

©signify

La ciencia de la iluminación

Una guía sobre la naturaleza y el comportamiento de la luz

Wout Van Bommel y Abdo Rouhana

A photograph of a musician performing on stage. The musician is seen from the side, wearing a dark t-shirt and jeans, playing an electric guitar. A microphone on a stand is positioned in front of him. The background is dark with stage lights, including a prominent bright light source on the left and several smaller lights on the right. The overall atmosphere is that of a live music performance.

Revelando
los
secretos
de la luz

La conexión entre el aspecto humano y el técnico es lo que hace de la iluminación un tema tan atractivo y especial, y por ello interesa 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 beneficiarían de contar con unos conocimientos básicos sobre la luz y el alumbrado

En este libro 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 las cosas, 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.

Lighting Academy

<https://www.learning.signify.com/sla/s/>



Luz y radiación

1

¿Cómo se produce la luz?

2

¿Cómo se direcciona y apantalla la luz?

3

Magnitudes y unidades

4

Luz y visión

5

Luz y color

6

Luz y salud

7

Calidad de la iluminación

8

A woman in athletic wear is captured in a dynamic stretching pose on a wooden deck at night. She is wearing a blue jacket over a green top, black leggings, and colorful sneakers. Her hands are clasped together on her right knee, and she is looking off to the side with a focused expression. The background is dark, featuring a prominent horizontal line of bright green bokeh lights and a metal railing. The overall atmosphere is energetic and modern.

Luz y radiación



- 8 Teoría de las ondas electromagnéticas
- I0 Características de las ondas electromagnéticas
- II El espectro electromagnético

15 Teoría cuántica

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.

Teoría de las ondas electromagnéticas

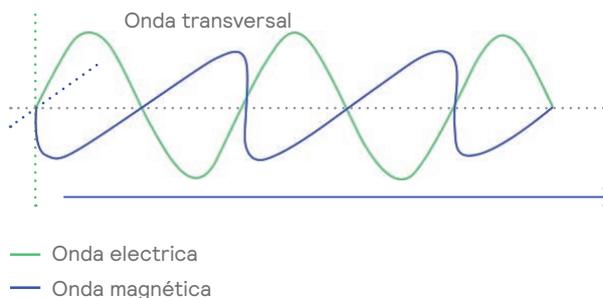
Maxwell ofrece la definición más sencilla, al considerar la luz como una radiación electromagnética formada por ondas que se transmiten en todas las direcciones desde su origen. Las ondas de luz no están formadas por partículas materiales, como las ondas sonoras, sino por ondas de los campos eléctrico 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.

Solo la luz puede viajar por el vacío. Imagina lo que pasaría si el sonido pudiera viajar en el vacío: En la tierra podría oírse el ruido extremadamente alto de todas las erupciones solares y de las estrellas.

Fig. 1.1. Ondas de sonido longitudinales.



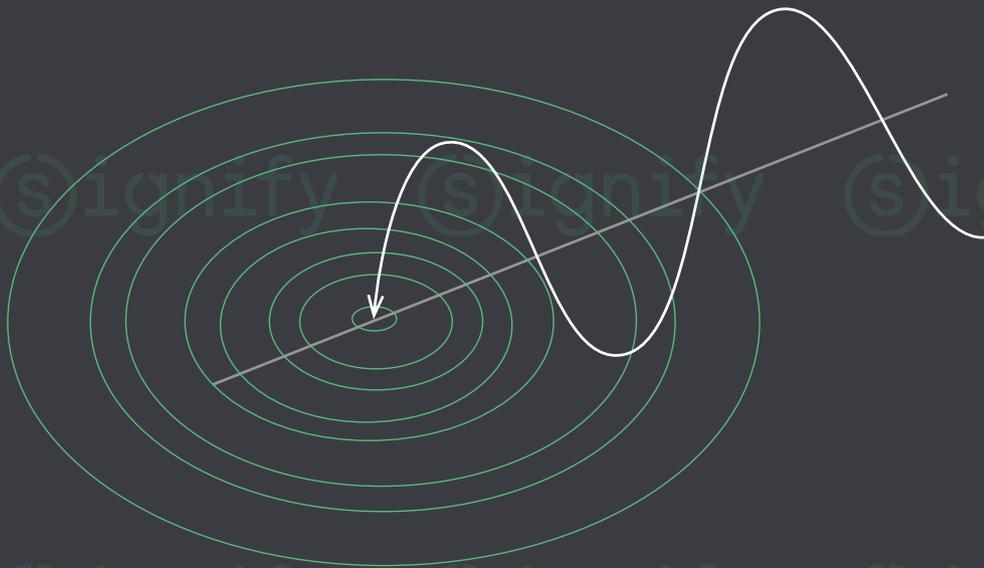
Fig. 1.2. Ondas electromagnéticas transversales.



La vibración transversal se puede demostrar muy fácilmente tirando una piedra a un estanque.



Fig. 1.3. Ondas transversales en el agua



Aprenda más sobre los
diferentes tipos de ondas

[Ver más >>](#)

Características de las ondas electromagnéticas

La distancia entre la cresta 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 (f). 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:

$$C = \lambda \cdot f$$

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 constante del universo. La velocidad de la luz (v) es casi de 300.000 km por segundo.

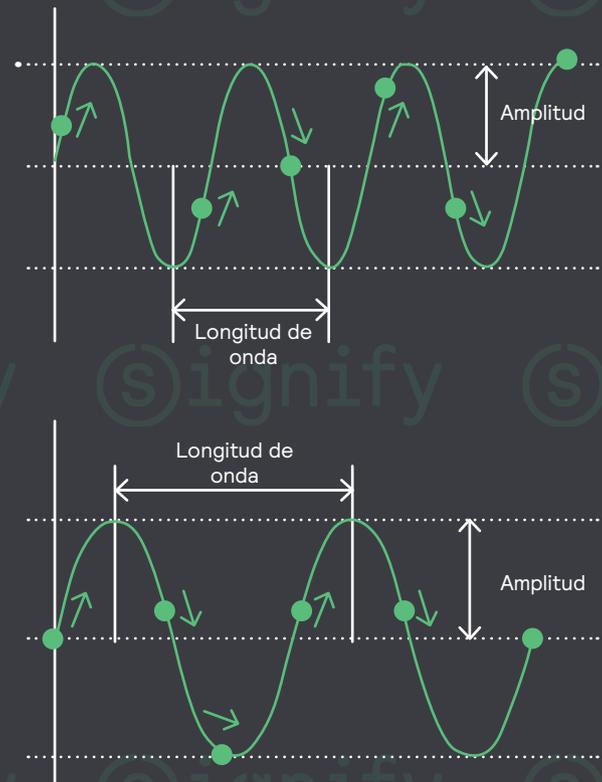
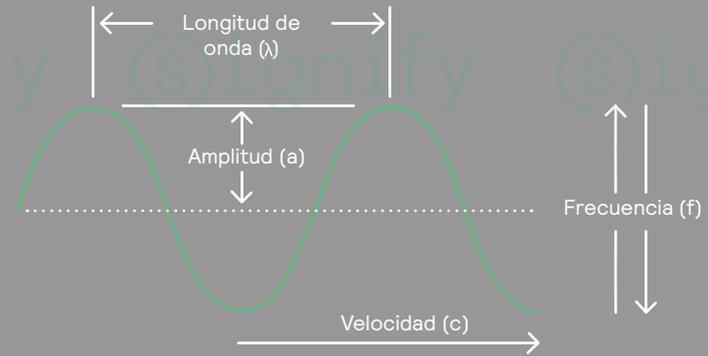


Fig. 1.4. Características de las ondas.

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.

Aprenda más sobre el espectro electromagnético [Ver más >>](#)

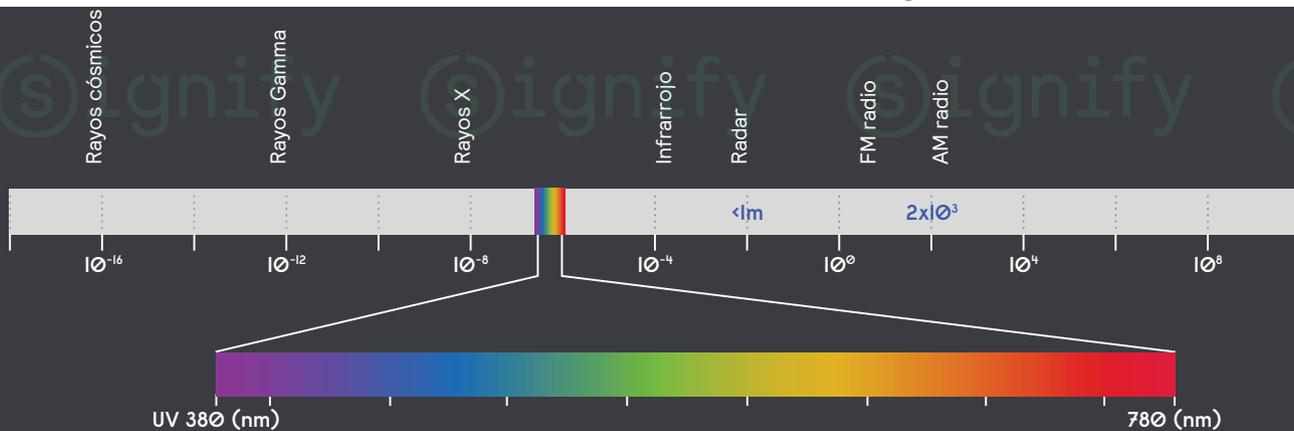


Fig. 1.5. El espectro electromagnético.

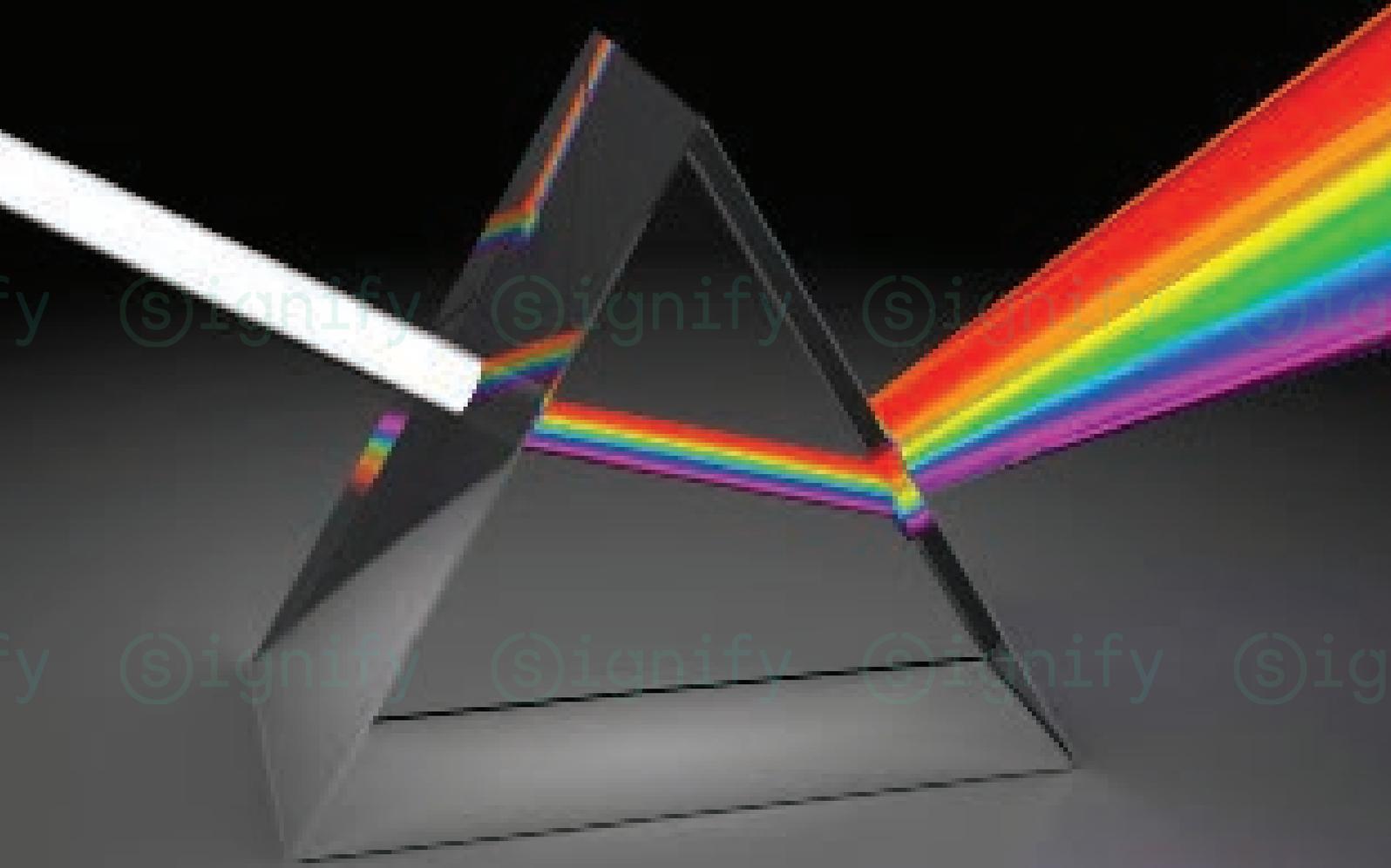


Image 1.1. Separación de la luz blanca en un prisma.

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:

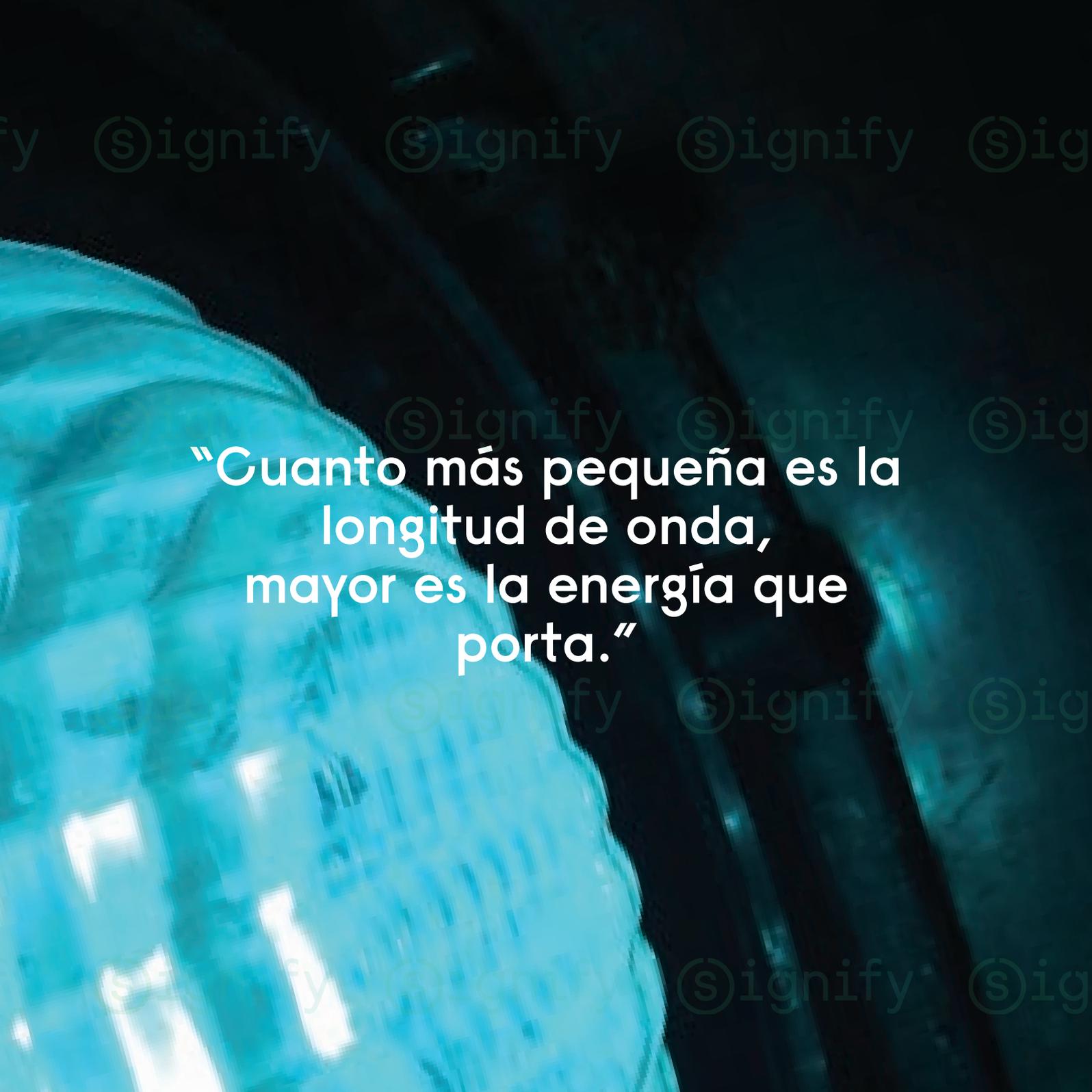
Violeta	380	-	435 nm
Azul	435	-	500 nm
Verde	500	-	565 nm
Amarillo	565	-	600 nm
Naranja	600	-	630 nm
Rojo	630	-	780 nm

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 "Magnitudes y unidades".

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.

Aprenda más sobre
la función del prisma

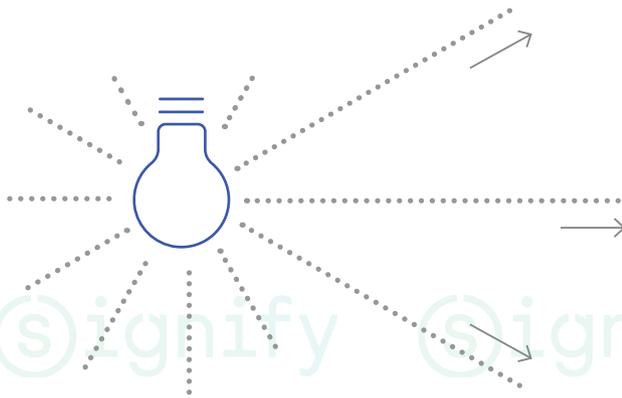
[Ver más >>](#)



“Cuanto más pequeña es la longitud de onda, mayor es la energía que porta.”

Teoría cuántica de la luz

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



$$E = h \cdot f \quad \text{or} \quad E = h \cdot c / \lambda$$

Fig. 1.6. 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:

donde:

E = energía (julios)

f = 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.

A young girl with dark, curly hair is looking upwards with a curious expression. Her face is illuminated from above, creating a strong contrast with the dark background. The text '¿Cómo se produce la luz?' is overlaid in white, bold font across the center of her face.

**¿Cómo se
produce la luz?**

2

19 Radiadores Térmicos

21 Lámparas incandescentes

21 Lámparas halógenas

22 Descarga en gas

22 Principio de la descarga en gas

24 Equipos electrónicos o electromagnéticos

24 Lámparas descarga baja presión

25 Lámparas descarga alta presión

27 Fluorescencia

28 Temperatura de color correlacionada

28 Distribución espectral de la energía

31 Estado sólido

31 Principio de funcionamiento

32 Drivers

32 LEDs

34 OLEDs

36 Tipos de lámparas

36 ¿Por qué hay tantos tipos de lámparas?

37 Familias de lámparas

La luz se puede generar de distintas formas

Las fuentes de luz artificiales disponibles hoy en día son fundamentalmente de tres tipos:

- Radiadores térmicos
- Radiadores de descarga
- Radiadores de estado sólido



Mediante fenómenos naturales obtenemos luz procedente del sol, las estrellas, los relámpagos, etc.,



también se puede generar por diversos métodos artificiales

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.

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 .



Color temperatura

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:

Aprenda más sobre la temperatura de color.

$$K = ^\circ\text{C} + 273$$
$$K = (^\circ\text{F} + 460) \times 5/9$$

[Ver más >>](#)

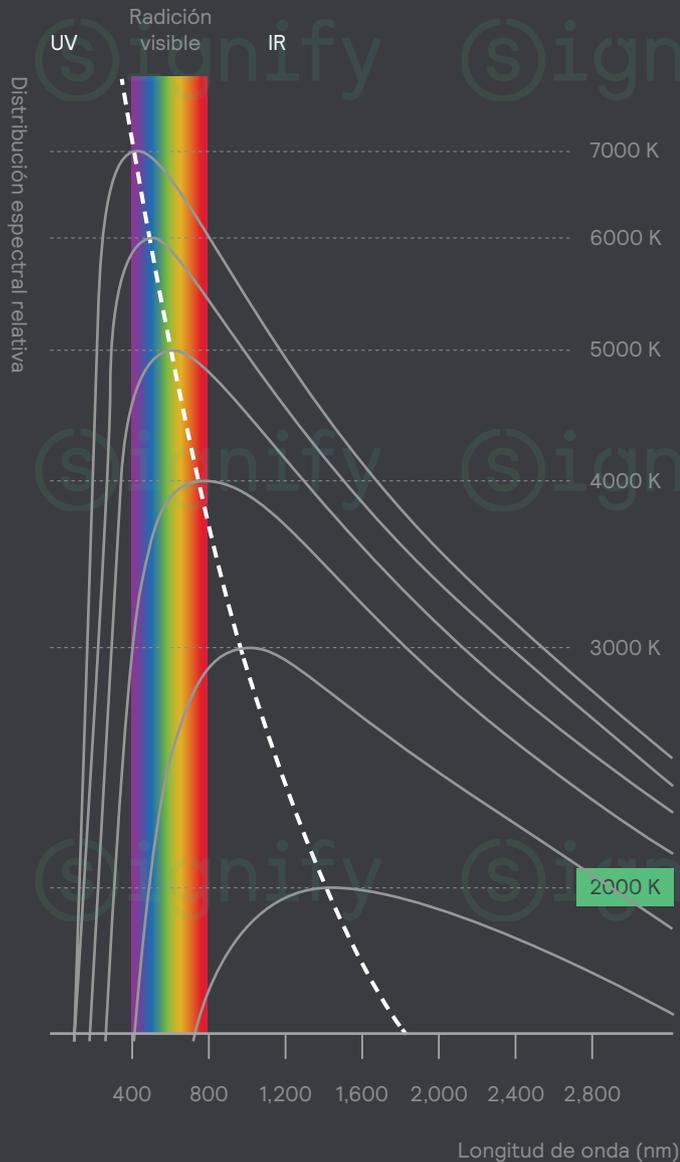


Fig. 2.1. Curvas de distribución de la energía de radiadores de cuerpo negro de distintas temperaturas.

