón de iluminancia en el que las reflectancias de los objetos y la cantidad de luz natural que incide sobre ellos juegan un papel esencial. Con todo, en usos en los que intervienen diversas reflectancias es muy difícil especificar directamente niveles de iluminación en forma de luminancia. Únicamente en el alumbrado público, en el que las propiedades de reflexión de la superficie suelen estar bien definidas, se usa la luminancia media de la superficie de la carretera como medida del nivel de iluminación. En casi todos los demás usos se usa el promedio de iluminancia del plano más importante, a menudo el plano horizontal, como medida del nivel de iluminación.

8.1.2 Efectos del nivel de iluminación

El nivel de iluminación determina el estado de adaptación del ojo. Como ya se ha explicado, cuanto más alto es el estado de adaptación del ojo, mejores son la sensibilidad de contraste y la agudeza visual, y menor es el riesgo de incomodidad visual por deslumbramiento. En consecuencia, cuanto más difícil es una tarea visual en cuanto a tamaño, contraste y velocidad de ejecución, mayor es el nivel de iluminación necesario. Además, el riesgo de fallos y la duración de la tarea juegan un papel importante al determinar el nivel de iluminación necesario.

Existen diversas recomendaciones y normas, nacionales e internacionales, sobre una gran número de usos de la iluminación en interiores y exteriores, con especificaciones detalladas de los valores del nivel de iluminación.

8.1.3 Planos para la especificación del nivel de iluminación

El plano sobre el que se suele especificar el nivel de iluminación es el plano horizontal (figura 8.2). En interiores se mide normalmente en las áreas de trabajo, por ejemplo los escritorios. En los casos en que no se conoce el área de trabajo exacta, se especifica el nivel de iluminación sobre una superficie horizontal imaginaria a unos 75 cm del suelo. En el alumbrado público se usa la superficie de la carretera y en el de instalaciones deportivas, la superficie de juego horizontal.



Fig. 8.2 Plano de trabajo horizontal de una oficina típica.

En muchos casos también es importante la iluminación de objetos verticales. Por ejemplo, en la iluminación de instalaciones deportivas para la transmisión por televisión, se usa la iluminancia de determinados planos verticales como criterio adicional para garantizar la visión correcta de los jugadores, que son “verticales”. En las áreas residenciales donde pueda haber problemas de delincuencia se indica también en algunas ocasiones la denominada iluminancia semicilíndrica como criterio de iluminación para facilitar el reconocimiento facial. Se considera que el rostro humano se parece más a un medio cilindro que a un plano vertical.

Como ya se ha mencionado en una sección anterior, la luz que incide en el ojo controla nuestros ritmos circadianos. Por ello, si se tiene en cuenta la relación entre iluminación y salud, el nivel de iluminación que se debe especificar es la iluminancia sobre un plano perpendicular a la línea de visión.

8.2 Distribución espacial de la luz

Nuestro entorno visual está formado por diversos patrones de luminosidad y color, por lo que disponer de un nivel de iluminación adecuado no es suficiente para garantizar el correcto funcionamiento del ojo. También es importante la distribución espacial de la luz, que debe generar una distribución equilibrada de la luminancia. Los requisitos de proporción de uniformidad y luminancia, junto con los límites de restricción del deslumbramiento, contribuyen a lograr esa situación de equilibrio.

8.2.1 Relaciones de uniformidad y luminancia

Si el nivel de iluminación medio es adecuado pero se obtiene de forma que hay grandes diferencias entre los niveles de los planos especificados, el rendimiento y el confort visual pueden verse afectados. Dicho de otro modo, ciertas áreas de los planos especificados estarán demasiado oscuras en relación con el nivel de iluminación global. Por ello, además de un nivel de iluminación medio, se especifica un requisito de uniformidad, que se suele expresar como la (i)luminancia mínima sobre un plano determinado en relación con la (i)luminancia media: E_{\min}/E_{med} o L_{\min}/L_{med} . Al igual que con el nivel de iluminación, existen diversas recomendaciones y normas, nacionales e internacionales, que especifican los valores de uniformidad para muchos usos distintos.

Además de evitar zonas oscuras en relación con la iluminación general, es importante evitar la creación de puntos de luz y oscuridad demasiado próximos. Como ejemplo se puede citar el “efecto cebra” de una instalación de alumbrado público deficiente, porque las columnas de iluminación están demasiado separadas. La conducción en esa carretera sería muy incómoda por la secuencia repetida de zonas de luz y oscuridad. El problema se resolvería especificando un valor mínimo para la relación de luminancia mínima/máxima a lo largo de una línea paralela al eje de la carretera: $(L_{\min}/L_{\text{máx}})$ longitudinalmente. Un problema parecido se puede dar en interiores en los que las luminancias de las paredes son muy distintas. La razón es que al mirar distintos puntos de esa habitación el ojo se tiene que readaptar constantemente, algo muy molesto y que puede cansar la vista. Las diferencias de luminancia demasiado pequeñas, por su parte, producirán una escena visual monótona, sin puntos de interés. Existen recomendaciones y estándares para especificar valores mínimos y máximos de relación de luminancia en las superficies más grandes de un espacio interior. Uno de los requisitos principales para garantizar relaciones de luminancia correctas y cómodas (figura 8.3) es la correspondencia con las reflectancias del campo de visión.



Fig. 8.3 Correspondencia de las reflectancias del campo de visión para lograr relaciones de luminancias correctas y cómodas.

Los intervalos de reflectancias útiles para las superficies más importantes de un interior son:

- techo: 0,6-0,9
- paredes: 0,3-0,8
- planos de trabajo: 0,2-0,6
- suelo: 0,1-0,5

Por lo general, la relación de luminancia en el entorno próximo a la tarea visual no debe ser superior a 3:1 (figura 8.4).

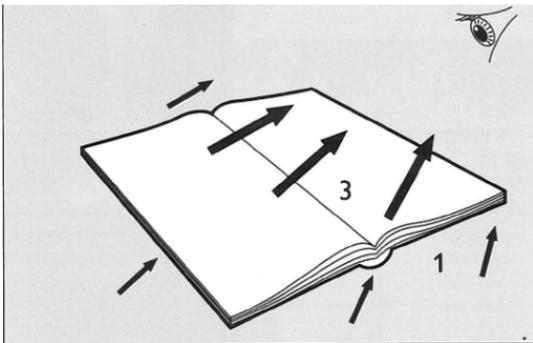


Fig. 8.4 La relación de luminancia en el entorno próximo a la tarea visual no debe ser superior a 3:1.

8.2.2 Limitación del deslumbramiento

Deslumbramiento por luz artificial

Hemos visto que el deslumbramiento es una sensación incómoda creada por luminancias del campo visual que son mucho mayores que la luminancia a la que están adaptados los ojos. El deslumbramiento, que puede estar motivado por luminarias brillantes, puede tener un efecto incapacitante, un efecto incómodo o ambos. Existen diversos estándares y recomendaciones nacionales e internacionales que especifican restricciones para incomodidad visual por deslumbramiento y la incapacidad visual por deslumbramiento.

Deslumbramiento por luz natural

Las ventanas pueden tener luminancias muy altas y molestas en relación con las demás luminancias de una habitación; La luminancia de un cielo azul puede ser de hasta 8.000 cd/m². con un cielo cubierto, el valor puede llegar a ser de hasta 200 cd/m². Dependiendo de la orientación y el diseño de una ventana, podría ser necesario instalar persianas o cortinas para evitar molestias visuales.

Deslumbramiento indirecto por reflexión

La luz de una fuente luminosa reflejada en los ojos desde una superficie brillante puede producir sensaciones como distracción, incomodidad o incapacidad visual (figura 8.5). Históricamente, las pantallas de ordenador de poca calidad generaban estas molestias hasta tal punto que se diseñaron "luminarias para VDU de baja luminancia" para minimizar los problemas.



Fig. 8.5 Pantalla de ordenador de poca calidad que, especialmente con un fondo oscuro, da lugar a molestos reflejos.

En la actualidad, con las modernas pantallas sin reflejos, no suelen ser necesarias medidas de iluminación especiales. Con todo, los reflejos de las ventanas pueden afectar a la visualización incluso con pantallas de gran calidad, razón por la que es aconsejable contar con persianas o cortinas adecuadas.

8.3 Direccionalidad de la luz

La dirección del flujo luminoso y las sombras que se crean afectan a cómo percibimos el mundo tridimensional que nos rodea. Se puede distinguir entre luz direccional, luz difusa y luz indirecta.

8.3.1 Luz direccional

Normalmente, la luz direccional tiene un haz estrecho y llega directamente a un objeto. Crea grandes contrastes y un marcado efecto de modelado, que en la luz para escaparates (figuras 8.6 y 8.7) genera grandes sombras y puntos luminosos para destacar con claridad y dramaticidad el contorno del objeto iluminado. Con todo, las sombras muy marcadas no son atractivas y pueden ocultar los detalles del objeto; una buena visibilidad tridimensional suele exigir luz direccional procedente de al menos dos direcciones. A menudo se utiliza un equilibrio de intensidad de 1:2, por ejemplo en iluminación decorativa en que el haz principal (o luz principal) se refuerza con un haz secundario (luz de relleno), como en la figura 8.8.