La llama de una vela (formada por partículas de carbono resplandecientes 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. 2.1. 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 las temperaturas comprendidas entre los 3700K y los 7600K este pico se encuentra en la región visible.



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 2.1 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 % 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



Lámparas incandescentes halógenas

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 6.000 horas.

Aprenda más sobre las características de las lámparas incandescentes y halógenas

[Ver más >>](#)

Descarga en gas generación de luz

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.

Aún así, 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 2.2). Es lo que sucede, por ejemplo, en las conocidas lámparas fluorescentes y otras lámparas de descarga, y también en la naturaleza, en los relámpagos.

Principio de descarga

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 2.2). 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:

Cátodo

Ánodo



Fig. 2.2. Haz de electrones e iones en un tubo de descarga moviéndose a alta velocidad hacia los electrodos, es decir, ánodo y cátodo respectivamente

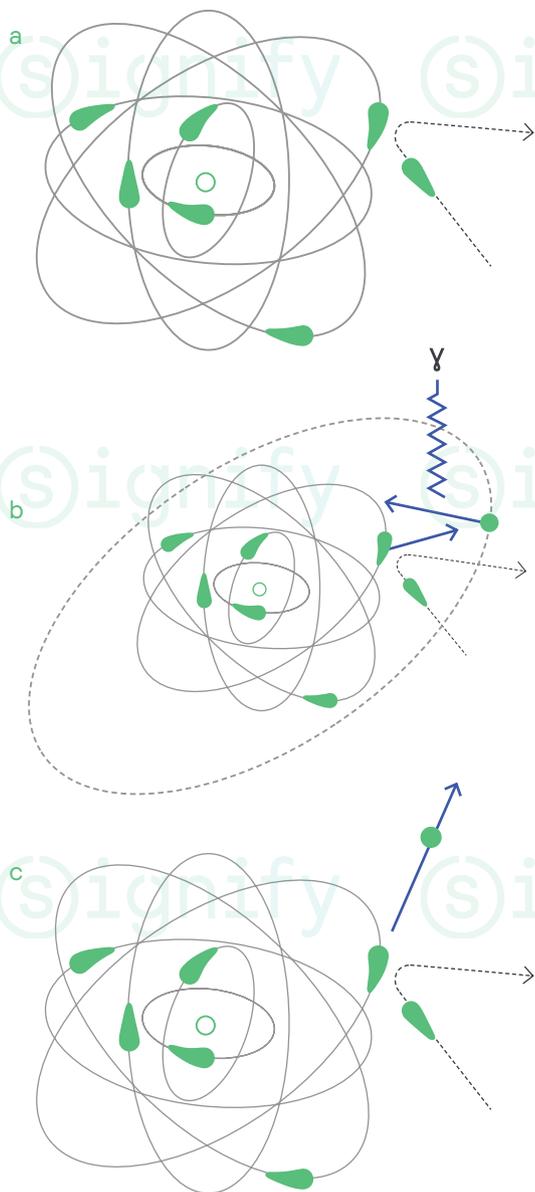


Fig. 2.3a, b and c. Colisión elástica, de excitación e ionizante de un electrón libre con un átomo de gas.

Fig. a. Si la velocidad es relativamente baja, el átomo absorberá parte de la energía cinética del electrón, pero su estructura no cambiará (Fig 2.3 a). Es lo que se conoce como “colisión elástica” y produce un aumento de la temperatura del gas.

Fig. b. Si la velocidad es moderada, la colisión expulsará uno de los electrones del átomo del gas temporalmente a una órbita superior de mayor energía (Fig 2.3 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, infrarrojo o ultravioleta del espectro, dando lugar a la generación de luz visible, calor o radiación ultravioleta, respectivamente.

Fig. c. Si la velocidad es alta, uno de los electrones externos del átomo de gas podría ser expulsado por completo (figura 2.3 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 2.2). En su desplazamiento podrían colisionar con átomos neutros del gas y contribuir así al proceso de descarga.

Aprenda más sobre los conceptos básicos de las lámparas de descarga

[Ver más >>](#)

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 o equipo electrónico.

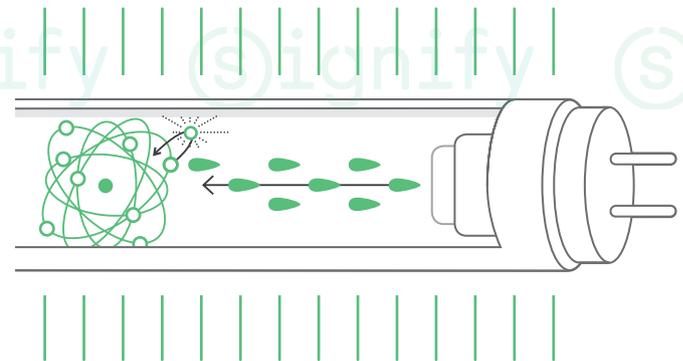
En la mayoría de las lámparas de descarga la diferencia de voltaje entre los electrodos exclusivamente no es suficiente para empezar a extraer electrones del cátodo. Se necesita un dispositivo de arranque que proporcione un pico de voltaje temporal que ayude a arrancar la lámpara. Los cebadores pueden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



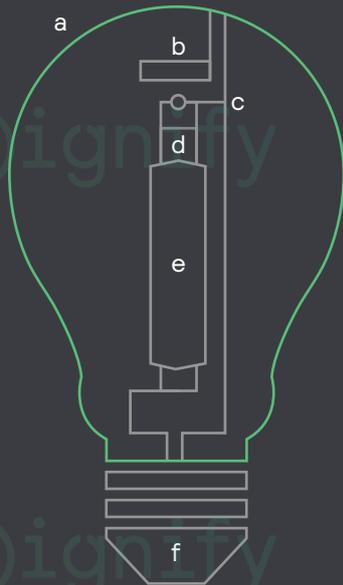
Lámparas de descarga de baja presión

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"

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.



- a. Bulbo
- b. Captador de impurezas
- c. Soporte tubo descarga
- d. Electrodo
- e. Tubo de descarga
- f. Casquillo



Aprenda más sobre las lámparas de descarga de alta intensidad y sus beneficios

[Ver más >>](#)

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 lámpara 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.

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 que se usa sodio, son lámparas de Sodio Alta presión (SON) o lámpara de Sodio Blanco (SDW). 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.



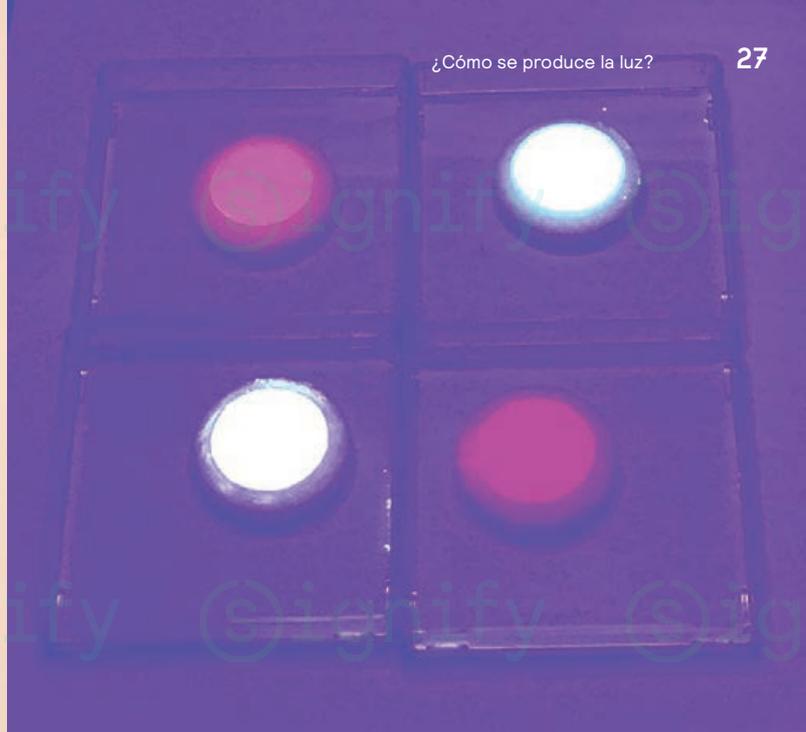


Fig. 2.3. Cuatro tipos de polvo fluorescente bajo una luz blanca.

los mismos polvos fluorescentes bajo radiación ultravioleta..

Fluorescencia

En algunas lámparas de descarga toda la radiación que se produce no está en el rango visible. En el caso de las lámparas de mercurio de baja presión, por ejemplo, la parte más importante de la radiación está en el rango 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 2.3). Este proceso se utiliza en las lámparas de mercurio de baja presión en forma de tubo que, por ello, se denominan tubos 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

Aprenda más sobre fluorescencia

[Ver más >>](#)

Temperatura de color correlacionada

Al principio de este capítulo 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..

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 2.4a 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 2.4 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”.



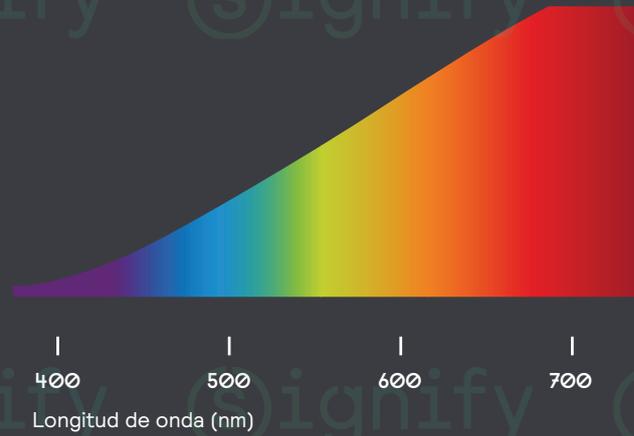
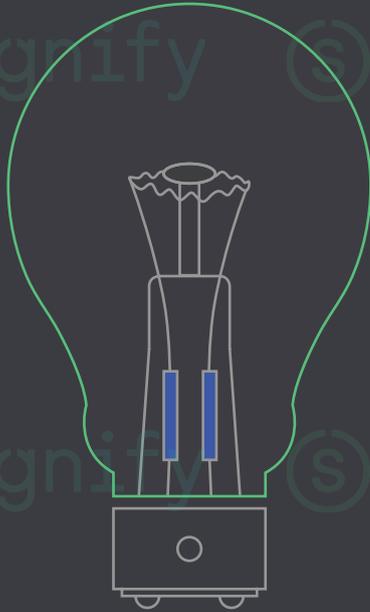


Fig. 2.4a. Ejemplo de distribución espectral de la energía de una lámpara incandescente

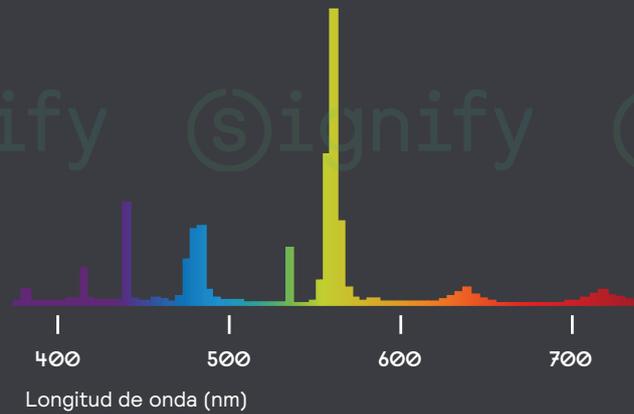
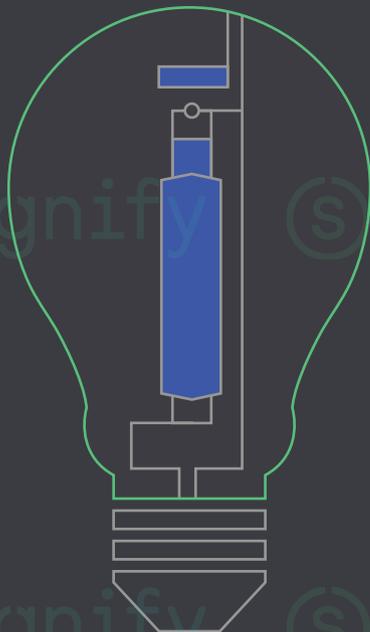


Fig. 2.4b. Ejemplo de distribución espectral de la energía de una lámpara de descarga en gas.



Sólido

Radiadores de estado sólido

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

Principio de funcionamiento

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 (tiene 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 (Fig. 2.5).

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

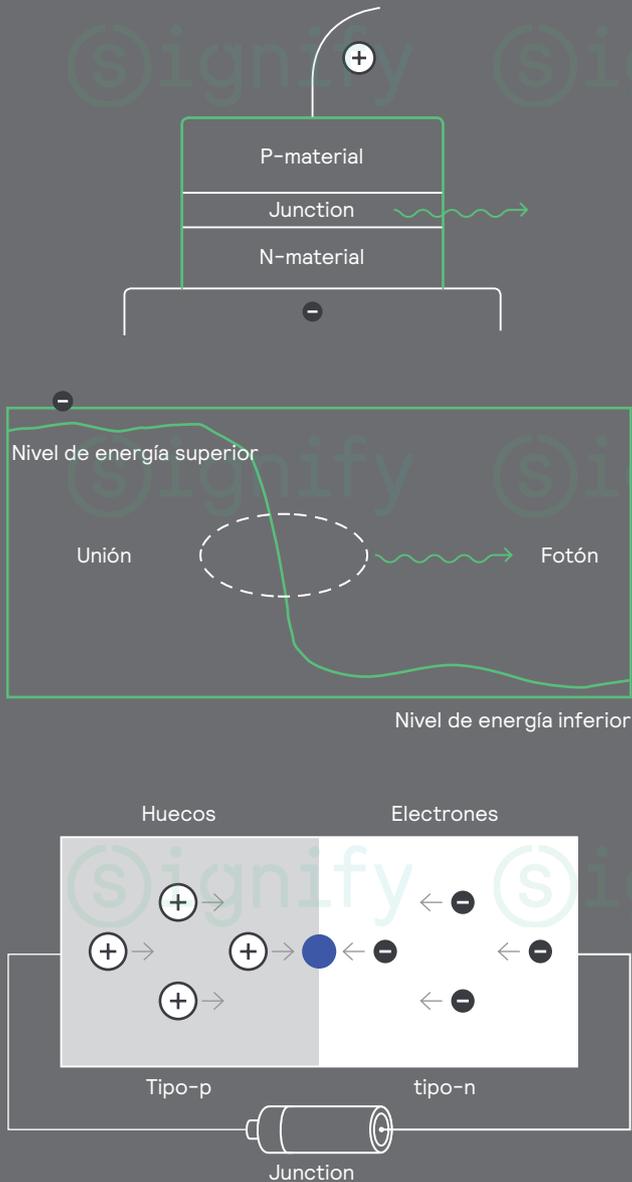


Fig. 2.5. Principio de funcionamiento de radiadores de estado sólido.

Drivers

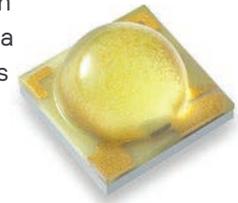
En los LED la corriente aumenta con gran rapidez cuando aumenta el voltaje, por lo que pequeñas fluctuaciones de voltaje pueden dañarlos. Es necesario usar un “controlador” denominado driver, que regule la energía de entrada al LED. El driver es un circuito electrónico que hace que la corriente sea constante 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%.

Aprenda más en el libro:
LEDs ebook.

[Ver más >>](#)

LEDs

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 (Fig. 2.7). 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.



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.

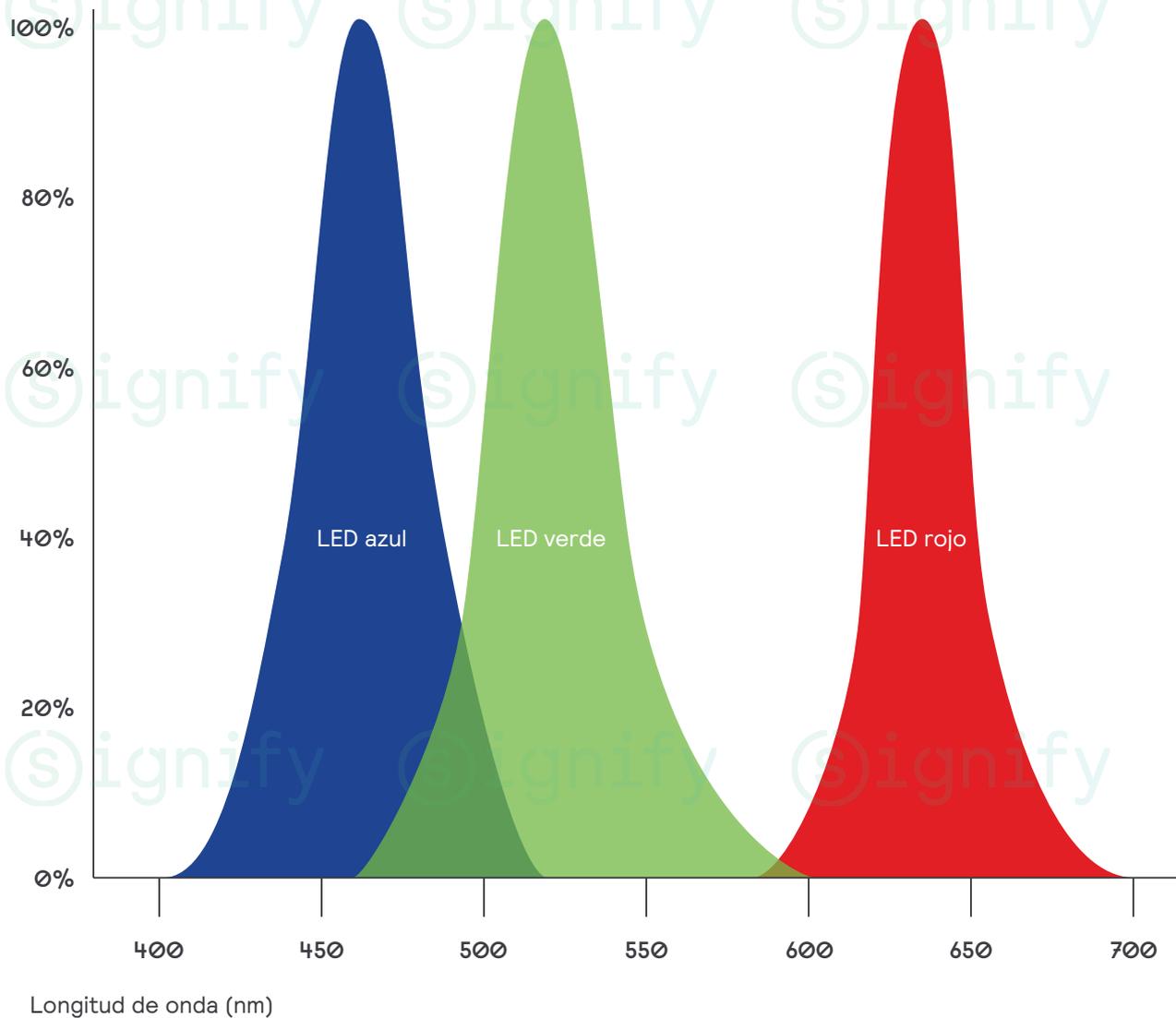
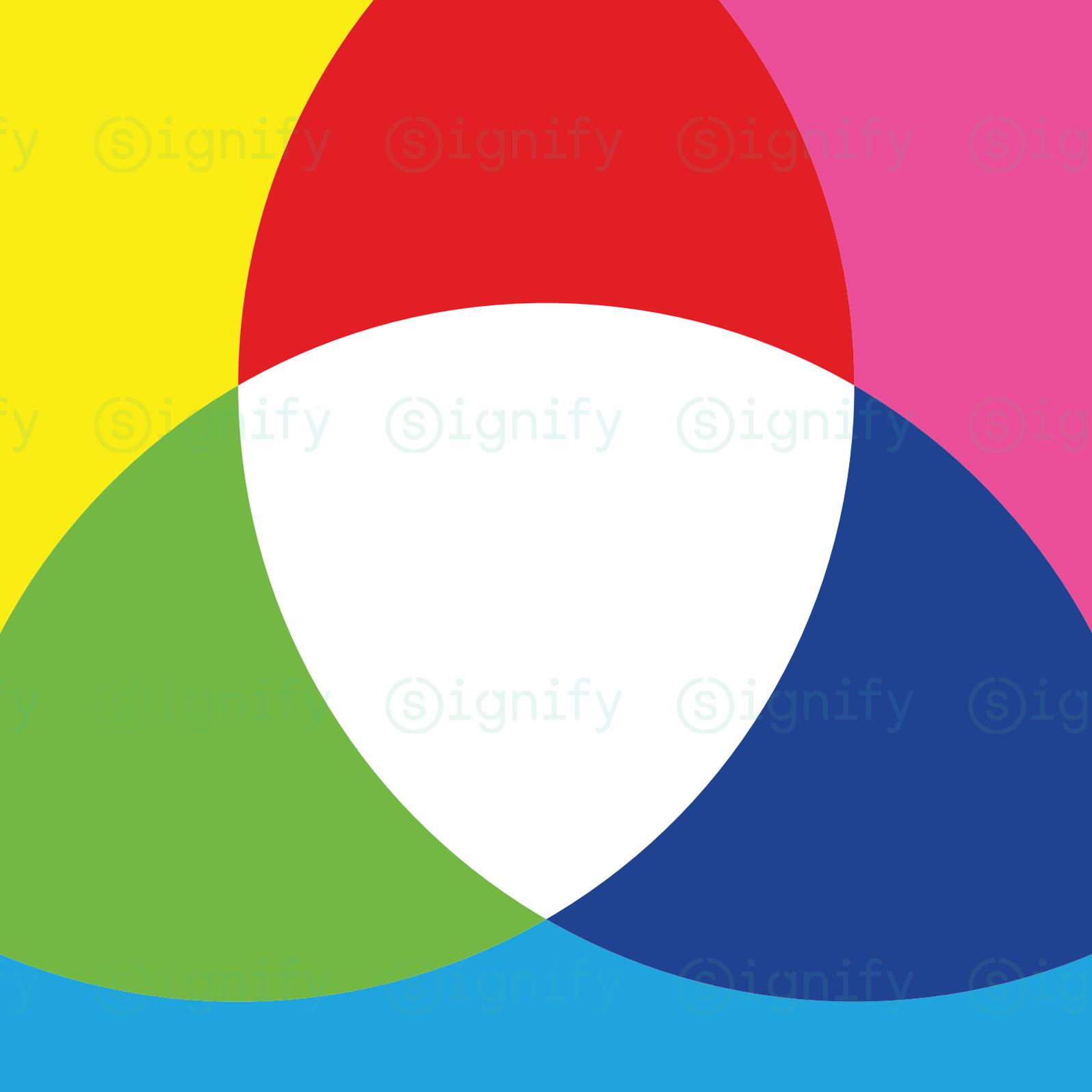