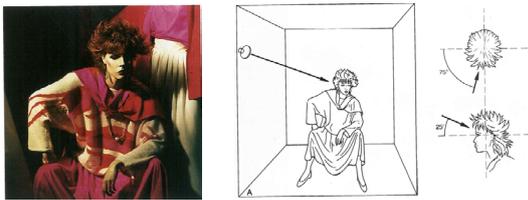


Fig. 8.6 Luz direccional desde la derecha de la figura.

Haga clic en la imagen para reproducir la animación...

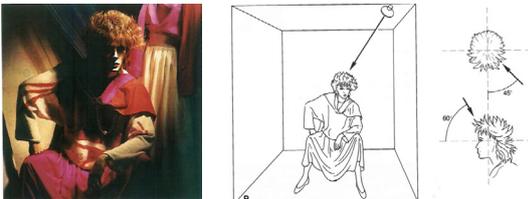
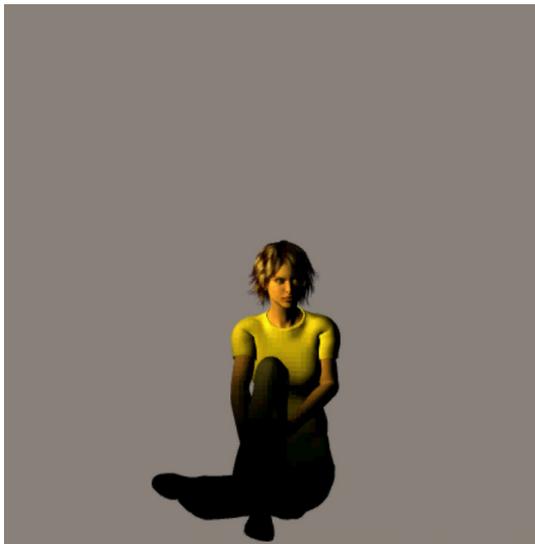


Fig. 8.7 Luz direccional desde la parte superior izquierda de la figura.

Haga clic en la imagen para reproducir la animación...

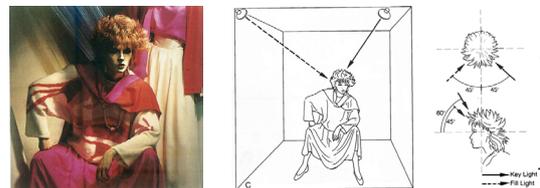
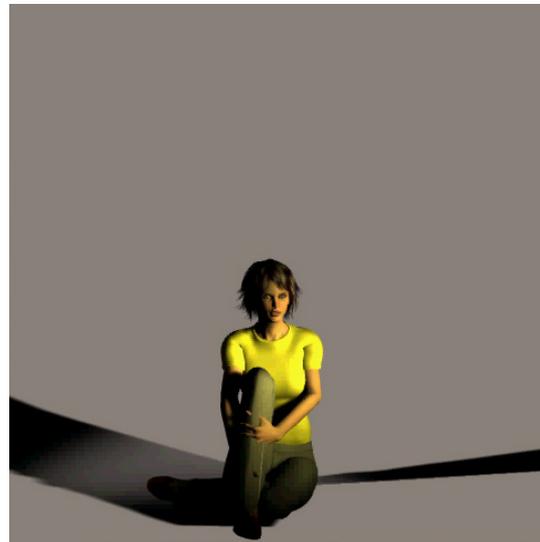


Fig. 8.8 Combinación de luz principal y de relleno.

Haga clic en la imagen para reproducir la animación...



Se puede añadir luz desde otras direcciones. La iluminación posterior, por ejemplo, se puede usar para destacar el contorno del objeto expuesto (figura 8.9). La iluminación posterior también se usa en decoración para lograr efectos de silueta sobre un fondo luminoso. La iluminación desde abajo puede crear un gran efecto dramático (figura 8.10) y se utiliza mucho en el teatro.

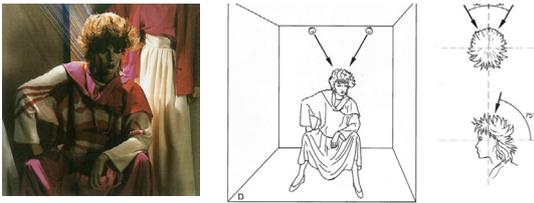


Fig. 8.9 Iluminación posterior

Haga clic en la imagen para reproducir la animación...

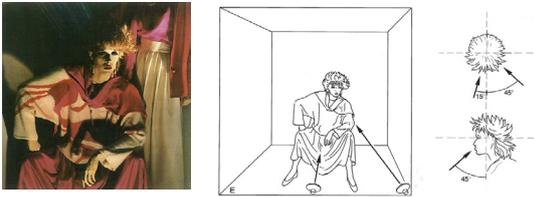


Fig. 8.10 Iluminación desde abajo

Haga clic en la imagen para reproducir la animación...