Fig. 2.6. Distribuciones espectrales típicas de energía de LED azul, verde y rojo



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. 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.

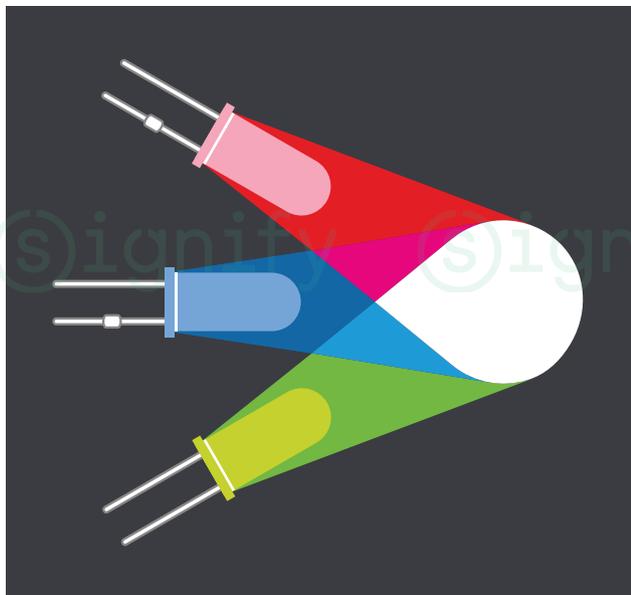


Fig. 2.7. Luz blanca mediante la combinación de LED de color rojo, verde y azul.

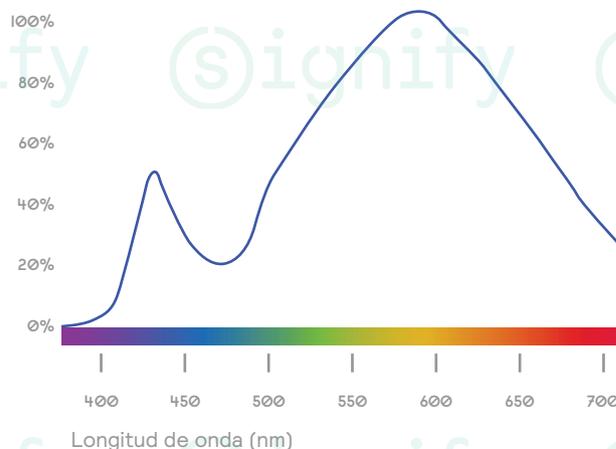


Fig. 2.8. Distribución espectral típica de un LED blanco por conversión de fósforos.

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. 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 2.8 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.

Aprenda más
sobre cómo
funcionan los LED

[Ver más >>](#)

Tipos de lámparas

Vamos a explicar por qué hay tantos tipos distintos de lámparas y cuál es la relación entre ellos.

¿Por qué hay tantos tipos de lámparas?

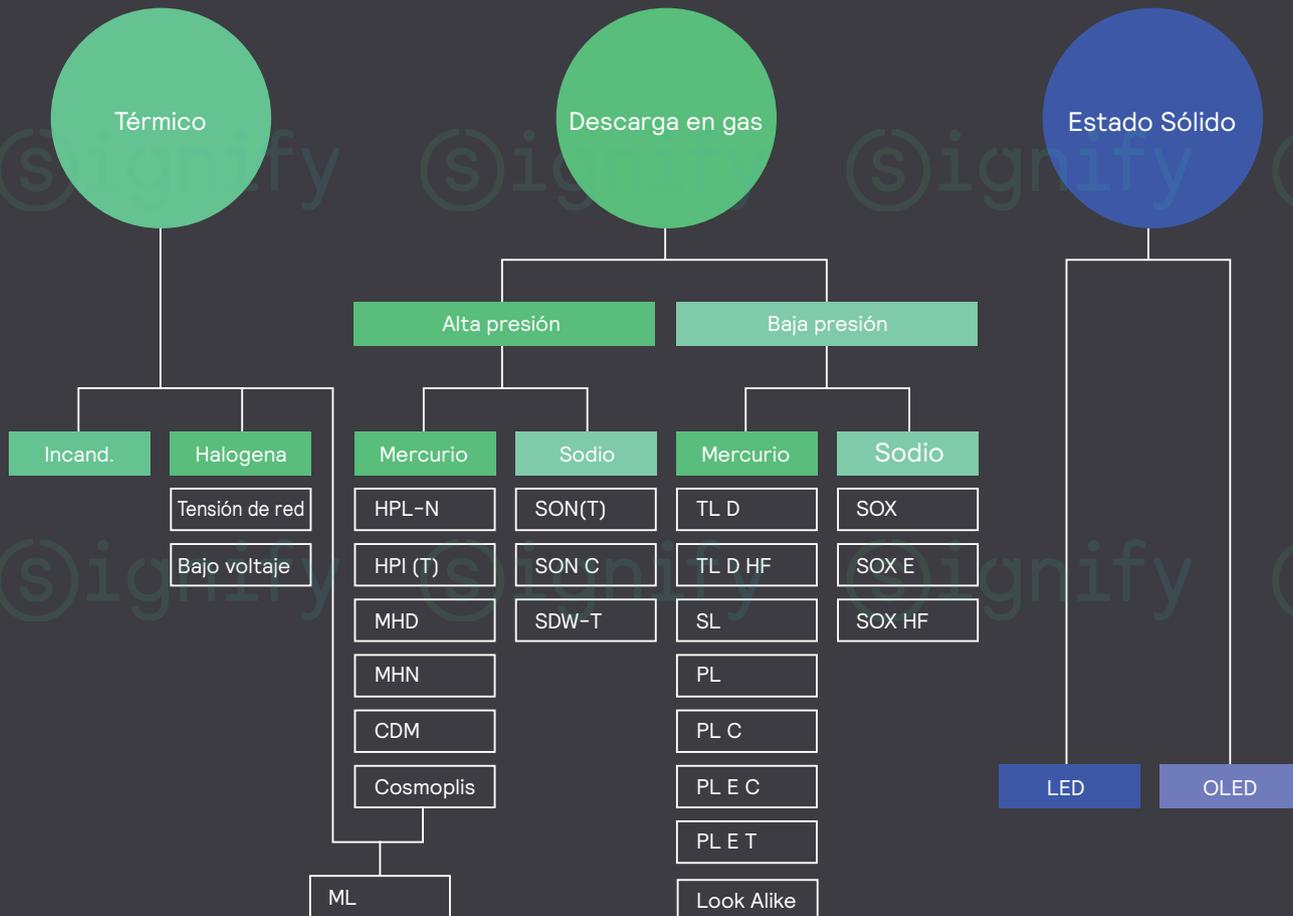
En el pasado se hablaba de lámparas y sistemas ópticos de las luminarias de modo independiente, pero hoy en día con la tecnología LED, con muy pocas excepciones las lámparas y las ópticas son un conjunto. Lo veremos con mayor detalle en el Capítulo 3, ¿Cómo se dirige y apantalla la luz? Los catálogos 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 la luz	Regulable si/no y rango
Rendimiento en color	Temperatura de funcionamiento
Vida	Sensibilidad a la temperatura
Depreciación luminosa	Posición de funcionamiento
Balasto si / no	Tiempo de encendido
Arrancador si / no	Reencendido instantáneo si/no
Distribución de la luz	Materiales respetuosos con el medioambiente

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

Familias de lámparas

No es fácil recordar todas las propiedades de tantos tipos de lámpara distintos. Este árbol de familia puede ayudar en este sentido





¿Cómo se
dirige y apantalla
la luz?

3

- 41 Reflexión
- 42 Reflexión difusa
- 42 Reflexión mixta
- 43 Reflexión interna total

- 44 Absorción

- 45 Transmisión

- 46 Refracción

- 47 Interferencia

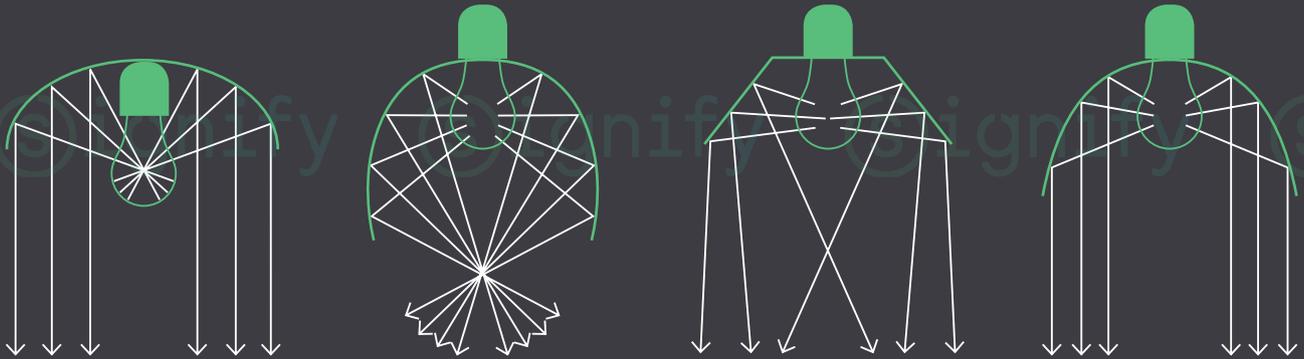


Fig. 3.2. Diferentes haces de luz en función de la forma de la óptica.

Aprenda más sobre
la absorción y
reflexión de la luz

[Ver más >>](#)

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.

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. 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).

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).

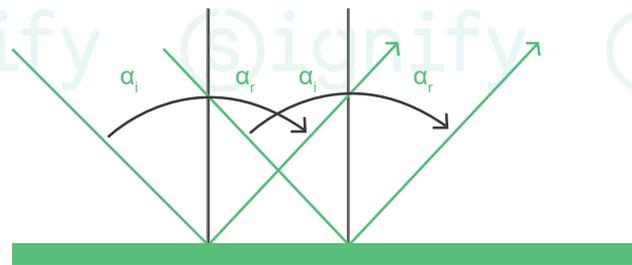


Fig. 3.1. Reflexión especular: el ángulo de la luz incidente es igual al ángulo de la luz reflejada

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.

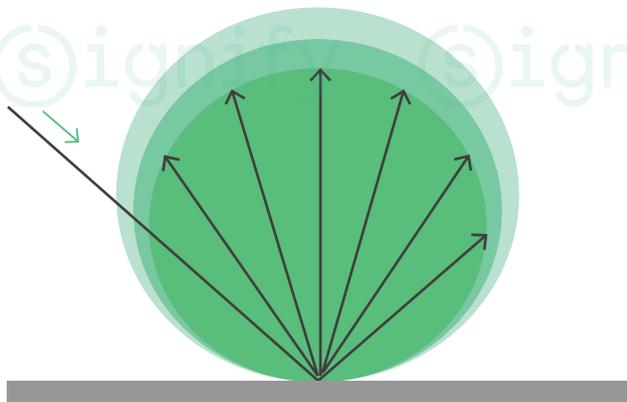


Fig. 3.3. Reflexión difusa

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, amartillada, 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.

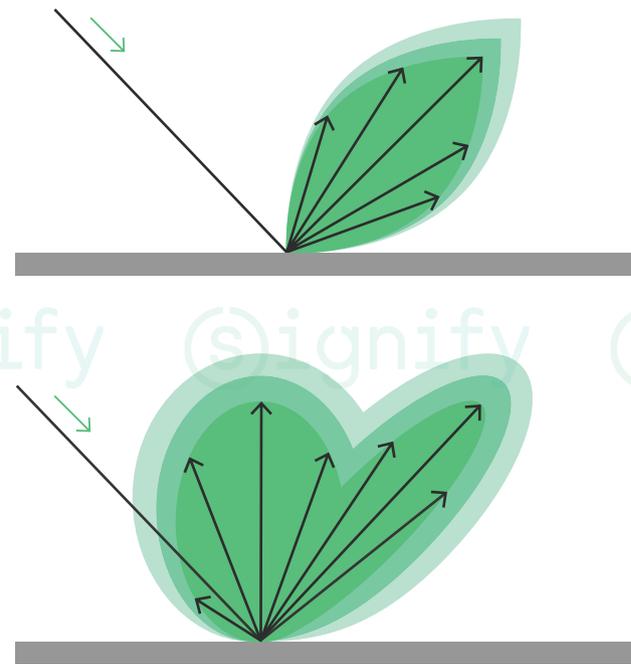


Fig. 3.4. Arriba: reflexión difusa;
Abajo: reflexión compuesta

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 fenómeno es ampliamente usado en la transmisión de datos digitales usando fibra óptica, pero también en algunos casos en instalaciones de iluminación de acento.

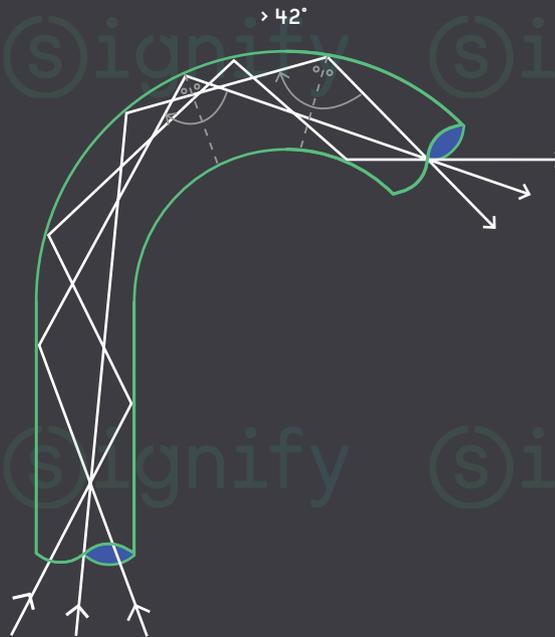


Fig. 3.5. Reflexión interna total en un tubo de fibra óptica

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.

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.

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).

$$\frac{\sin \alpha_1}{\sin \alpha_2} = \frac{n_1}{n_2}$$

donde n_1 = índice de refracción del aire (= 1)

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

Usar la refracción 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.

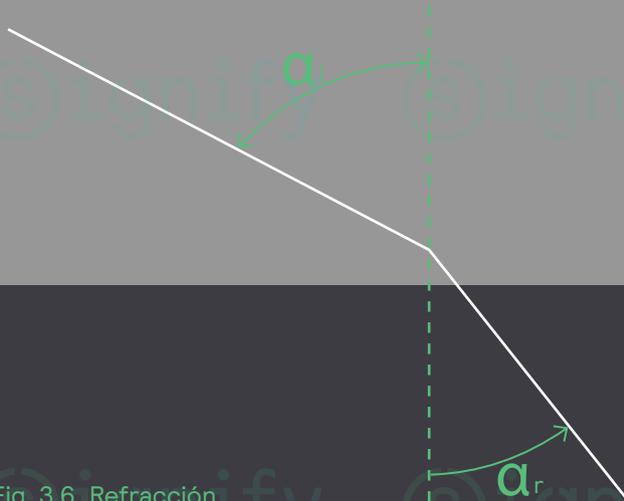


Fig. 3.6. Refracción.

Aprenda más sobre la refracción de la luz

[Ver más >>](#)

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 dicróicos. Así es como se fabrica el vidrio antideslumbramiento 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 dicróicos, 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 dicróicas 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.

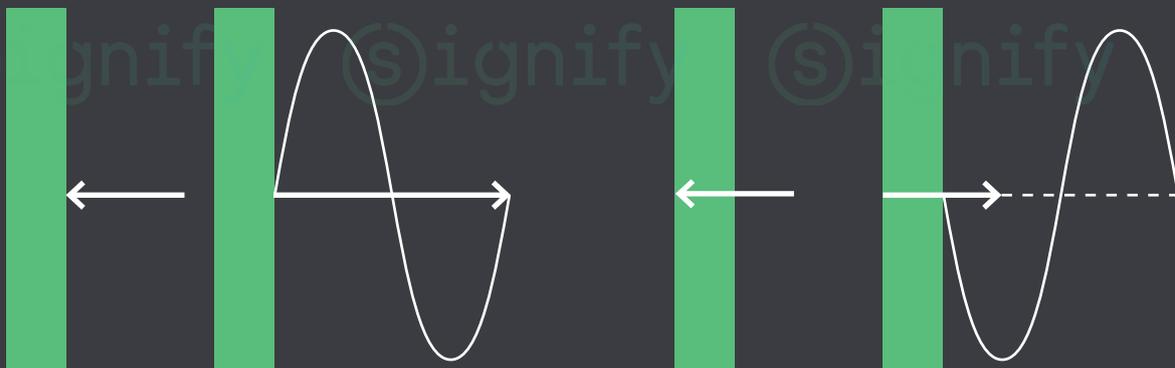


Fig. 3.7. Interferencia en una capa con un grosor $\frac{1}{4}$ de la longitud de onda de la luz

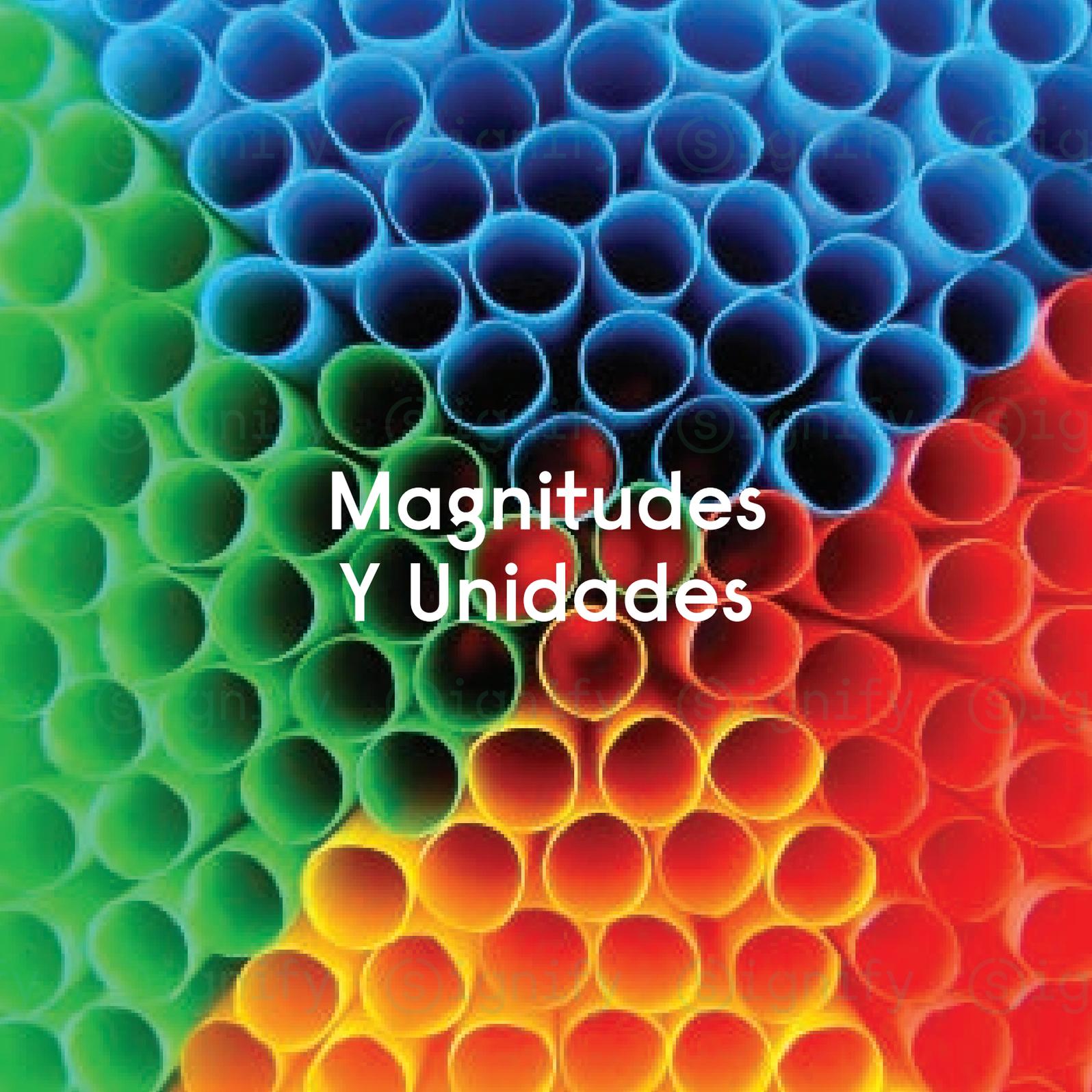




El efecto de interferencia se puede comparar al efecto de dos ondas en el agua que se juntan y amplifican una a la otra (como cuando se juntan los picos de dos ondas, ondas en fase), o debilitan la una a la otra (como cuando los picos de una onda se juntan a los valles de otra onda, ondas fuera de fase). 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 $1/4$ de la longitud de onda de la luz.