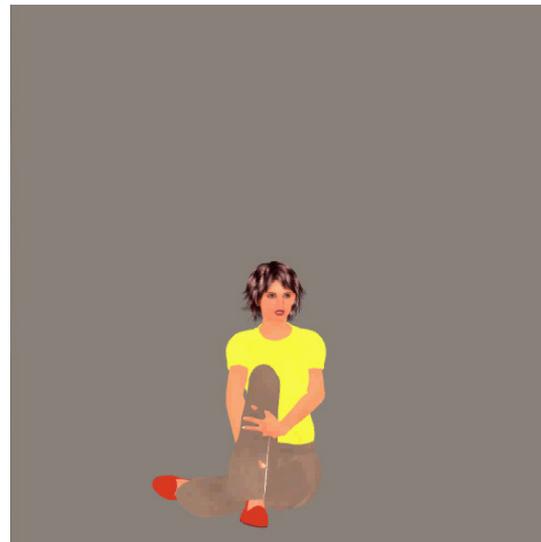
8.3.2 Luz difusa

La luz que llega a un objeto desde muchas direcciones apenas produce sombras. Los efectos de silueta de la luz difusa son menos marcados y no existen con una iluminación totalmente difusa (figura 8.11). La impresión de un espacio con iluminación totalmente difusa es monótona, y se hace difícil identificar objetos y calcular distancias; se puede comparar con el exterior en un día completamente nublado.



Fig. 8.11 Iluminación difusa

Haga clic en la imagen para reproducir la animación...



8.3.3 Luz indirecta

La iluminación indirecta se consigue con la luz reflejada en una pared o un techo de color claro cuando llega al objeto a iluminar. Si las paredes o el techo no tienen brillo, lo que suele ser habitual, la luz reflejada es sobre todo una luz difusa.

8.3.4 Distribución luminosa de las luminarias

Al iluminar un interior, es importante elegir luminarias con la distribución de la luz adecuada, porque la distribución de la luz de las luminarias y su ubicación determinan la dirección de la luz, que a su vez determina dónde se proyectarán las sombras. La distribución de la luz de una luminaria se puede mostrar en un diagrama de intensidad luminosa (figura 8.12), que a menudo se llama simplemente curva polar de distribución luminosa. En el diagrama se puede ver si la luz llega al plano directamente o después de reflejarse en las paredes y el techo. La distribución de la luz de una luminaria determina también, en gran medida, la cantidad de luz que llega directamente al ojo y, así, el nivel de deslumbramiento probable. Lo mismo se puede decir de la luz que incide y crea un deslumbramiento indirecto en las pantallas de ordenador con un diseño deficiente.

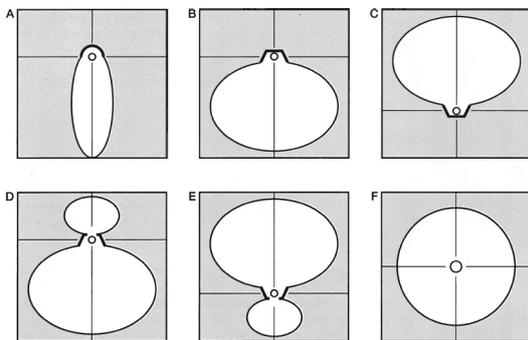


Fig. 8.12 Diagramas polares de intensidad luminosa de A: haz estrecho B: haz ancho C: haz indirecto D: haz predominantemente directo E: haz predominantemente indirecto F: haz omnidireccional

8.4 Color de la luz

Como se ha descrito en la sección 6, “Luz y color”, la distribución espectral de la radiación visible emitida por una fuente de luz determina la capacidad de reproducción del color de la fuente y la impresión del color, o apariencia del color, que se obtiene al mirar a la fuente. Estas dos características tienen gran importancia en cuanto a la calidad de la iluminación, ya que determinan la impresión del color que se recibe de una escena iluminada.

8.4.1 Reproducción del color

La reproducción del color adecuada es importante cuando los objetos se deben ver con sus colores “verdaderos”. Todas las recomendaciones y normas, nacionales e internacionales, especifican valores mínimos del índice general R_a de reproducción del color para muchos usos de iluminación de interiores y exteriores. En ciertas ocasiones la reproducción del color no tiene mucha importancia, por ejemplo en el alumbrado viario, cuando interesa que la calle y los objetos sobre ella sean claramente visibles para los conductores, y los colores de la superficie no tienen importancia.

8.4.2 Temperatura de color

Dado que el tono de la luz blanca (es decir, la apariencia del color) se considera a menudo una cuestión de gusto, solo unas cuantas recomendaciones y normas especifican temperaturas de color concretas. Con todo, cuando se tiene en cuenta la influencia de la iluminación en la salud, la temperatura de color de la instalación de iluminación puede ser esencial (véase la sección 7, “Iluminación y salud”). En ocasiones puede ser aconsejable que haya iluminación dinámica, es decir, en la que el nivel de iluminación y la temperatura de color cambian con el transcurso del tiempo.