La razón es que, entonces, la onda reflejada en el lado interior (parte derecha de la figura 3.7) se ha desplazado una distancia adicional “arriba y abajo” por la anchura de $1/4$ de la capa en relación con la onda reflejada en el lado exterior (parte izquierda 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.

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 $1/2$ de una longitud de onda fuera de fase, porque se ha desplazado una distancia adicional “arriba y abajo” por la anchura de $1/4$ de la capa. Las dos ondas fuera de fase se cancelan una a la otra.



Magnitudes Y Unidades

4

- 53 ¿Por qué se usan unidades especiales?
- 54 La sensibilidad espectral del ojo y las unidades de luz
- 56 Magnitudes y unidades fotométricas
- 56 Flujo luminoso
- 57 Intensidad luminosa
- 57 Iluminancia
- 59 Luminancia
- 62 Relaciones prácticas entre cantidades de luz
- 62 Flujo luminoso e iluminancia media
- 63 Intensidad luminosa e iluminancia
- 68 Iluminancia y luminancia
- 68 Flujo luminoso e intensidad luminosa

- 70 Medición de cantidades de luz
- 71 Iluminancia
- 71 Intensidad luminosa
- 73 Flujo luminoso
- 73 Luminancia

A close-up photograph of a human eye. The iris is a vibrant green color and contains a clear reflection of a city skyline at night, with lights from buildings and a dark sky. The pupil is dark and centered. The surrounding sclera and eyelids are a warm, light brown color. The word "Sensibilidad" is written in a clean, white, sans-serif font across the center of the eye.

Sensibilidad

¿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.

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). Debemos decir que en niveles de iluminación muy bajos (por ejemplo, a la luz de la luna) la sensibilidad espectral del ojo es distinta.

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.

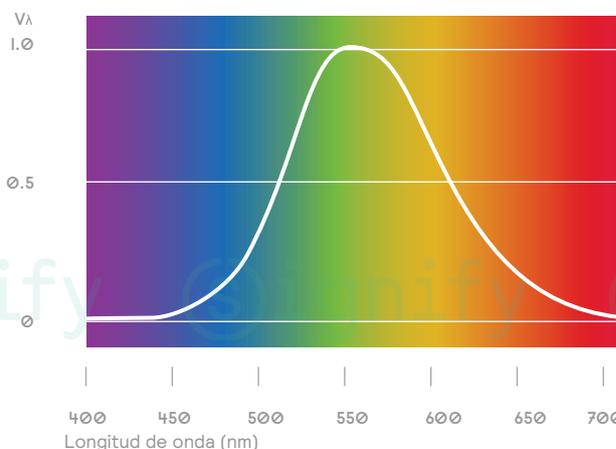


Fig. 4.1. Curva estándar de la sensibilidad espectral del ojo para visión fotópica $V(\lambda)$, según la CIE.



Espectral

Magnitudes y unidades fotométricas

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 específica en qué direcciones se irradia la luz (figura 4.2).

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 consumida 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 y hasta 180 lm/W para un LED de alto flujo.

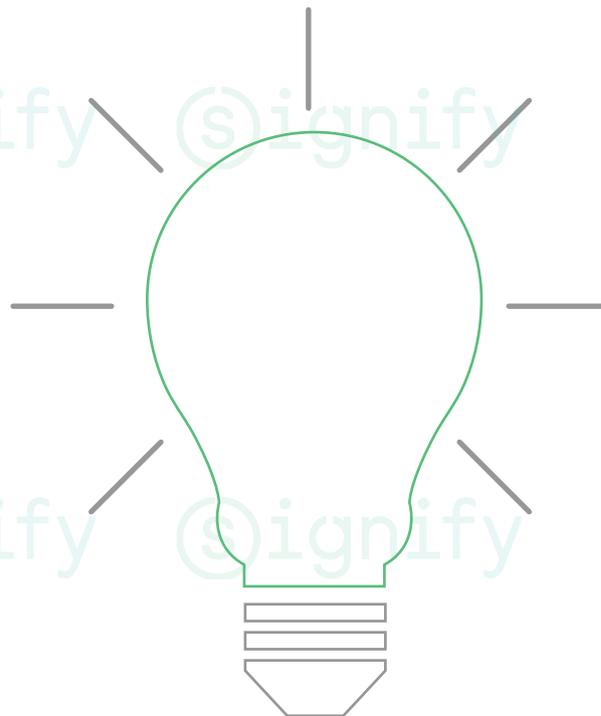


Fig. 4.2. Flujo luminoso: cantidad total de luz emitida.

Aprenda más sobre el valor del vatio

[Ver más >>](#)

Aprenda más sobre fotometría

[Ver más >>](#)

Aprenda más sobre flujo luminoso

[Ver más >>](#)

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 (Fig. 4.3.)

Aprenda más sobre la intensidad luminosa y
[Ver más >>](#)



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.

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.

$$E = \Phi / A$$

Aprenda más sobre iluminancia e iluminación
[Ver más >>](#)

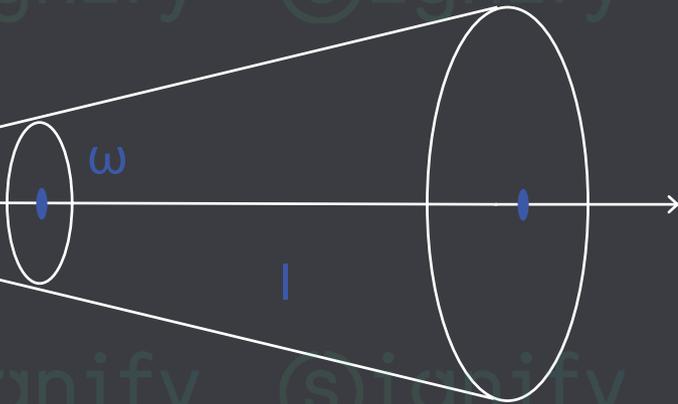
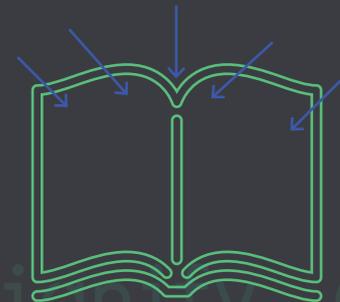


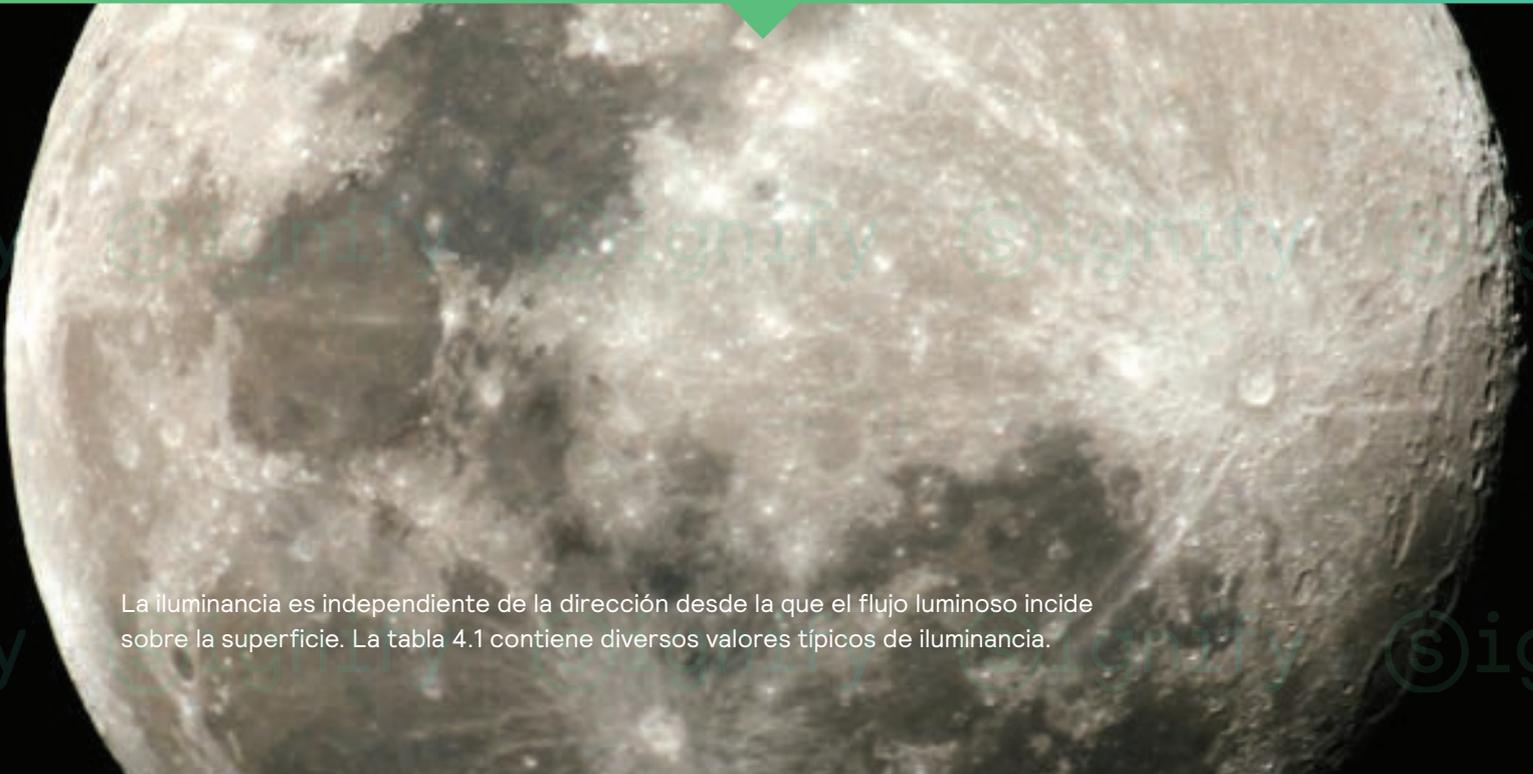
Fig. 4.4. Iluminancia: flujo que incide sobre una superficie.



Valores de iluminancia [lux] típicos

Día soleado de verano	100,000 lux
Cielo cubierto	5,000 lux
Una oficina iluminada	500 lux
Una habitación de hotel	100 lux
Noche de luna llena	0.25 lux

Table 4.1. Valores de iluminancia típicos en distintas condiciones.



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.

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).

$$L = I / A_a$$

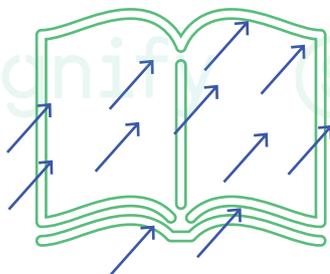


Fig. 4.5. Luminancia: intensidad emitida desde una superficie por unidad de área.

Luminance: Intensidad luminosa emitida en la dirección de visión por unidad de área aparente



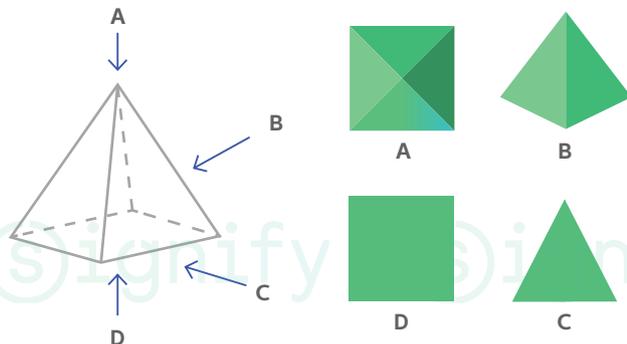
La superficie puede ser la parte emisora de luz de una lámpara o luminaria, pero también puede ser una superficie desde la que se refleja luz. En este último caso se habla de fuentes de luz secundarias, por ejemplo un libro o las paredes en una habitación iluminada, o la superficie de una calle iluminada 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.

Superficie del sol	1,650 M cd/m^2
Filamento incandescente	7,000,000 cd/m^2
Cielo cubierto	2,000 / 80,000 kcd/m^2
Lámpara fluorescente	5,000 - 15,000 cd/m^2
Mesa despacho	100 cd/m^2
Calzada (iluminación nocturna)	0.5 - 2.0 cd/m^2

Table 4.2. Valores típicos de luminancia.

Área aparente

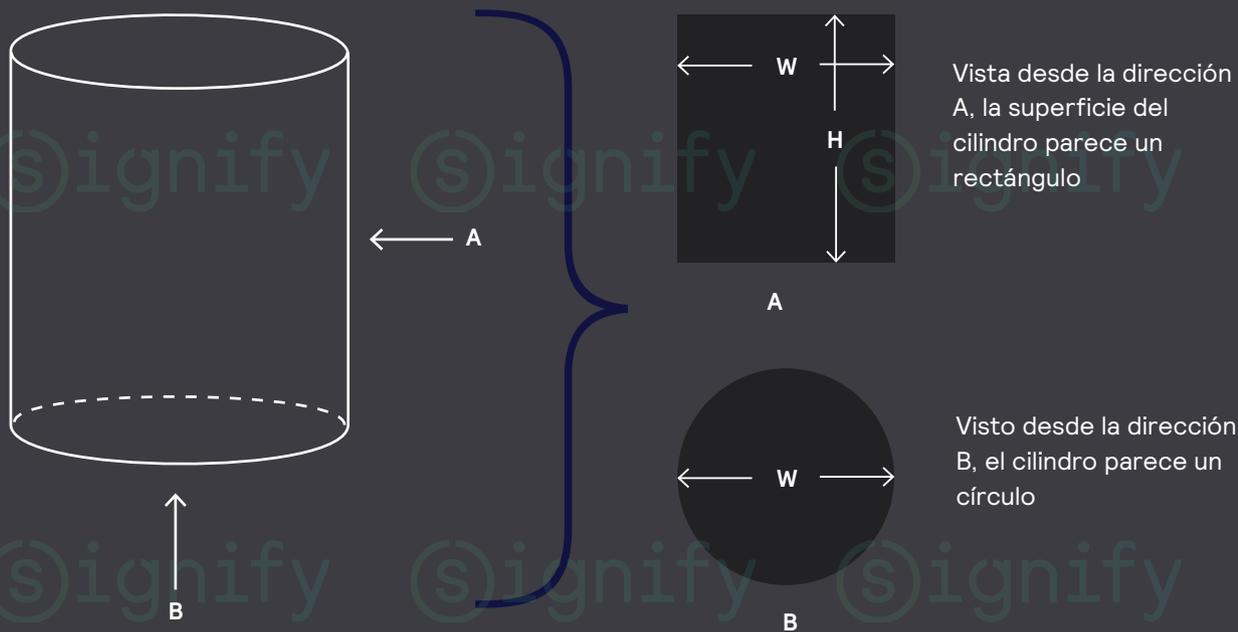
Se entiende por área aparente la proyección de cualquier área de la superficie en cuestión sobre un plano situado en ángulo recto a la dirección de visión (figura 4.6)



Suponiendo un objeto tridimensional (como el de la figura) que emite la misma intensidad por todas sus superficies, la luminancia depende mucho de la dirección de observación.

Pero para una dirección de observación determinada tanto la intensidad luminosa como el área aparente son independientes de la distancia de observación, esto quiere decir que la luminancia es independiente de la distancia de observación.

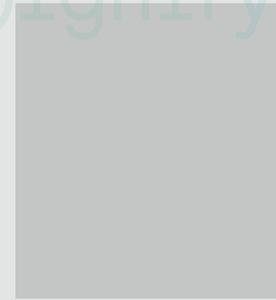
Fig. 4.6. Áreas aparentes (en verde) para diferentes direcciones de visión respecto a un objeto.



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..



Relaciones prácticas entre Magnitudes

Flujo luminoso e iluminancia media

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

Entonces:

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

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.

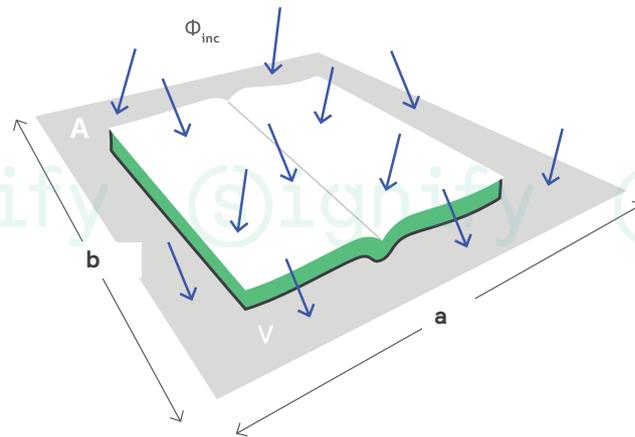


Fig. 4.8. Relación entre la iluminancia media E_{med} y el flujo luminoso incidente Φ_{inc} sobre una superficie con el área A ($a \times b$).

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 (Fig. 4.9). Si llamamos a la distancia: "d", se utiliza esta fórmula:

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

$$E = 100 / (0.5)^2 \\ = 400 \text{ lux}$$

$$E = 100 / 1^2 \\ = 100 \text{ lux}$$

$$E = 100 / 2^2 \\ = 25 \text{ lux}$$

$$E = 100 / 3^2 \\ = 11 \text{ lux}$$

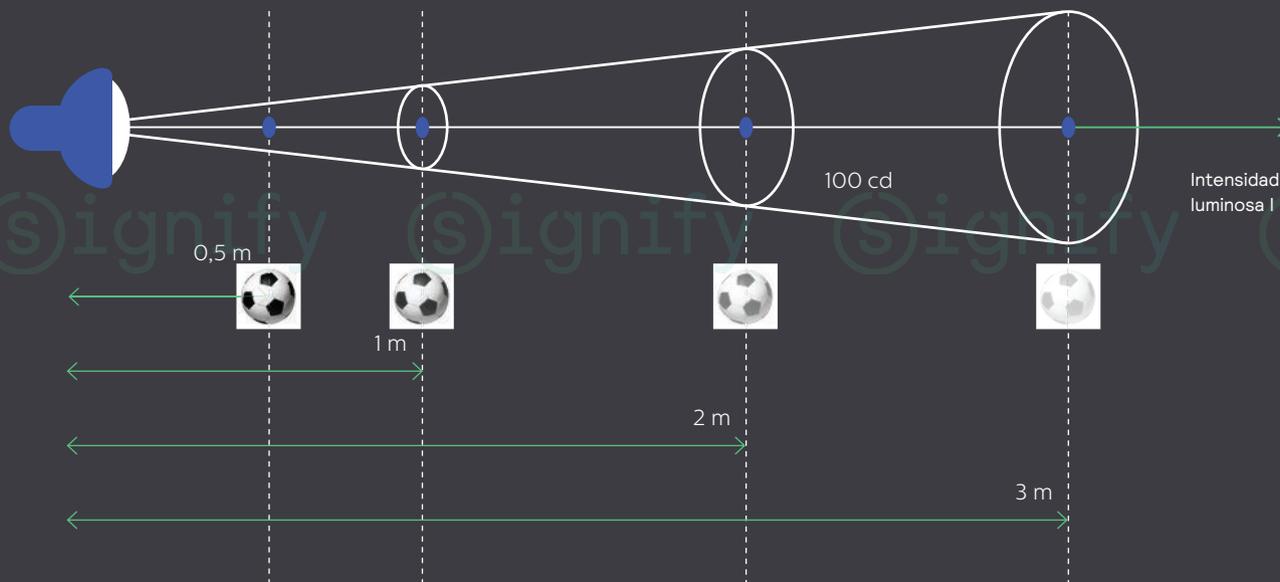


Fig. 4.9. Ley de la inversa del cuadrado.