8.4.3 Luz de colores

La luz de colores forma parte de nuestro entorno cada vez más. Hasta ahora, la luz de colores se usaba casi exclusivamente en el teatro, pero con la iluminación mediante LED está muy presente en nuestro entorno (figura 8.13): tiendas, zonas de recepción, ciudades y hasta en oficinas. Un diseñador de iluminación internacional debe tener en cuenta que el uso de colores, sobre todo de colores saturados, se acepta más o menos en función de la ubicación geográfica o cultural.



Fig. 8.13 Escenas de colores creadas con iluminación mediante LED.

8.5 Economía de la luz

8.5.1 Instalación de iluminación

Una instalación de iluminación que cumpla todos los requisitos de calidad pero sea demasiado cara, difícil de mantener y no eficiente energéticamente solo puede describirse como una mala instalación. Desde el momento que se empieza a diseñar un proyecto de iluminación la economía debe ser parte esencial del análisis.

El coste total de propiedad es una valoración de todos los costes de una solución de iluminación a lo largo de su vida útil. Normalmente, se calcula para cada una de las opciones de diseño para decidir cuál es la más rentable. Inicialmente, muchos factores de coste son solo estimaciones y parte del proceso de calidad de diseño de una instalación consiste en cuantificar esas estimaciones con precisión.

Los factores de coste que se deben tener en cuenta son:

- Costes de inversión
Los costes de inversión de una instalación de iluminación concreta se pueden dividir en:
 - Costes de la compra inicial de lámparas, luminarias, balastos y sistemas de control de la iluminación.
 - Otras piezas eléctricas y de montaje (soportes de techo, mástiles, cables, etc.).
 - Costes de instalación.
- Costes de funcionamiento
Los costes de funcionamiento más importantes son:
 - Costes energéticos
 - Costes de sustitución de lámparas
 - Costes de mantenimiento
 - Amortización

El coste principal es el de la energía. La iluminación, a demás de cumplir todos los demás requisitos, debe ser lo más eficiente posible para que el consumo eléctrico sea el mínimo. Los costes de mantenimiento representan una parte relativamente pequeña de los costes anuales totales, pero un mantenimiento sencillo es esencial para garantizar el funcionamiento correcto de la instalación toda su vida útil. En los casos en que el acceso a las luminarias no es fácil o afecta a los usuarios de la instalación, es especialmente importante garantizar que el mantenimiento necesario sea mínimo.



8.5.2 Control de iluminación

8.5.2 Control de iluminación

Se debería combinar la eficiencia de la instalación de iluminación con la eficiencia en el uso. debería poder disponerse en cada momento de la cantidad de luz necesaria para la realización de las tareas que se realicen en ese momento concreto. Esto se denomina iluminación en función de la demanda. Los sistemas de control de iluminación actuales ofrecen muchas más posibilidades que la simple función de encendido y apagado. La regulación remota o automática de grupos de iluminación puede dar como resultado un ahorro importante en energía y costes, sin que ello afecte a la realización de la tarea de la instalación (control en función de la tarea). El control de iluminación en función de la tarea se puede aplicar a todos los tipos de iluminación, desde la luz en interiores (en función de la tarea y del envejecimiento) hasta la iluminación de carreteras (en función de la densidad del tráfico, de la climatología y de la hora del día) y la iluminación de deportes (tipo de competición o solo entrenamiento). En las instalaciones de iluminación de interiores, un sistema de control eficiente también debería aprovechar la luz del día regulando y apagando la iluminación artificial cuando y donde entre suficiente luz en el espacio interior (vinculación con la luz natural). Los sistemas de detección de infrarrojos pasivos se pueden combinar con estos sistemas de control inteligentes para garantizar que la iluminación se apaga si no hay nadie (control de presencia).

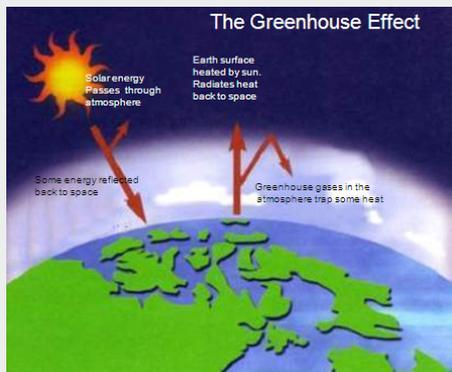
Se analizarán con más detalle los sistemas de control de iluminación actuales en otro capítulo de esta serie.

9 La luz y el medio ambiente

El Club de Roma, grupo internacional de profesionales de los campos de la diplomacia, la industria, la educación y la sociedad civil, publicó en 1972 el informe “Los límites del crecimiento”. En el informe se destacaba por primera vez la contradicción del crecimiento ilimitado del consumismo material en un mundo de recursos finitos. Se resaltaba en primer lugar el problema de unos recursos energéticos limitados. El mundo de la iluminación reaccionó diseñando productos con mayor eficiencia energética, y replanteando las recomendaciones y normas de la iluminación para que incluyeran valores mínimos exigidos mejor definidos. A partir de los años noventa del siglo pasado las consecuencias negativas de las emisiones de CO₂ (dióxido de carbono) para el cambio climático también se observan claramente.

Cambio climático

La radiación solar atraviesa la atmósfera y calienta la superficie de la tierra; como consecuencia, la tierra emite radiación infrarroja. La atmósfera absorbe parte de esta radiación, que de esta forma no pasa totalmente al espacio (figura 9.1). Este hecho causa un calentamiento gradual del medio terrestre. Los componentes principales de la atmósfera, oxígeno y nitrógeno, son transparentes para la radiación infrarroja emitida, pero el dióxido de carbono tiene un efecto de absorción mucho más fuerte. El aumento de las emisiones de dióxido de carbono refuerza la absorción de radiación infrarroja en la atmósfera y así se crea el “efecto invernadero”. Las centrales que generan electricidad a partir de combustibles fósiles emiten gran cantidad de CO₂, el principal gas de efecto invernadero.



En la actualidad, la iluminación es responsable del 19 por ciento de la electricidad utilizada en el mundo y, en consecuencia, de una parte importante de las emisiones de CO₂.



Algunos productos de iluminación utilizan sustancias peligrosas como el mercurio. Es necesario maximizar constantemente la eficiencia energética y la fiabilidad de los productos, minimizar el uso de sustancias peligrosas, reducir los residuos (también mediante el reciclaje), y evitar la contaminación luminosa para crear una mayor sostenibilidad. Se debe lograr el “equilibrio entre los efectos positivos de la iluminación y el impacto negativo de la iluminación en el medio ambiente”. El equilibrio solo se puede lograr si se tienen en cuenta de forma profesional y responsable todas las disciplinas que forman parte de la cadena de iluminación. Así mejorará la calidad de vida de las personas y la calidad del mundo en que vivimos.

Haga clic en la imagen para reproducir la animación...



10 Index

$\frac{1}{4} \lambda$	19	Coordenadas de cromacidad	40
Absorción	17	Corriente eléctrica	10
Adaptación	32	Cortisol	46
Adaptación cromática	43	Costes de funcionamiento	54
Agotamiento	47	Costes de instalación	54
Agudeza	33	Costes de inversión	54
Agudeza visual	33	Costes de mantenimiento	54
Ajuste	31	Costes de sustitución de lámparas	54
Alumbrado público	16, 48	Costes energéticos	54
Amortización	54	Curva de la sensibilidad del ojo	20
Ángulo sólido	21	Curva del cuerpo negro	41
Ánimo de las personas	38	Curva de sensibilidad espectral biológica no visual	47
Anodo	10	Depresión invernal	47
Apariencia de color	42, 44	Deslumbramiento	50
Arcoíris	7	Deslumbramiento indirecto	50
Área aparente	23	Deslumbramiento por luz natural	50
Aspectos de la visión	37	Deslumbramiento superior	36
Atención	46	Dicroico	19
Azúcar en la sangre	46	Diodo emisor de luz	13
Balasto electrónico	10	Dirección	21
Bastones	30	Diseño de iluminación	48
Cambio climático	55	Dispositivo de arranque	10
Candela	21	Dispositivo limitador de la corriente	10
Candela por metro cuadrado	22	Distribución de luz	27
Cantidades de luz	23, 27	Distribución espacial de la luz	48
Catarata	37	Distribución espectral de energía	12
Cátodo	10	Distribución luminosa	53
Cebador	10	Driver	13
Células fotovoltaicas	27	Economía de la luz	54
Células ganglionares	29, 30, 46	Efecto biológico no visual	46
Chips	14	Efecto cebra	49
Chips de diodos	13	Efecto invernadero	55
Ciclo halógeno	9	Efecto Purkinje	31
CIE	40, 41	Efectos emocionales de la luz	37
Clasificación de la reproducción del color	44	Eficacia luminosa	21
Club de Roma	55	Electrodo	10, 11
Colisión elástica	10	Electroluminiscencia	13
Colisión ionizante	10	Electrones libres	10, 12
Color	39	Emisión de CO ₂	55
Colores complementarios	39	Equipos eléctricos	10
Colores primarios	39	Esfera de Ulbricht	28
Colores secundarios	39	Espectro	6, 39, 42, 45
Colores verdaderos	43	Espectro continuo	42, 43, 44
Combinación de colores	39	Espectro discontinuo	42, 43
Combinación de colores aditiva	39	Espectro electromagnético	6
Comodidad visual	33	Familias de lámparas	15
Conos	29	Fibras de vidrio	17
Contraste	33	Filamento	9
Contraste de color	35	Filtro de color	19, 27
Contraste de luminancia	33	Filtros	17
Controlador	13, 14	Flujo	20
Convergencia	32	Flujo luminoso	21