Por ejemplo, si una fuente de luz de 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 $1.200 / 3^2 = 133,33$ lux. Si la superficie está a una distancia de 6 metros de la fuente de luz, la iluminancia será: $1.200 / 6^2 = 33,33$ 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 (Fig. 4.10).

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

Es la 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 a 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:

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

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 a). Entonces:

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

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 4.12 b). Entonces:

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

Nota: Estos valores se calculan normalmente mediante un ordenador.

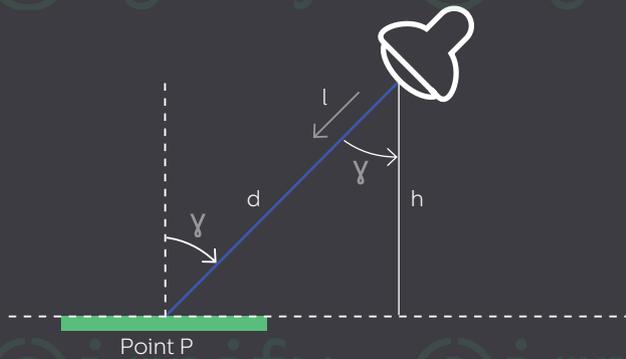


Fig. 4.10. Iluminancia en un punto P.

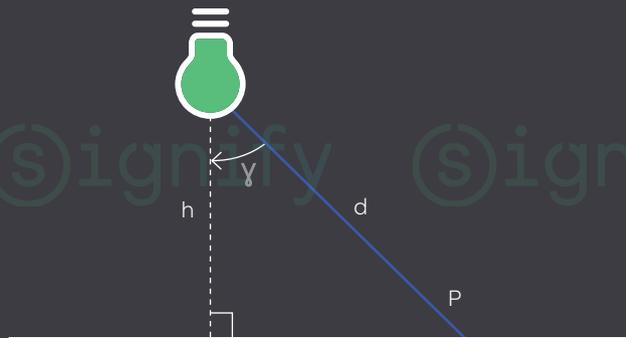


Fig. 4.11. Iluminancia horizontal en el punto P.

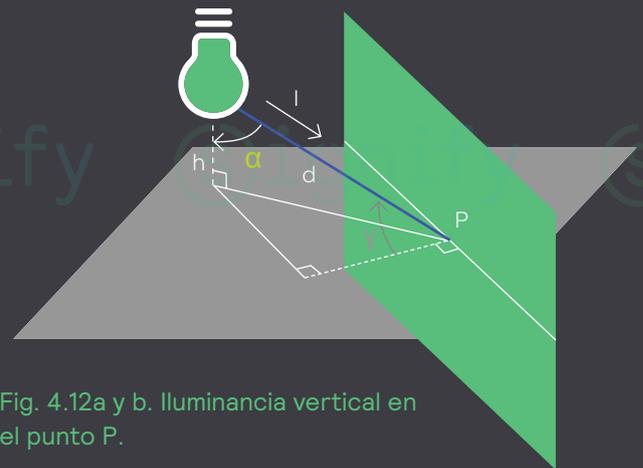


Fig. 4.12a y b. Iluminancia vertical en el punto P.

Illuminancia cilíndrica media

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

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

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

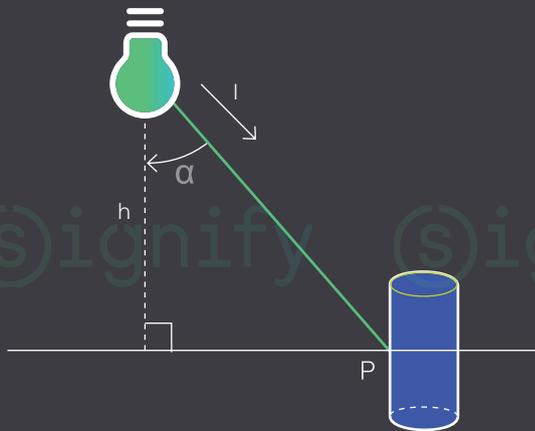


Fig. 4.14. Iluminancia cilíndrica media.

Illuminancia semiesférica y semicilíndrica

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

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

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

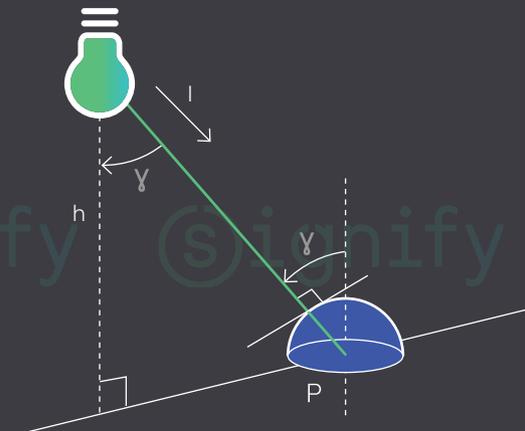


Fig. 4.15. Iluminancia semiesférica.

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.

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

Nota: Los valores son normalmente calculados por ordenador

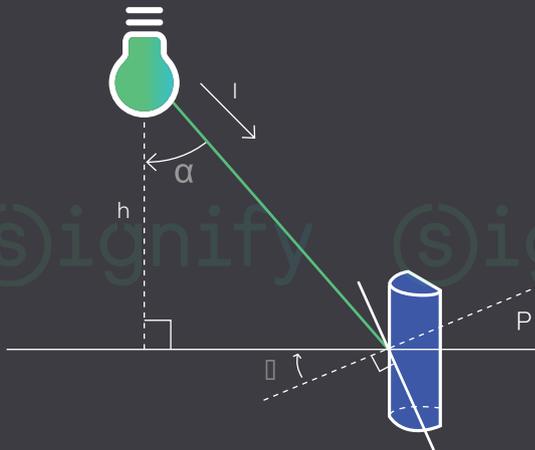


Fig. 4.16. Iluminancia semicilíndrica.

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 (ρ) y la luminancia L de la superficie (figura 4.17):

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

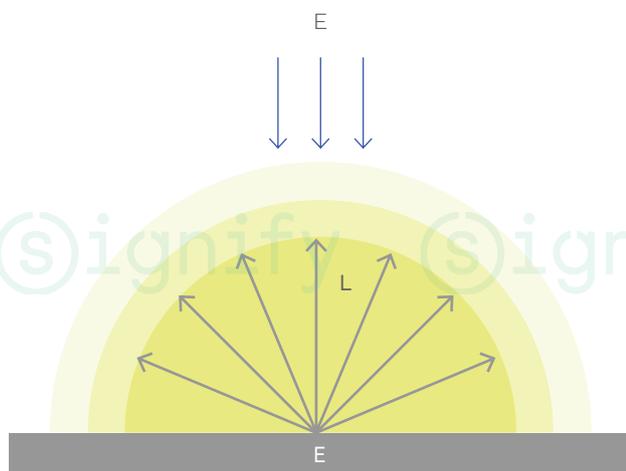


Fig. 4.17. Relación entre iluminancia y luminancia de una superficie reflectora difusa.

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 el Capítulo 3 “¿Cómo se dirige y apantalla la luz?”), como las superficies de las carreteras, cuando se observan en la dirección de la componente especular.

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.



Mediciones 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.

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 anteriormente.

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.

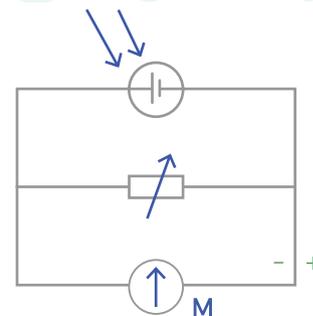


Fig. 4.18. Principio de una fotocélula.

Iluminancia

En la fotografía en la imagen 4.1 se ve un luxómetro utilizado normalmente para medir la iluminancia sobre el terreno y comprobar la calidad de instalaciones de iluminación.



Image 4.1. Ejemplo de luxómetro.

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 4.19), en los que la luminaria o un sistema de espejos (o ambas cosas) van girando con respecto a una fotocélula estacionaria.

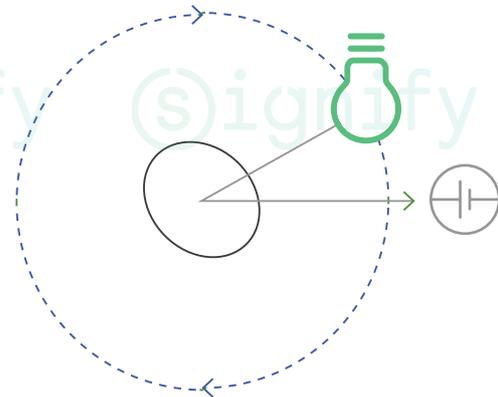


Fig. 4.19. Ejemplo de goniofotómetro utilizado para medir la distribución de luz.

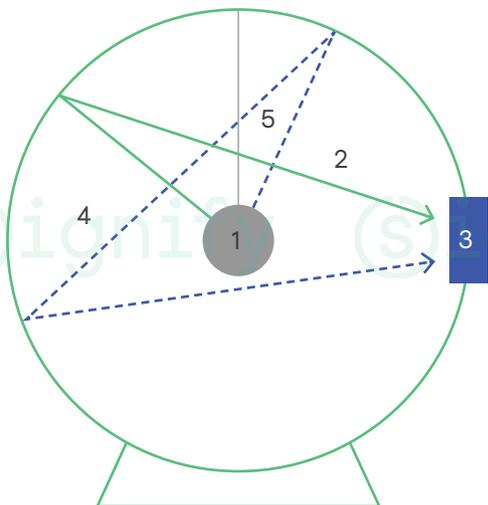


Image 4.2. Esfera de Ulbricht utilizada en la medición del flujo luminoso.

Flujo luminoso

El flujo luminoso de una lámpara se suele medir en el fotómetro conocido como “esfera de Ulbricht” (Image 4.2). 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 | 4. rayo reflejado (una vez) |
| 2. pantalla opaca | 5. rayo reflejado (dos veces) |
| 3. fotocélula | |

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 (Image 4.3). El circuito de medición se calibra de forma que proporcione los valores de luminancia en cd/m^2 .



Image 4.3. Ejemplo de un luminancímetro de mano.



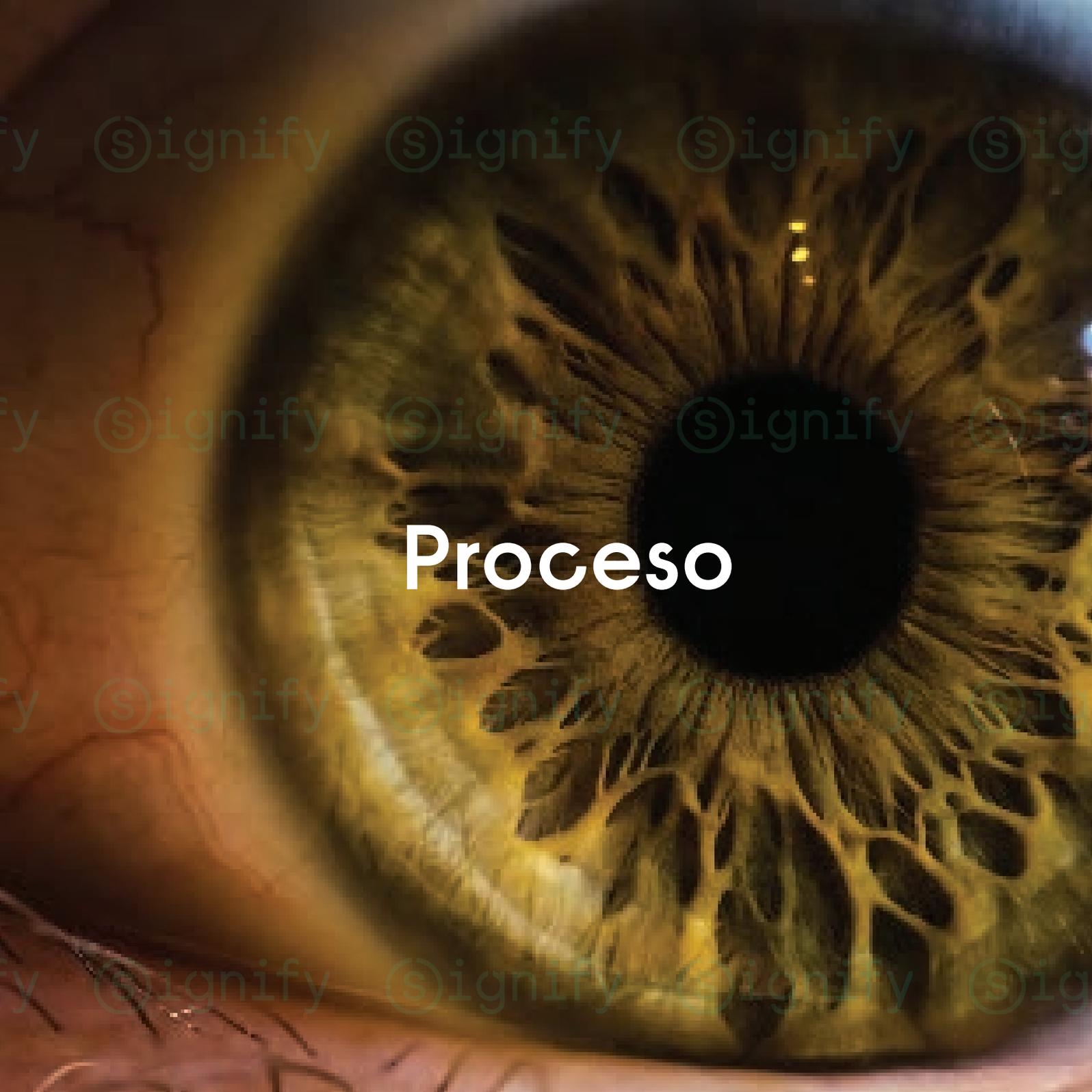
Luz y visión

5

- 77 El proceso visual y el ojo**
- 82 Bastones y visión escotópica
- 82 Conos y visión fotópica
- 85 Curvas de sensibilidad espectral del ojo estandarizadas
- 85 Visión mesópica
- 86 Mecanismos de ajuste del ojo

- 90 Rendimiento y confort visual**
- 91 Agudeza visual
- 91 Detección de contraste
- 95 Deslumbramiento
- 97 Rendimiento visual y el envejecimiento

- 99 Aspectos psicológicos y emocionales de la visión**
- 99 El ojo ve, el cerebro percibe
- 100 Efectos emocionales de la luz



Proceso

El proceso visual y el ojo

El efecto fundamental de la luz es que nos permite ver el mundo que nos rodea, gracias a órganos extremadamente delicados como el ojo humano y el cerebro.

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.

Aprenda más sobre el proceso visual del ojo

[Ver más >>](#)

25

Diámetro en mm

6

Número de músculos de posición

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.

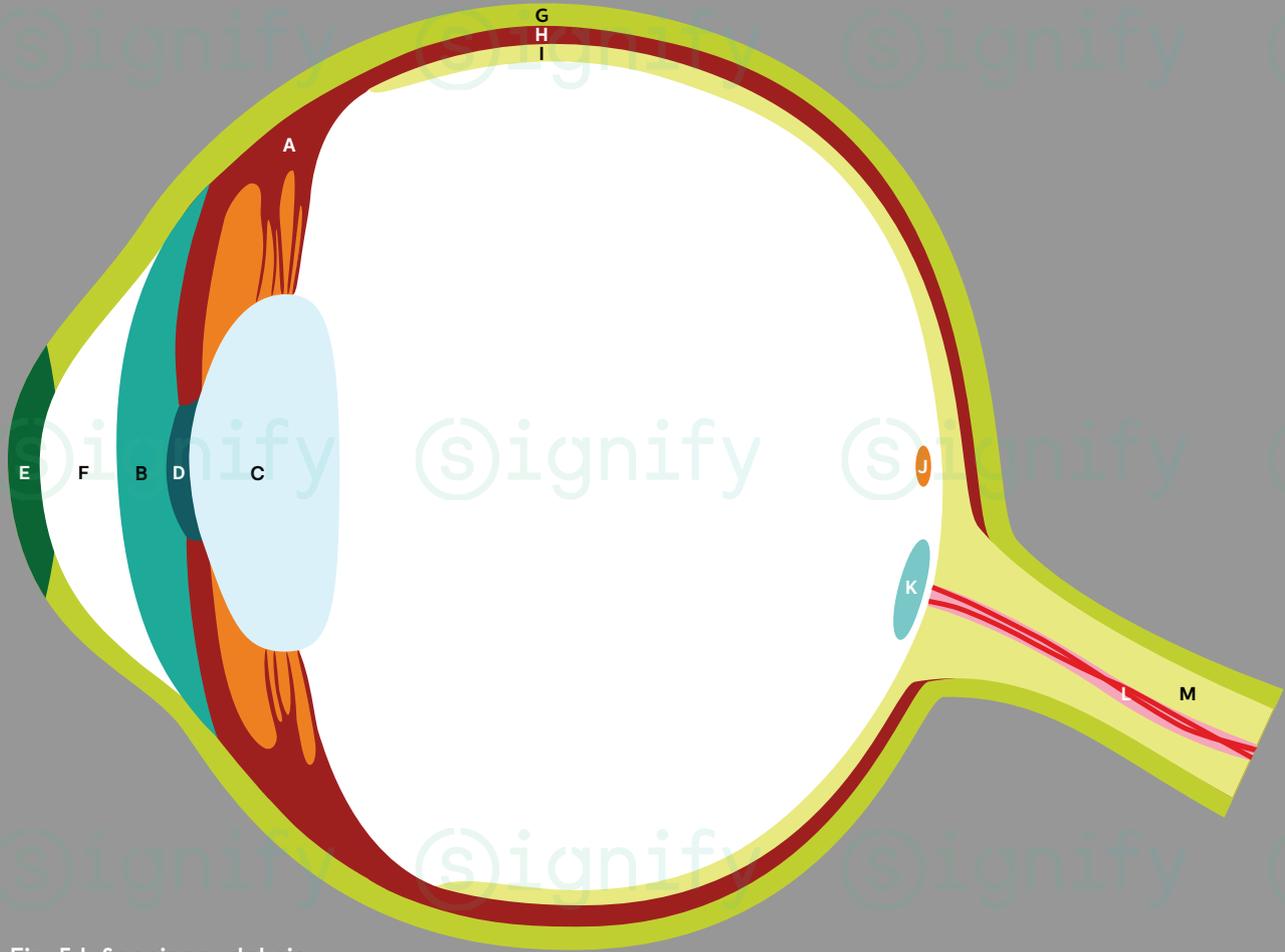


Fig. 5.I. Secciones del ojo humano.

A Músculo ciliar
B Iris
C Lentes
D Pupila (diafragma)

E Córnea (lentes para focalizar)
F Cámara anterior
G Esclerótica (esfera ocular, cuerpo de la cámara)

H Coroides
I Retina (película)
J Fóvea central (zona amarilla)

K Punto ciego
L Vasos sanguíneos
M Nervio óptico



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.

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 “luz y salud”).

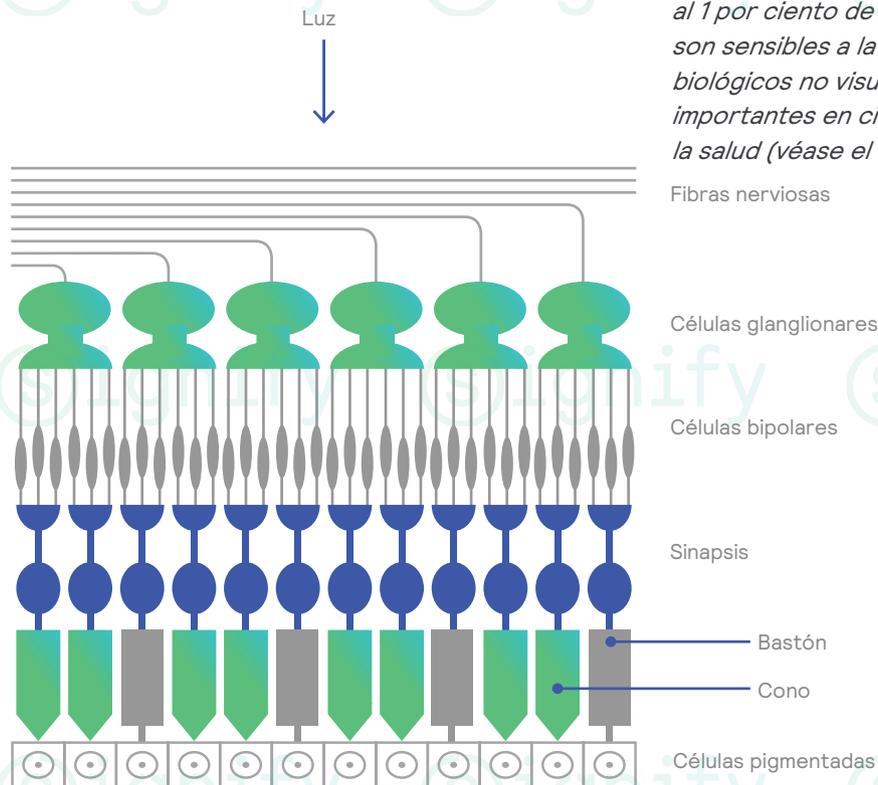


Fig. 5.2. Sección de la retina del ojo

Bastones y visión escotópica

Con niveles de iluminación muy bajos, de menos de 0,01 cd/m² (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 fóvea, 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 (azulverde) y se reduce acusadamente hacia el extremo rojo del espectro (Fig. 5.3, curva amarilla).

Aprenda más
sobre la visión
[Ver más >>](#)

Conos y visión fotópica

Los conos se ocupan por sí solos de la visión a niveles de iluminación por encima de unos 3 cd/m² (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 fóvea, 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 (Fig. 5.3, curva verde).

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.

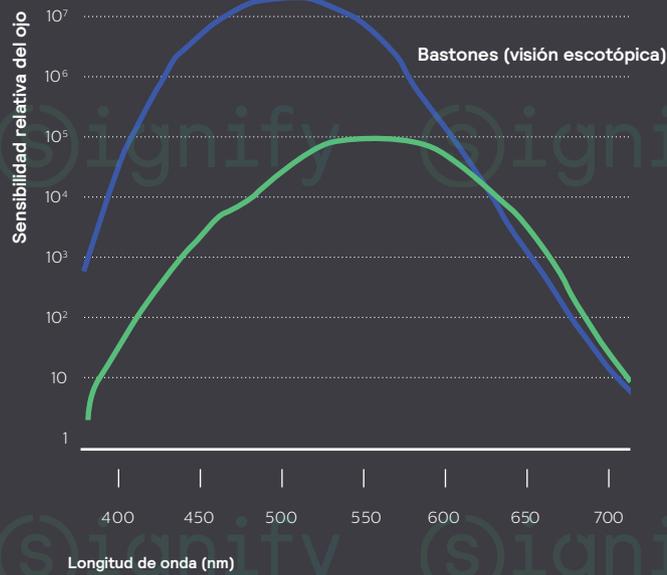


Fig. 5.3. Curvas de sensibilidad espectral de los conos (verde) y los bastones (amarilla).

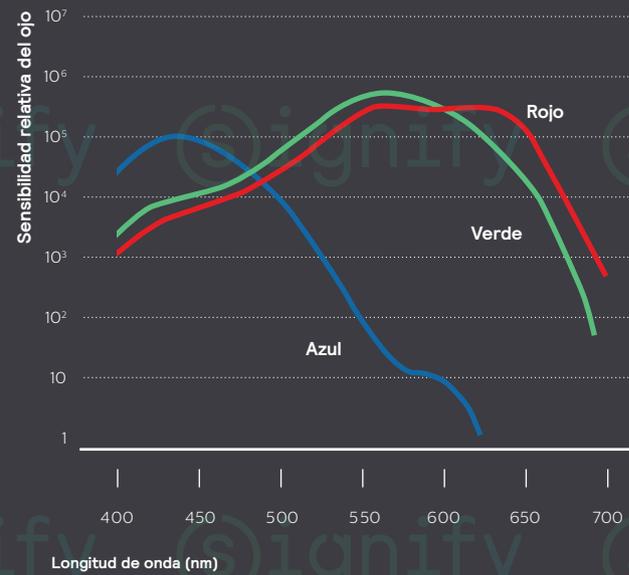


Fig. 5.4. Curvas de sensibilidad espectral de los tres receptores de color de los conos.

A blurred night photograph of a highway. In the center, a large dark truck is moving away from the viewer. To the left, a car is moving towards the viewer. The background shows a dark sky with some light clouds and distant lights. The overall scene is out of focus, illustrating the concept of mesopic vision.

Mesópica

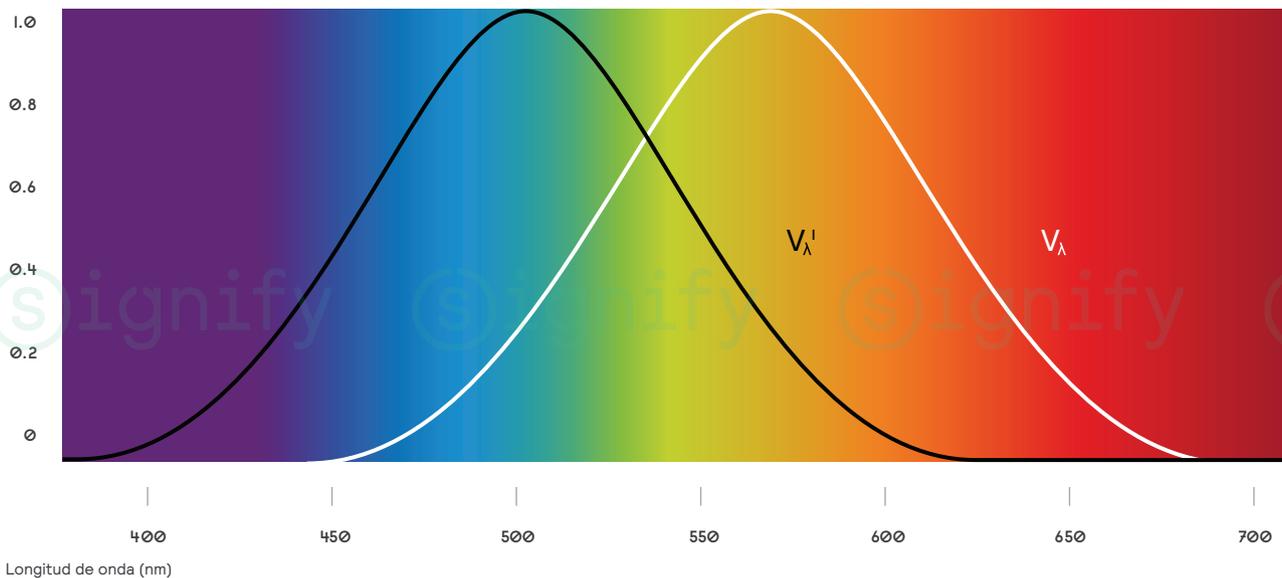
Image 5.1. Visión mesópica: La visión aguda centrada en el eje se va alejando del eje, se hace menos aguda y periférica, y la visión del color desaparece poco a poco.

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.

Relative sensitivity



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

Visión Mesópica

A niveles de iluminación intermedios con relación a los niveles escotópico y fotópico (aproximadamente entre 0,01 cd/m² y 3 cd/m²) 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.

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).

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.

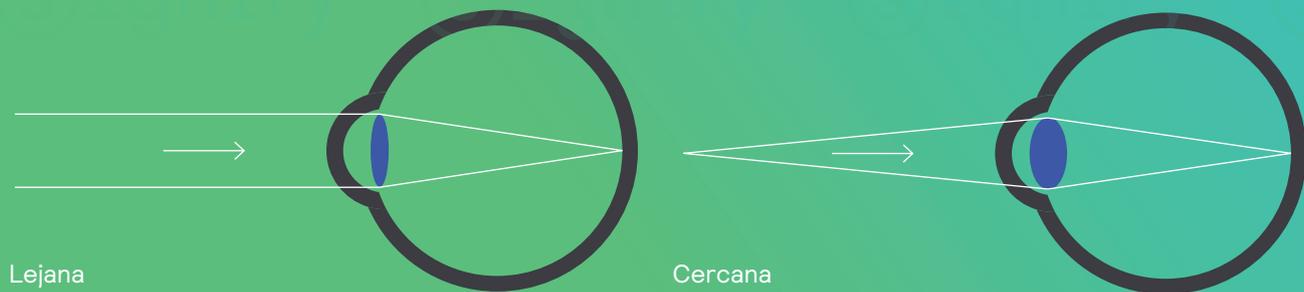
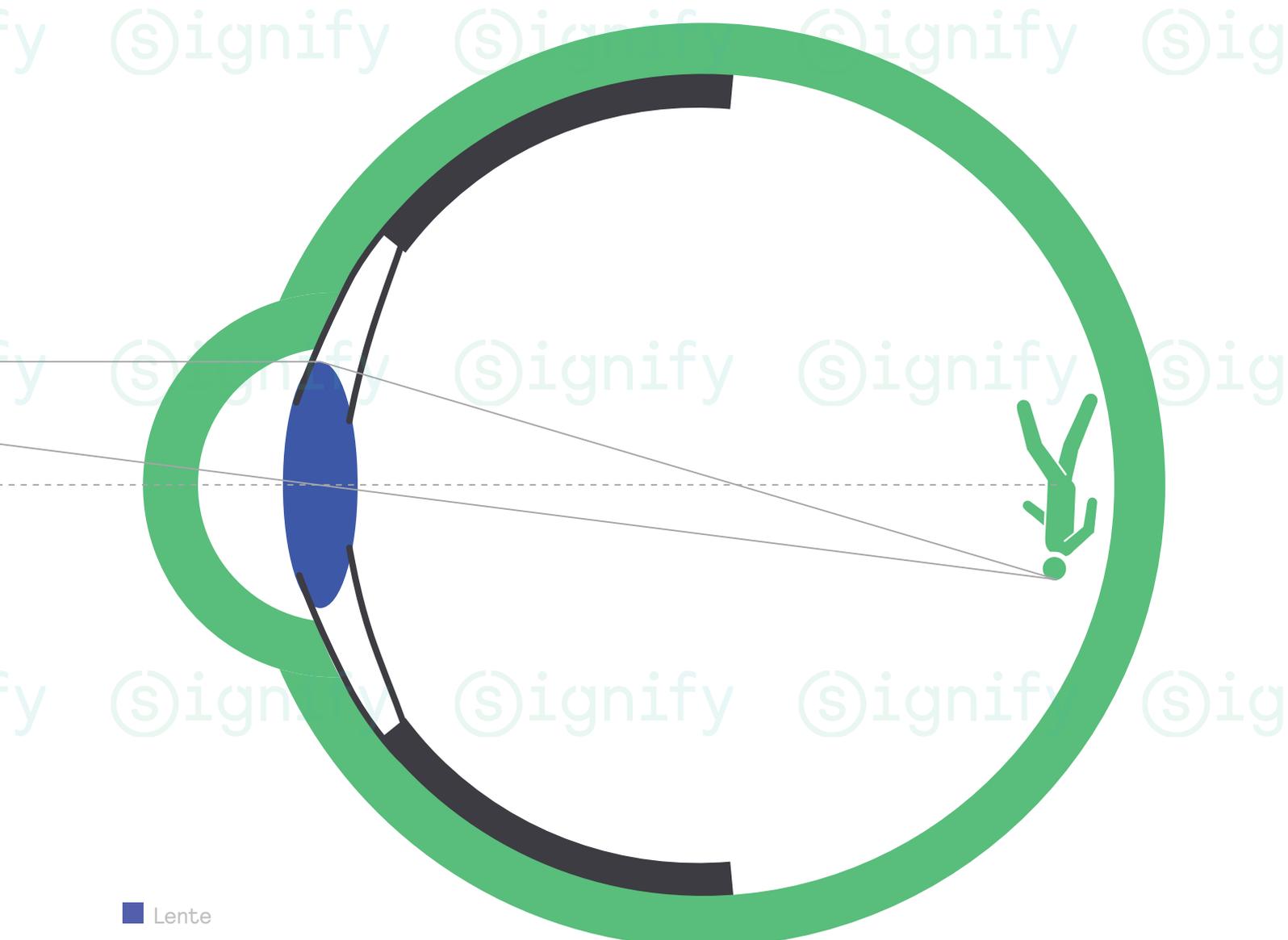


Fig. 5.6. Acomodación mediante el cambio del poder de refracción de la lente del ojo



- Lente
- Ligamento suspensorio
- Músculos ciliares

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.

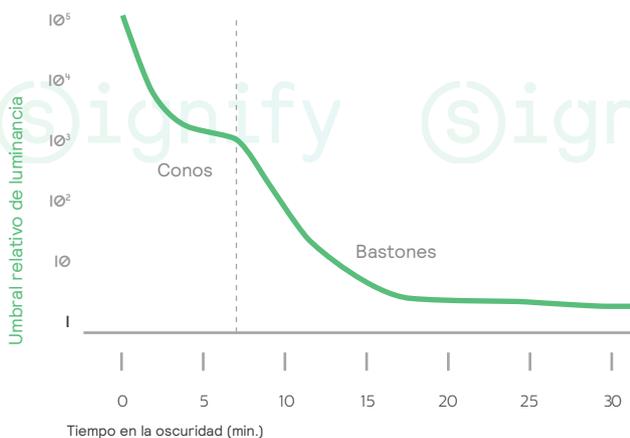


Fig. 5.7. Tiempo de adaptación de la luz a la oscuridad.

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.

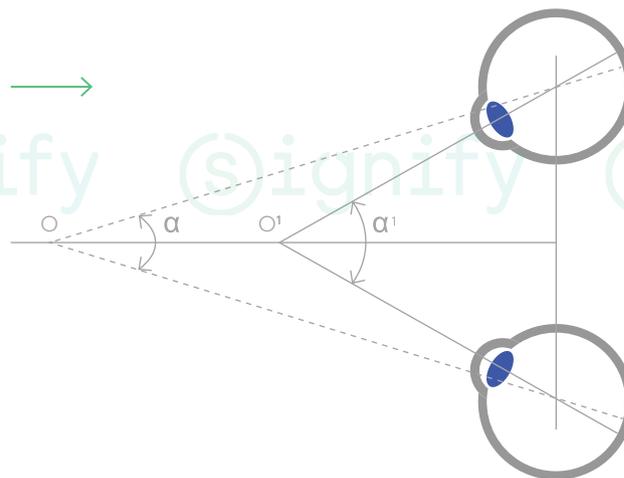
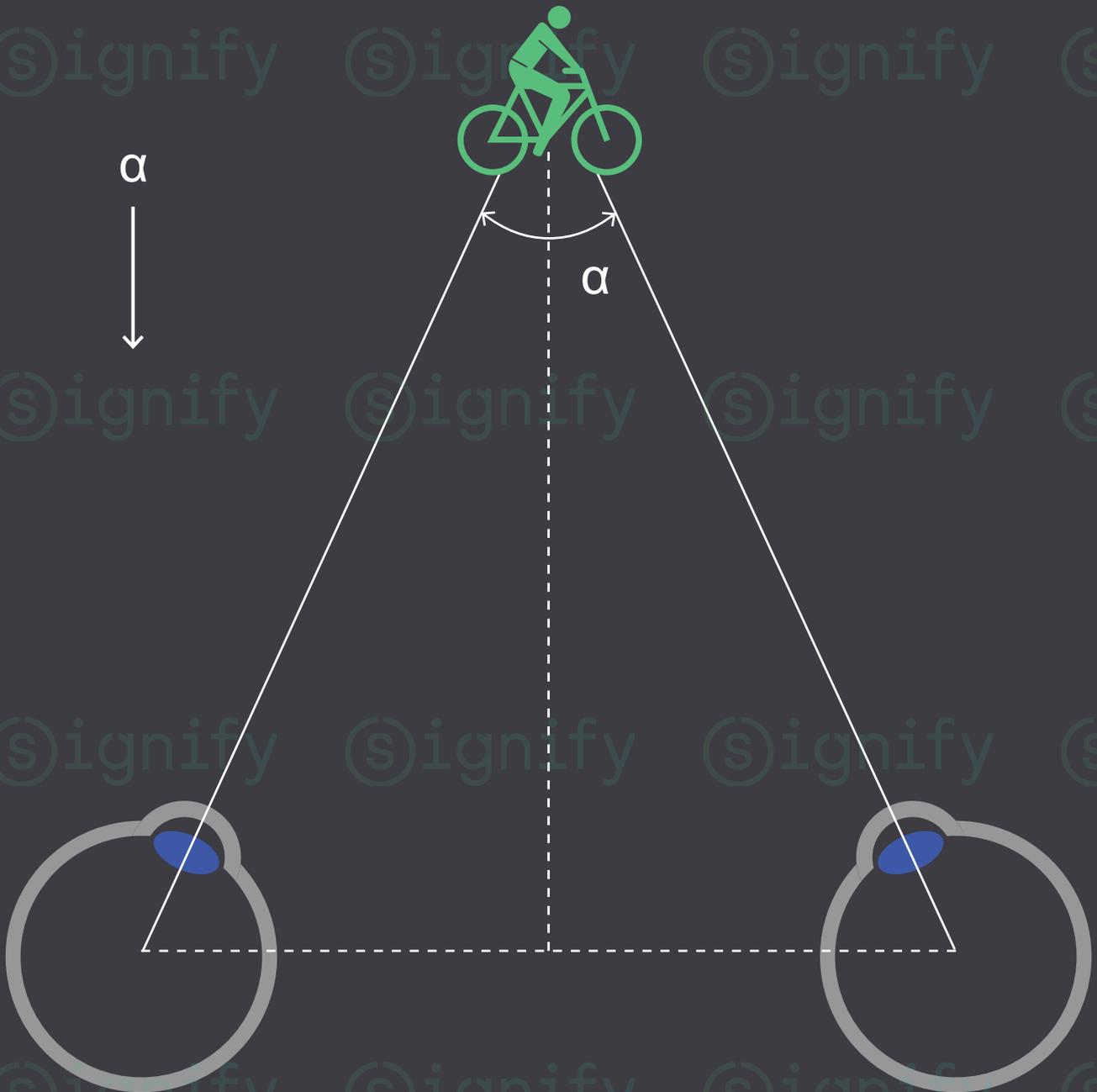


Fig. 5.8. Los distintos ángulos de convergencia para objetos situados a diferentes distancias nos ayudan a percibir la profundidad.



Rendimiento visual y confort

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.



Image 5.2. Contraste entre las letras oscuras y el papel blanco.



Fig. 5.9. Gráfico de la prueba de agudeza visual.

Agudeza visual

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.

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 = Ratio de contraste

L_{alta} = Luminancia más alta

L_{baja} = Luminancia más baja



Fig. 5.10. Contraste entre la superficie de la carretera y las paredes de un túnel



Fig. 5.11. El contraste entre objetos en muchas ubicaciones distintas puede ser de interés en esta situación visual compleja.



Fig. 5.12. izquierda: Contraste de luminancia: Temperatura de color fría. Derecha: Contraste de Luminancia: Temperatura de color cálida.

El contraste se usa, por ejemplo, para evaluar la calidad del texto negro o gris impreso sobre el papel blanco de un libro (Image 5.2) o para evaluar la relación de luminosidad entre las paredes y la superficie de la carretera en un túnel iluminado (Fig. 5.10). 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 (Fig. 5.11)

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

$$C = (L_o - L_b) / L_b$$

Where: **C** = contraste
L_o = Luminancia del objeto
L_b = 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 (Fig. 5.12).

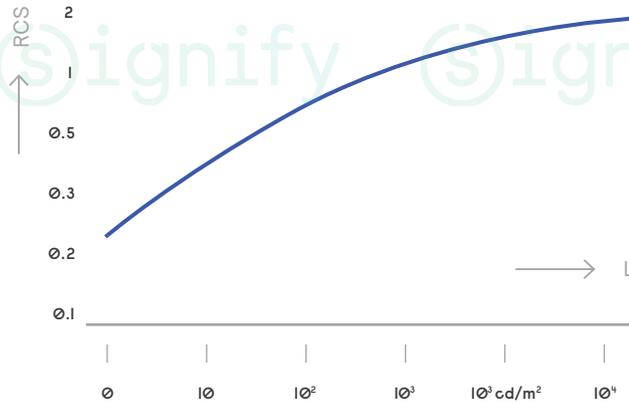


Fig. 5.13. Sensibilidad de contraste relativa, RCS, establecida arbitrariamente como 1 a 100 cd/m², como función de la luminancia de adaptación L.

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.

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.

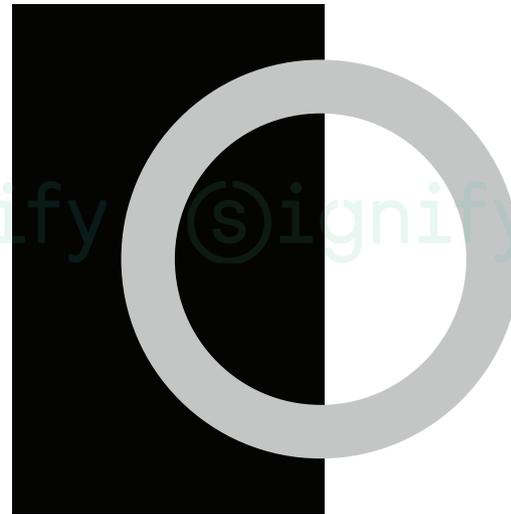


Fig. 5.14. El mismo gris se ve de distinta forma sobre un fondo negro y un fondo blanco.