Fluorescencia	12	Lámparas incandescentes	9
Fósforo	14	Lámparas sin electrodos	11
Fotocélula	27	Lámparas TL	11
Fotón	7	LED blancos	14
Fóvea	29	LED de fósforo	14
Frecuencia	6,7	Ley de la inversa del cuadrado	24
Gafas de lectura	37	Ley del coseno	24
Glándula pineal	46	Limitación del deslumbramiento	50
Goniofotómetro	27	lm/W	21
Halógeno	9	Longitud de onda	6
HID	11	Lumen	20
Hormona de la energía	46	Luminancia	48
Hormona del sueño	46	Luminancímetro	28
Hormonas	46	Luminarias	27, 36, 53
Humor vítreo	37	Luminosidad	23
IEC	21	Lux	21
Iluminación de calidad	48	Luz de escaparate	51
Iluminación decorativa	51	Luz de relleno	51
Iluminación de instalaciones deportivas	49	Luz difusa	52
Iluminación de túneles	32	Luz direccional	51
Iluminación dinámica	53	Luz indirecta	52
Iluminancia	21	Luz natural	20, 48
Iluminancia cilíndrica	25	Luz principal	51
Iluminancia horizontal	25	Luz y salud	46
Iluminancia semicilíndrica	26	Max Planck	7
Iluminancia semiesférica	26	Maxwell	5
Iluminancia vertical	25	Medidores de luz	27
Impresión CMYK	40	Medio ambiente	55
Incapacidad visual por deslumbramiento	36	Melatonina	46
Incomodidad visual por deslumbramiento	36	Mercurio	55
Índice de refracción	18	Mercurio de alta presión	11
Índice de reproducción cromática	43	Mercurio de baja presión	11
Índice de reproducción del color	45	Mezcla sustractiva	40
Inductivo	10	Microonda	12
Infrarrojo	19, 54	Nanómetro	6
Intensidad	21	Nivel de iluminación	48
Intensidad luminosa	24	Núcleo supraquiasmático	46
Interferencia	19	Ojo	20
Ionización	10	OLED	15
ipRGC	46	Onda electromagnética	5
Iris	29	Pacientes con Alzheimer	47
Isolíneas de temperatura de color.	41	Pantalla de ordenador	50, 53
luminancias naturales	48	Pérdida por absorción	13
Jet lag	47	Persianas	50
Kelvin	9	Personas mayores	32, 37, 47
Kruithof	38	Pigmentos	31
Lámpara LED	14	Pintura	17, 40
Lámparas de baja presión compactas	11	Plano de trabajo	25, 49
Lámparas de descarga	11	Plano horizontal	48, 49
Lámparas de descarga de alta intensidad	12	Plano vertical	49
Lámparas de descarga de alta presión	11	Poder de refracción	31
Lámparas de halógenos metálicos	11	Polvo fluorescente	12
Lámparas de inducción	11	Prisma	7
Lámparas de mercurio de baja presión	11	Proceso de inducción	11
Lámparas de microondas	12	Propiedades de las lámparas	9
Lámparas fluorescentes	11, 45	Psicológico	37
Lámparas halógenas	9	Pupila	29
Lámparas halógenas de haz frío	19	Radiación electromagnética	5, 6, 8, 12