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.

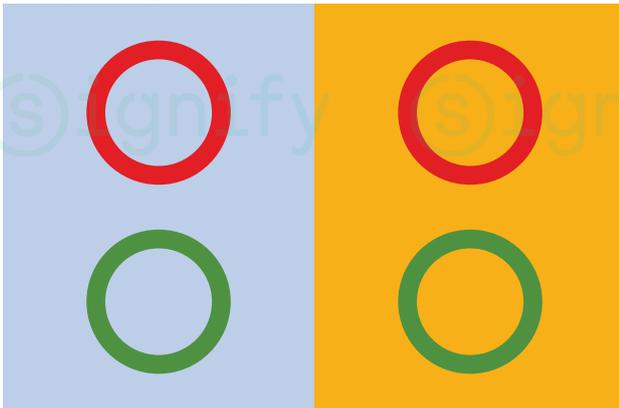


Fig. 5.15. Los círculos tienen una luminosidad aparente distinta según el color del fondo.



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 molesto o deslumbramiento perturbador. 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.

Deslumbramiento molesto

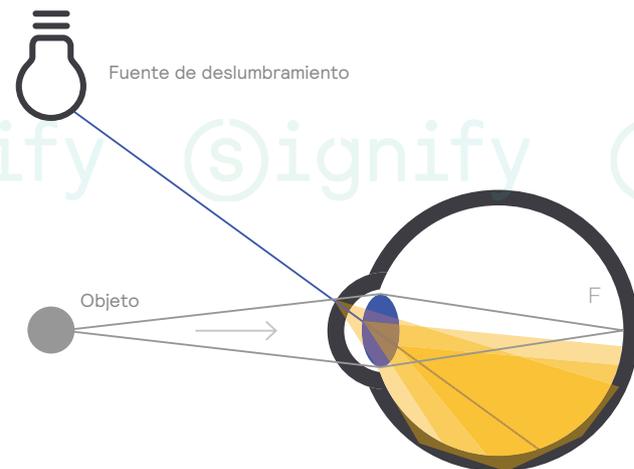
La incomodidad visual por deslumbramiento es una sensación de molestia, incluso dolor, causada por un exceso de luminancias en el campo de visión. Los parámetros físicos que determinan el grado de incomodidad son prácticamente desconocidos. Se pueden usar para predecir si la incomodidad visual por deslumbramiento 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.

Aprenda más sobre el concepto y los tipos de deslumbramiento

[Ver más >>](#)

Deslumbramiento perturbador

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.



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 (Image 5.3). Las luminarias de interiores con un haz estrecho y dirigidas hacia abajo también pueden dar lugar al deslumbramiento superior.

Image 5.3. Un sombrero ofrece protección contra el deslumbramiento del sol del mediodía.

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 (Fig. 5.17).

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.

Requerimientos de luz en función de la edad

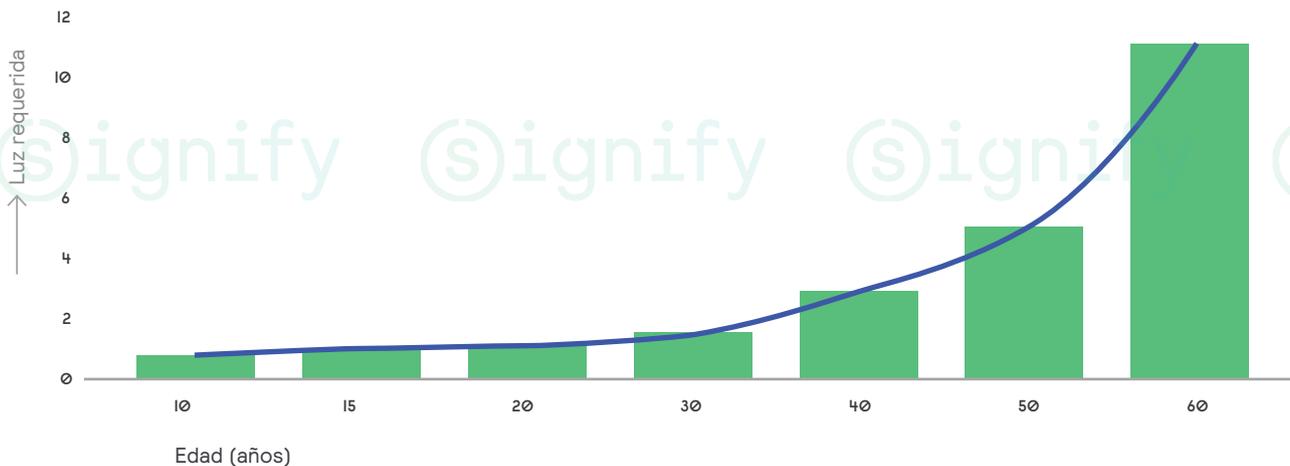


Fig. 5.17. Necesidades de luz para una tarea de lectura concreta en relación con la edad.



Aspectos psicológicos y emocionales de la visión

El ojo ve, el cerebro percibe

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.

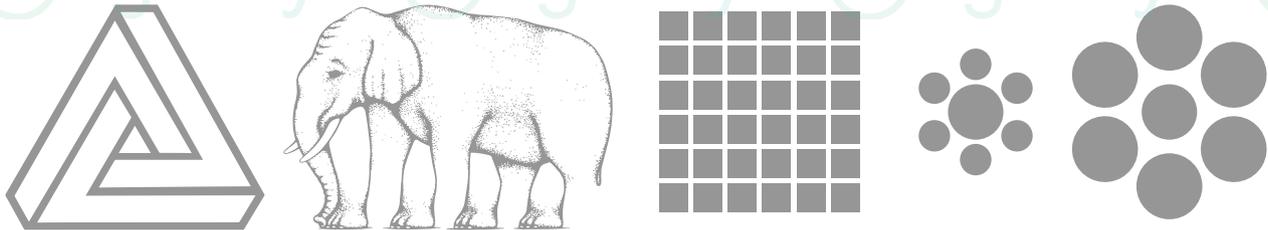


Fig. 5.18. Ilusiones ópticas. De izquierda a derecha: perspectiva, imagen doble, contraste y tamaño.

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 miedo, porque estamos acostumbrados a la luz que viene desde arriba.

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 Fig. 5.19 - 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.

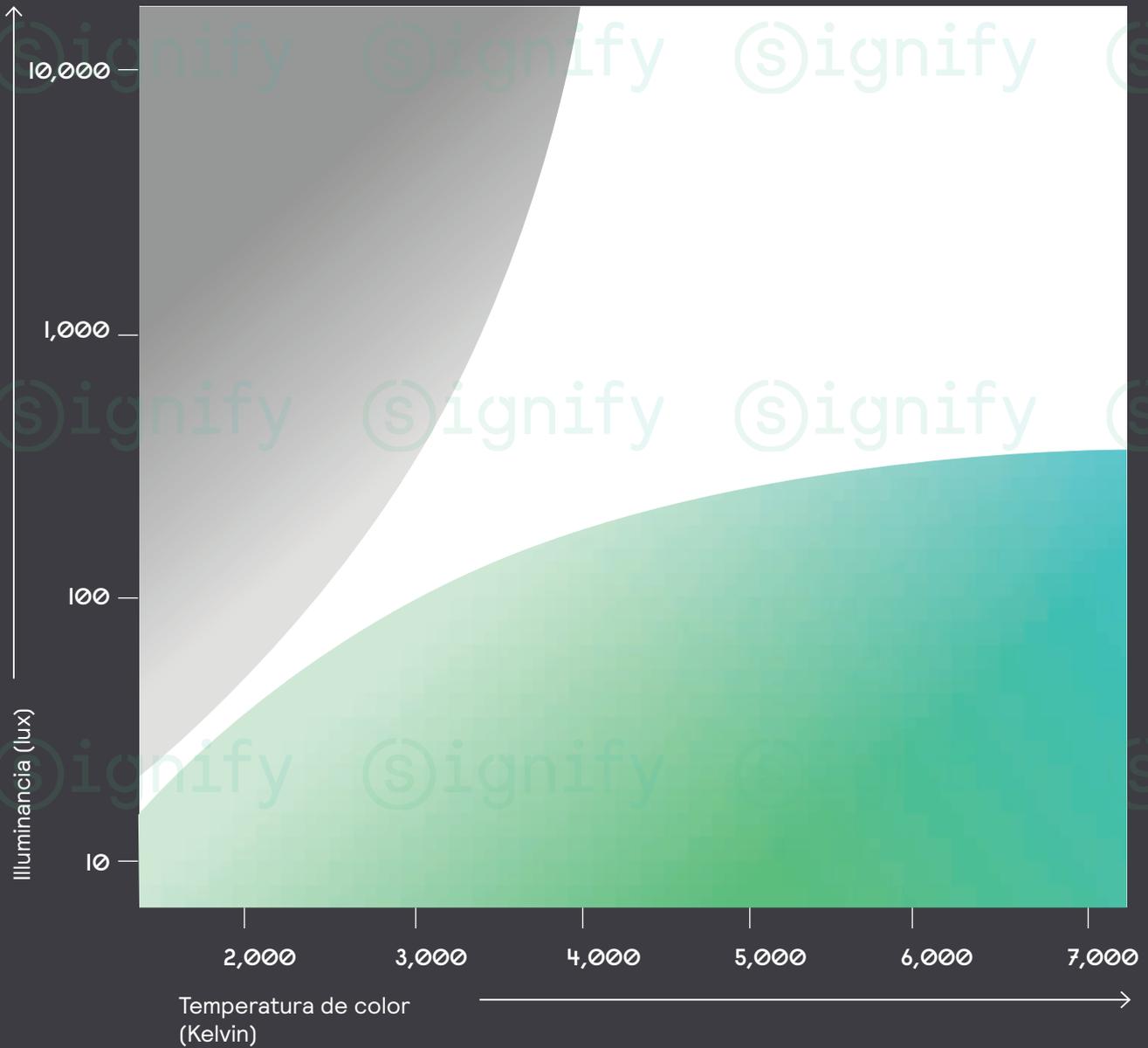


Fig. 5.19. Preferencia de temperatura de color de la luz en relación con el nivel de iluminación, según Kruithof.

A photograph showing the lower legs and feet of three people walking on a floor made of large, square tiles. Each tile is illuminated from below, creating a grid of bright light points. The overall lighting is a mix of purple, blue, and white. The background shows a dark, industrial-style structure with a grid pattern.

Luz y
color

6

105 Combinación de colores

106 Mezcla aditiva

108 Mezcla sustractiva

110 Triángulo de color

111 Temperatura de color y el triángulo de color

111 Temperatura de color correlacionada y el triángulo de color

113 Apariencia de color y temperatura de color

116 Adaptación cromática

117 Reproducción del color e índice de reproducción cromática

An abstract painting featuring thick, expressive brushstrokes in various shades of blue, pink, and red. The colors are layered and blended, creating a vibrant and textured composition. The word "Mezcla" is centered in the image in a white, sans-serif font.

Mezcla

Combinación de colores

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.

Pero no todos los colores del espectro 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.

Aprenda más sobre la mezcla de colores

[Ver más >>](#)

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 (Fig. 6.1).

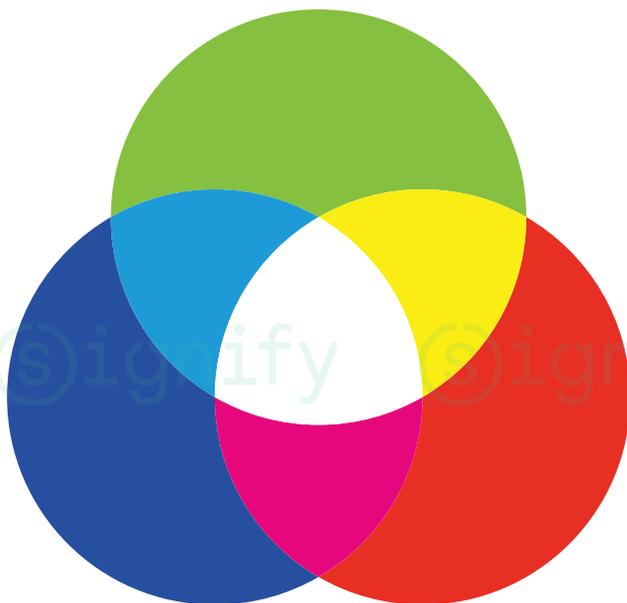


Fig. 6.1. Mezcla de colores aditiva de la luz.

El amarillo, magenta y cian se denominan colores secundarios, porque cada uno está formado por una mezcla de dos colores primarios (Fig. 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.

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 (Fig. 6.3).



Fig. 6.2. La mezcla aditiva de un color complementario con el color primario adecuado da blanco.



Fig. 6.3. De arriba a abajo: colores secundarios cian, amarillo y magenta.

Mezcla sustractiva

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

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 (Fig. 6.5). Esta es la razón por la que cian, magenta y amarillo (y el denominado "key", negro) son los colores de tinta que se usan en la impresión en color (impresión CMYK iniciales de los colores en inglés).

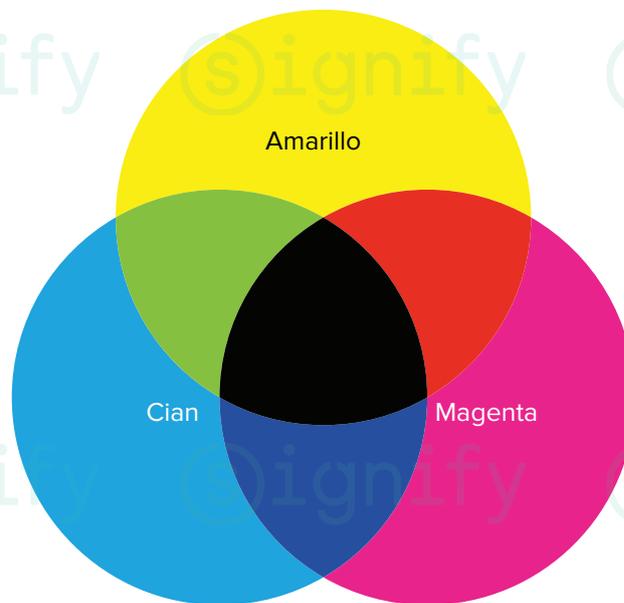
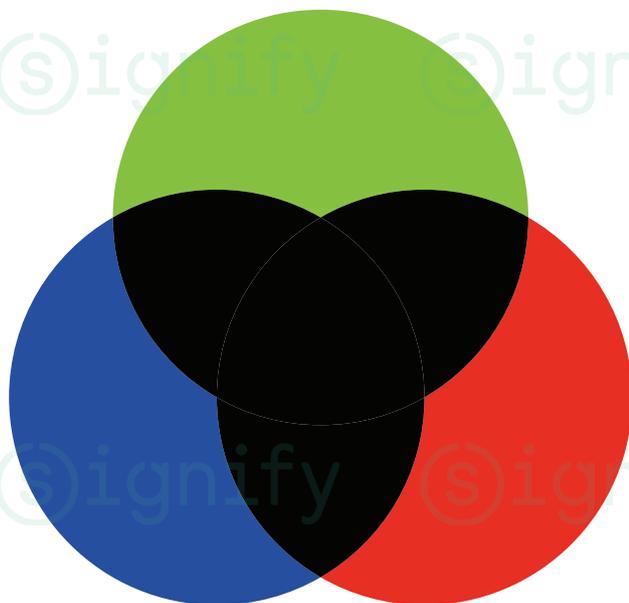


Fig. 6.4a. Mezcla de colores sustractiva con pinturas.

Fig. 6.4b. La mezcla sustractiva de los colores complementarios cian, magenta y amarillo da negro.

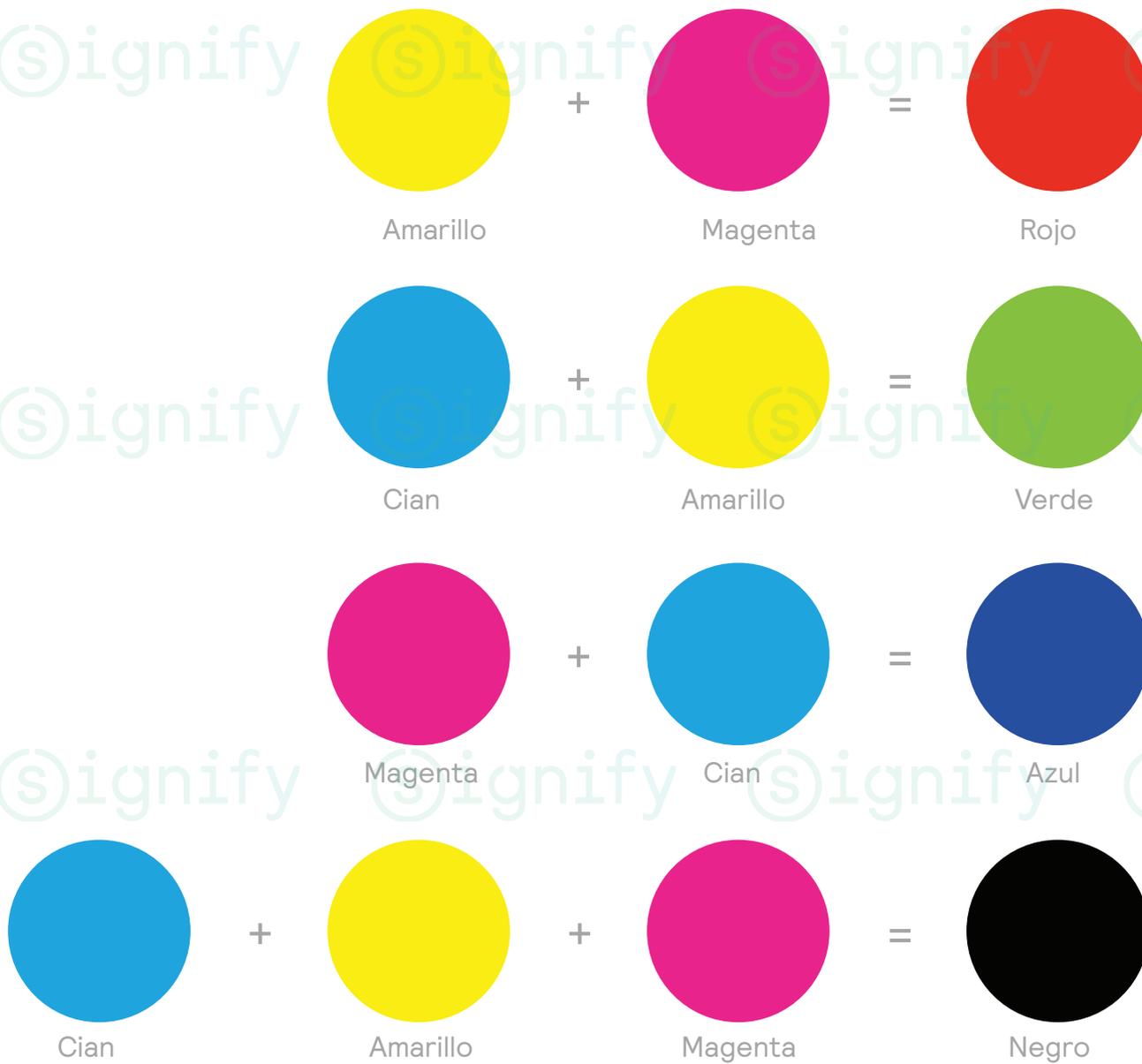
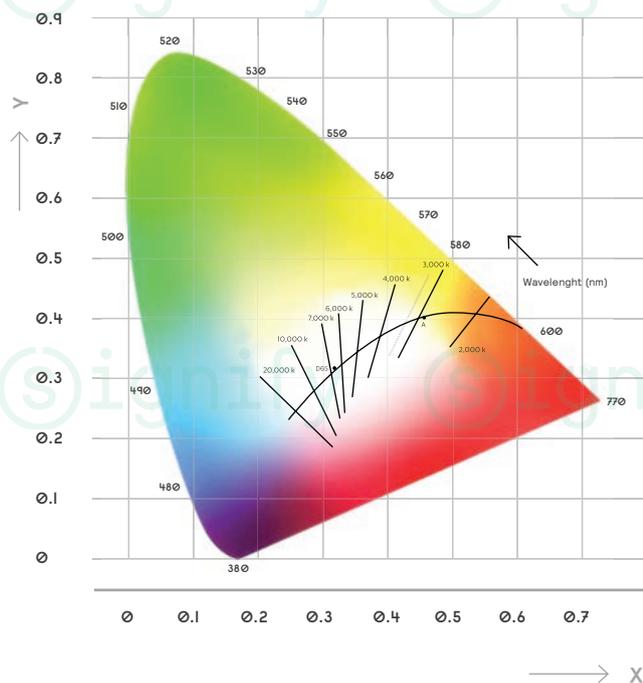


Fig. 6.5. La mezcla sustractiva de los colores complementarios cian, magenta y amarillo da negro.