Radiador de cuerpo negro	41	Tubo de descarga	10
Radiadores de descarga	10	Tungsteno	9
Radiadores de estado sólido	8	Ultravioleta	6,7
Radiador térmico	8,39	Uniformidad	49
Rayos cósmicos	6	Unión p-n	13
Rayos gamma	6	UVA	6
Rayos X	6	UVB	6
Reciclaje	55	UVC	6
Reconocimiento facial	26,49	Valor de color	40
Reflectancia	16	valor R_a	44
Reflexión	48,50	Velocidad de la luz	6
Reflexión difusa	16	Vida útil	9, 11, 13, 15, 54
Reflexión especular	16	Visión escotópica	30
Reflexión interna total	17	Visión fotópica	30
Reflexión mixta	17	Visión mesópica	31
Refracción	18	$V(\lambda)$	20, 31
Regulación	13, 46, 54		
Reloj biológico	46, 47		
Rendimiento visual	33		
Reproducción del color	43		
Retina	29		
Revestimiento dicroico	19		
Ritmo cardiaco	46		
Ritmo de 24 horas	46, 47		
Ritmos circadianos	46		
Ritmo sueño-vigilia	47		
SAD,	47		
Salud	46		
Semiconductor	13		
Semiconductor inorgánico	15		
Sensibilidad de color	27, 37		
Sensibilidad de contraste	34, 37		
Sensibilidad del ojo	20		
Sensibilidad espectral	20		
Sensibilidad espectral biológica no visual	47		
Sensibilidad espectral del ojo	20		
Sodio	11		
Sol	8		
Somnolencia	46		
Sostenibilidad	55		
Sueño	46		
Sulfuro	12		
Superficie de carretera	17		
Sustancias peligrosas	55		
Temperatura corporal	46		
Temperatura de color	41		
Temperatura de color correlacionada	41		
Teoría cuántica	5, 7		
Terapia	47		
Tiempo de observación	34		
Trabajo por turnos	47		
Transmisión	17		
Transmisión por televisión	49		
Trastornos afectivos estacionales	47		
Trastornos alimenticios	47		
Trastornos del reloj biológico	47		
Triángulo de color	41		
Triángulo de colores de la CIE	40, 41		

Sobre los autores

Profesor Wout van Bommel, MSc (Máster en ciencias)

Wout van Bommel ha trabajado 37 años en Philips Lighting Eindhoven en distintas funciones relacionadas con aplicaciones de iluminación. Además, ha sido responsable del centro internacional de aplicaciones de iluminación (LiDAC) de la empresa. Algunos conceptos que se utilizan actualmente en normas internacionales para la iluminación se basan en sus trabajos de investigación. Entre los años 2003 y 2007 ocupó el cargo de Presidente de la Comisión Internacional de la Iluminación, CIE, y es miembro del consejo de la fundación holandesa “Luz y Salud”, SOLG. En 2004, Wout van Bommel fue nombrado Profesor Emérito de la Universidad de Fudan, Shanghái. Ha publicado más de 150 artículos sobre iluminación en publicaciones nacionales e internacionales y es el autor del libro “Road Lighting” (iluminación de carreteras). Ha recorrido el mundo presentando artículos y ha impartido clases en universidades y escuelas, además de dar conferencias en congresos.

En la actualidad y tras jubilarse de Philips Lighting, trabaja como asesor independiente en temas de iluminación y presta sus servicios a diseñadores de iluminación, investigadores, empresas, ayuntamientos y entidades públicas.

Abdo Rouhana MSc (Máster en Ciencias)

Abdo Rouhana, tiene doble nacionalidad canadiense y libanesa, se licenció en Ingeniería eléctrica por la Universidad de Montreal, Canadá. Tras obtener en 1983 su máster en la misma universidad, empezó a trabajar en Philips Lighting en Oriente Medio, convirtiéndose en especialista en aplicaciones de iluminación. Abdo ha sido responsable del diseño de muchos e impresionantes proyectos de iluminación en la zona. Ha simultaneado esta función con cargos clave en ventas y marketing. Actualmente, Abdo Rouhana es el director de la Philips Lighting University, Oriente Medio. Enseña iluminación y diseño de iluminación en importantes universidades de Oriente Medio y también ejerce una labor docente para Philips Lighting en otras partes del mundo, incluidas las oficinas centrales de Philips en Eindhoven.

Agradecimientos

El curso “Philips Lighting Correspondence Course” compilado hace años por Gerard Stoer (†) ha sido una importante fuente de información. Queremos dar las gracias a Yao Meng Ming, Sudeshna Mukhopadhyay, Gilbert Ngu, Ravi Shukla, Steven Myers, Mark Roush, Matthew Cobham y Joan Mcgrath por leer y revisar el manuscrito.

También queremos agradecer el trabajo de edición de Derek Parker y la revisión de la traducción realizada por Mar y Antonio Gandolfo (español), Isac Roizenblatt y Acacia Caitano (portugués), Yao Meng Ming (chino), Philippe Perrin y Christophe Bresson (francés).



©2011 Koninklijke Philips Electronics N.V.

Todos los derechos reservados. Queda prohibida la reproducción total o parcial sin la autorización previa por escrito del titular de los derechos de propiedad intelectual. La información presentada en este documento no forma parte de ningún presupuesto o contrato, se considera exacta y fiable, y está sujeta a modificación sin previo aviso. La editorial no asume responsabilidad alguna por las posibles consecuencias de su uso. Su publicación no conlleva ni implica la licencia de ninguna patente ni de ningún otro derecho de propiedad intelectual o industrial.

Fecha de publicación: Septiembre de 2011 / 3222 635 66536

Impreso en los Países Bajos.