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 cromaticidad, 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 (Fig. 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 cromaticidad. 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 cromaticidad de la CIE (triángulo de colores de la CIE). La línea curva es el locus del cuerpo negro

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

Image 6.1. Ejemplo de una lámpara de temperatura de color blanco neutro de unos 4000 K, izquierda; y otra de blanco cálido de unos 2700K, derecha.



Apariencia de color temperatura de color

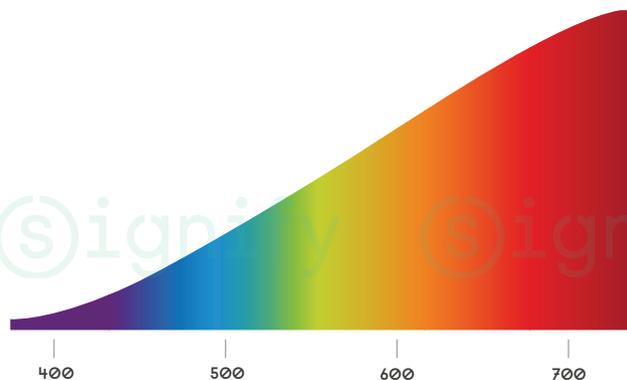
El aspecto de color de una fuente de luz que emita algún tipo de luz blanca se ve muy afectado por la composición espectral de su luz y se puede caracterizar por su temperatura de color (correlacionada).

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.

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).

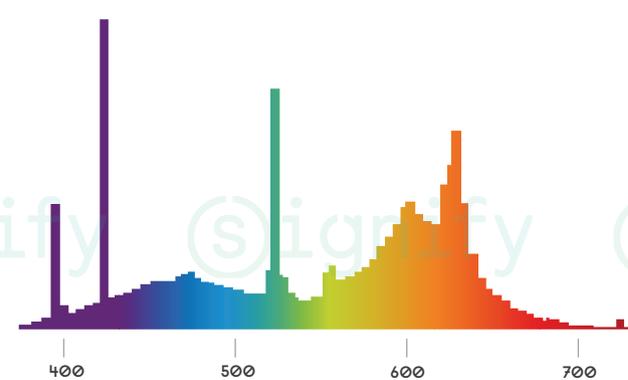
Con objeto de caracterizar los distintos tipos de luz blanca de las lámparas con un espectro discontinuo se usa la temperatura de color correlacionada de la misma forma que la temperatura de color se usa para los radiadores térmicos. Así, una lámpara de descarga o de

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

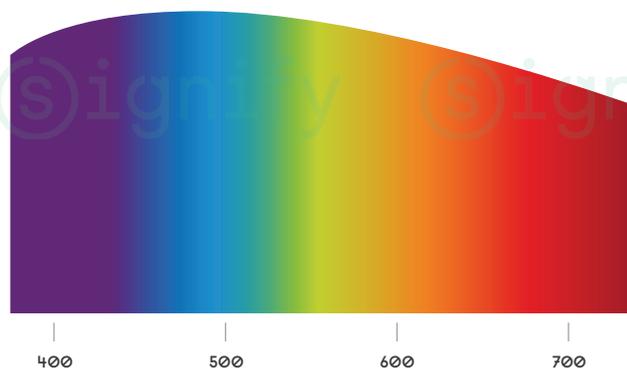


Longitud de onda (nm)

Fig. 6.8. Distribución espectral de la energía de una lámpara incandescente (2800 K).

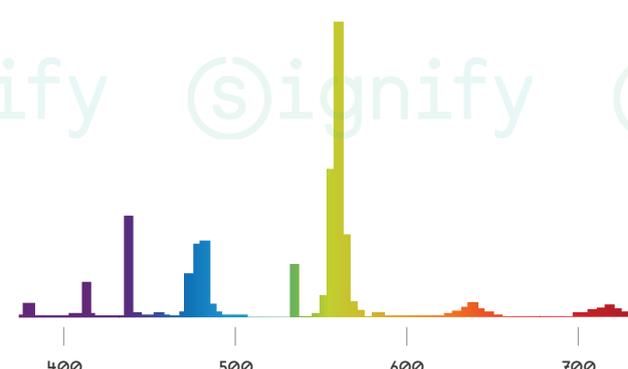


Longitud de onda (nm)



Longitud de onda (nm)

Fig. 6.9. Distribución espectral de la energía de la luz diurna natural (>5000 K).



Longitud de onda (nm)

Fig. 6.10. Espectros discontinuos de dos lámparas de descarga en gas.



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

Temperatura de color	Apariencia de color
Menos de 3300 K	Blanco cálido (amarillento)
3300K - 5300 K	Blanco neutro (intermedio)
Más de 5300 K	Blanco frío (azulado)

Table 6.1. Clasificación de grupos de temperatura de color / apariencia de color

En el capítulo 5 “Luz y visión”, 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).

Fig. 6.11. Espacios iluminados con lámparas de alta temperatura de color (abajo) y lámparas de baja temperatura de color (arriba), dan como resultado distintos aspectos y ambientes.

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 sin duda blanca.



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

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

Reproducción de color 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. 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.

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, sino 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.

Aprenda más sobre el
rendimiento en color
[Ver más >>](#)

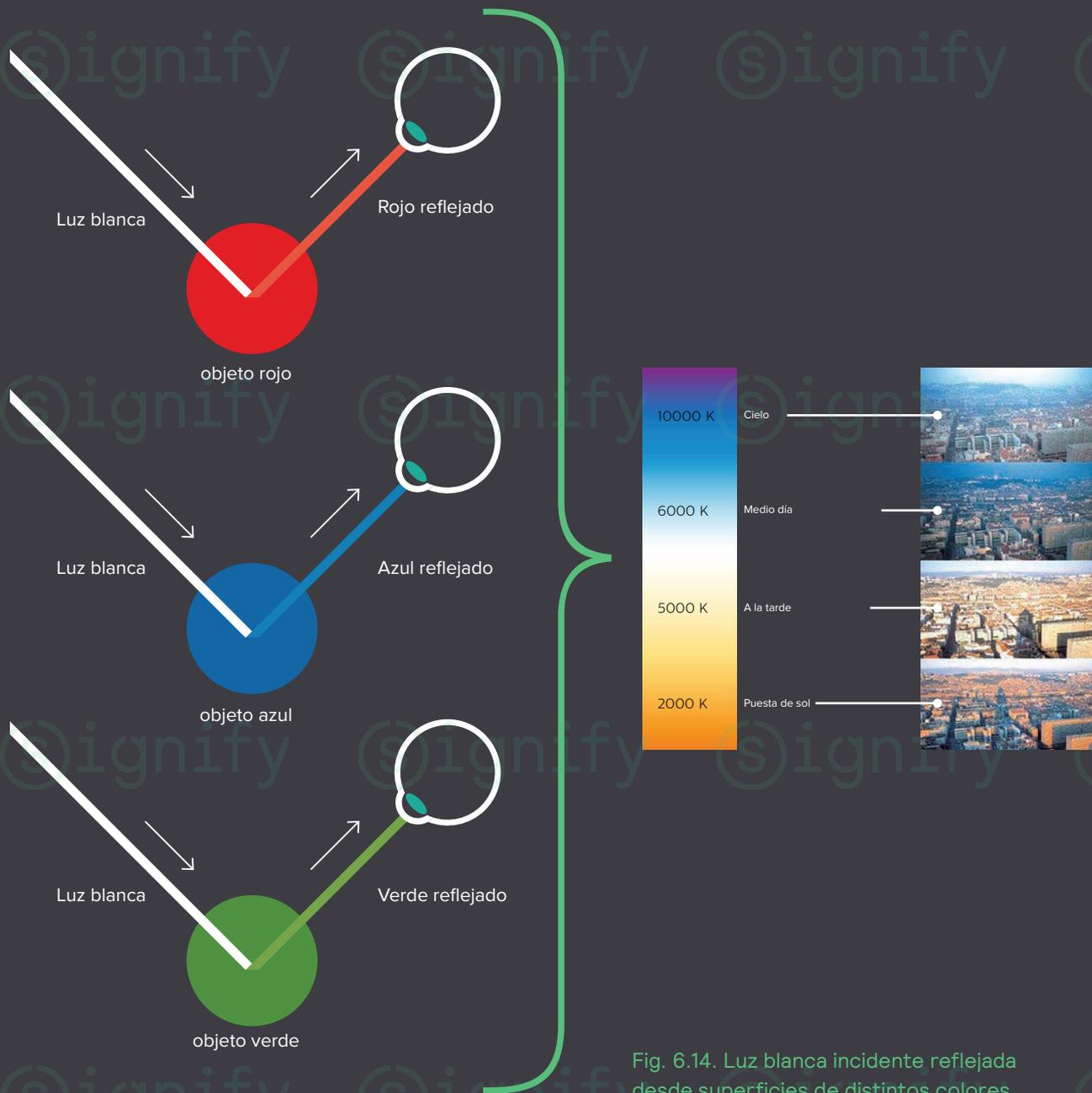


Fig. 6.14. Luz blanca incidente reflejada desde superficies de distintos colores.



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 paraguas. La luz reflejada desde el paraguas 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 paraguas, por lo que no se refleja luz desde sus partes rojas, que parecerán oscuras a un observador.

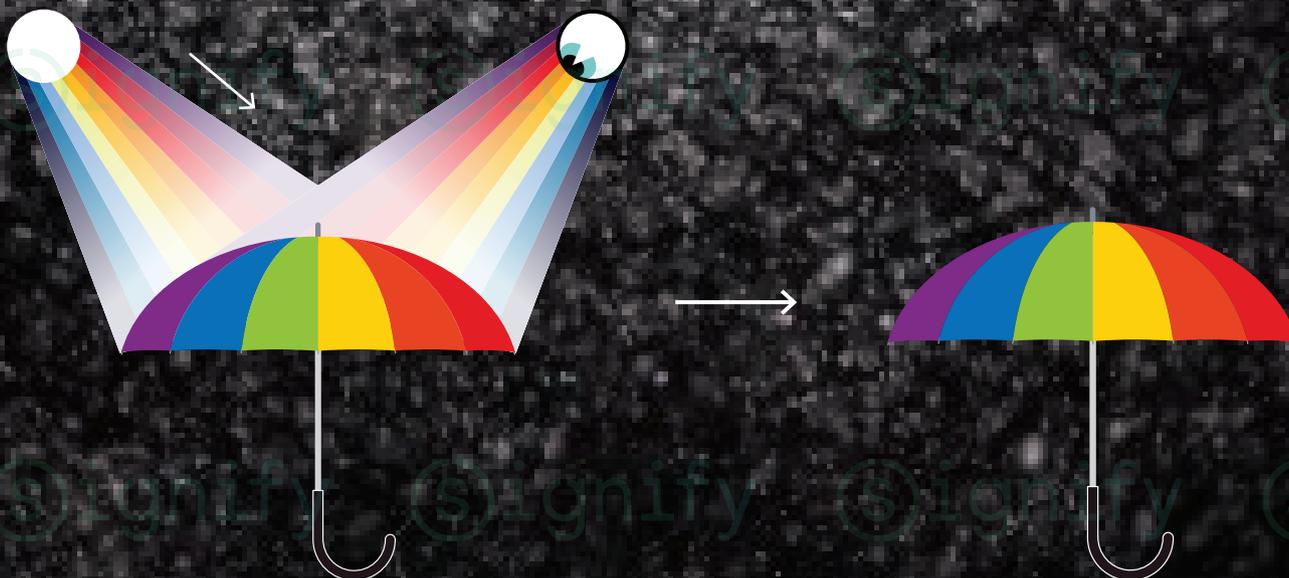
Con objeto de clasificar las fuentes de luz según sus capacidades de reproducción del color la CIE introdujo el “índice general de reproducción del color” R_a . Este índice se basa en el aspecto de ocho colores normalizados bajo una fuente de luz determinada comparados con su aspecto bajo una fuente 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.

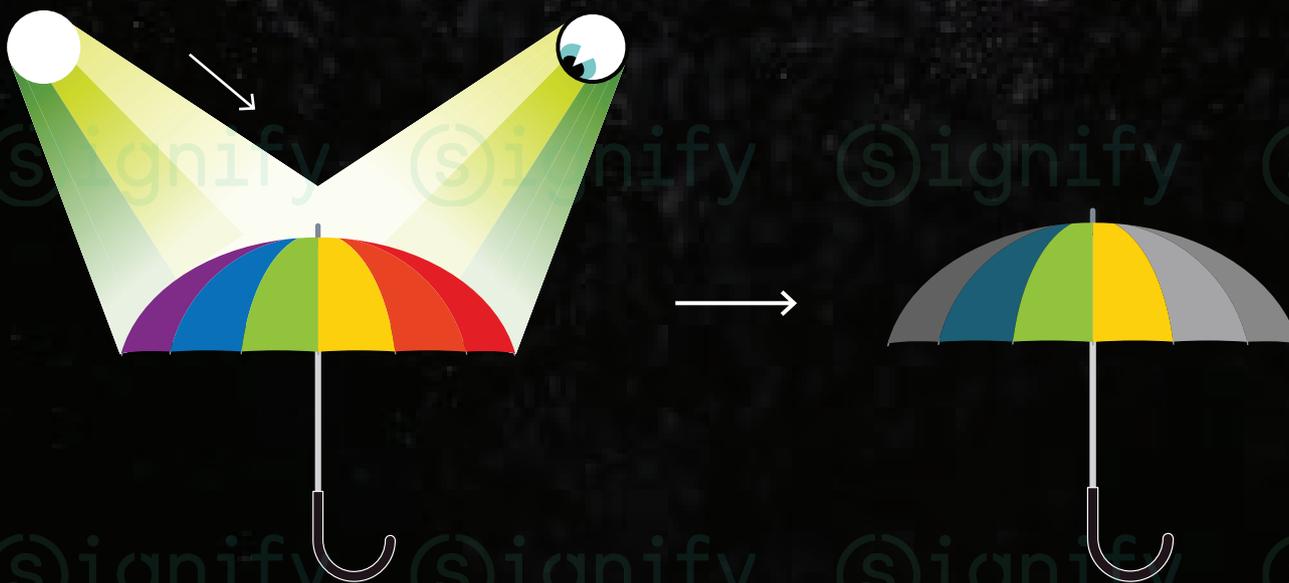
En el caso de la iluminación de interiores, R_a se usa también para clasificar fuentes de luz en función de su calidad de reproducción del color (tabla 6.2.). La tabla 6.3 contiene los valores R_a reales de algunos tipos de lámpara.

R_a rango	Reproducción de color
90 - 100	Excelente
80 - 90	Buena
60 - 80	Moderada
< 60	Pobre

Table 6.2. Clasificación de la reproducción del color.



Figures 6.15. and 6.16. Un paraguas iluminado con luz con un espectro continuo y discontinuo, respectivamente. Las imágenes en color como las percibe el observador son muy distintas (parte derecha).



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 R_a 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.

Tipo de lámparas	R_a
Incandescentes y halógenas	100
TL 940	90
TL 840	80
TL 640	60
LED blanco	60 - 95
Halogenúro metálico	70 - 90
Sodio de alta presión	25
Sodio de baja presión	0

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

A couple is jogging on a paved path that overlooks a city. The scene is captured during sunrise or sunset, with a warm, golden glow over the city and the ocean in the background. The woman is in the foreground, wearing a patterned long-sleeve shirt and dark leggings. The man is slightly behind her, shirtless and wearing dark shorts. The city below is densely packed with buildings, and the ocean is visible on the left side of the frame. The overall atmosphere is peaceful and active.

Luz y salud



126 Ritmos circadianos

128 Sensibilidad espectral biológica no visual

129 Iluminación y terapia

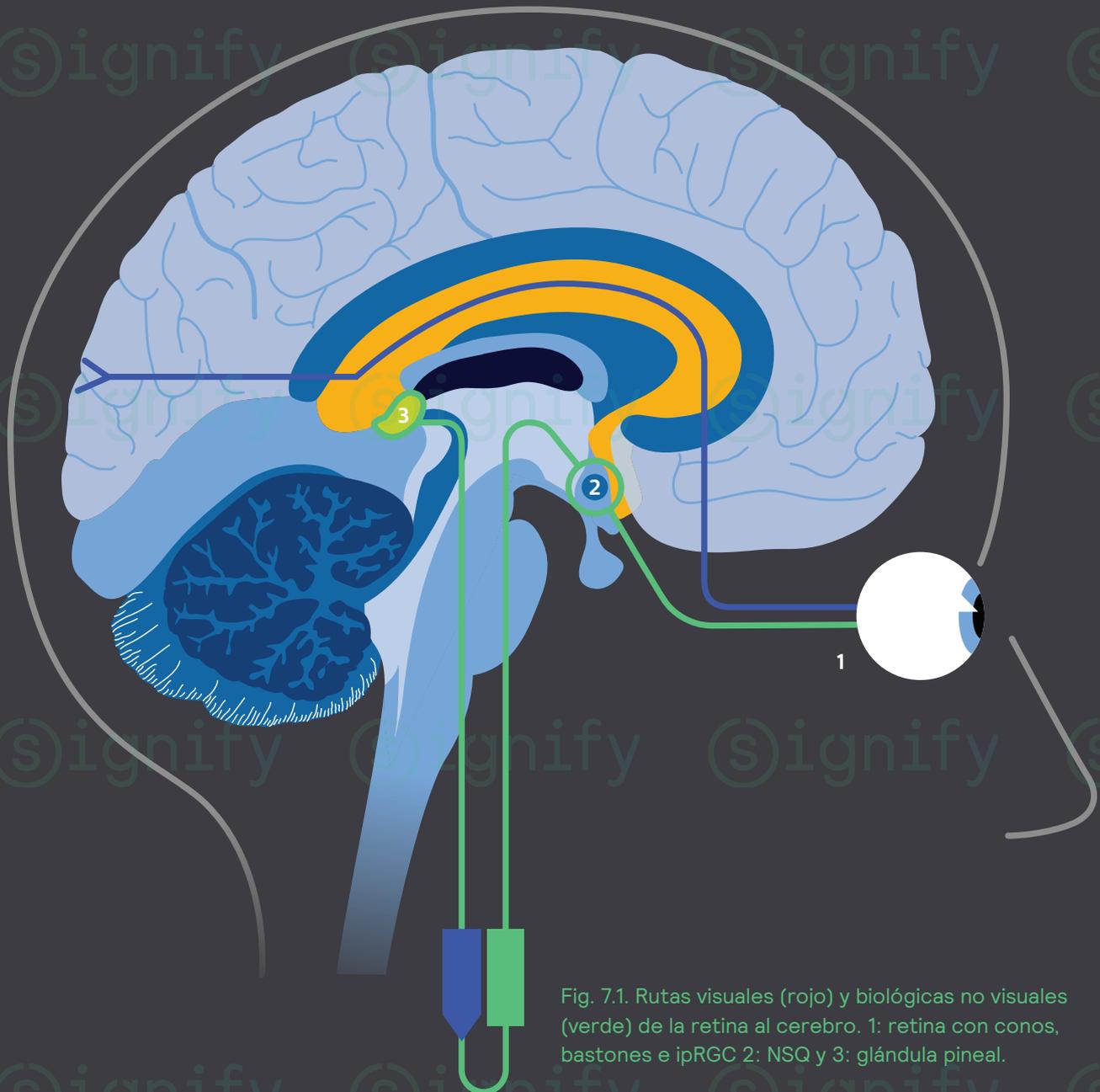


Fig. 7.1. Rutas visuales (rojo) y biológicas no visuales (verde) de la retina al cerebro. 1: retina con conos, bastones e ipRGC 2: NSQ y 3: glándula pineal.

Fotoreceptor

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).

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.

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 cardíaco, 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.

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.

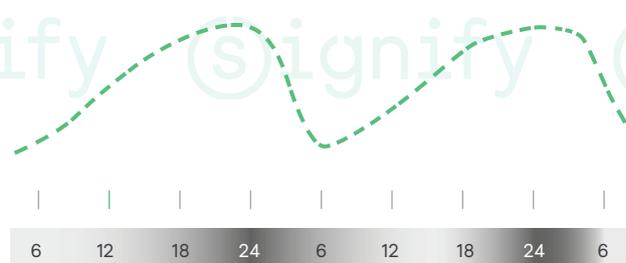


Fig. 7.2. Curva doble (2 x 24 horas) de los ritmos diarios típicos de la temperatura corporal (escala relativa).

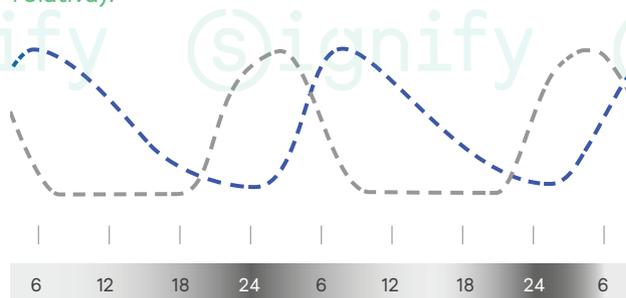


Fig. 7.3. Curva doble (2 x 24 horas) de los ritmos diarios típicos del cortisol (azul) y la melatonina (verde) (escala relativa).



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.

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.

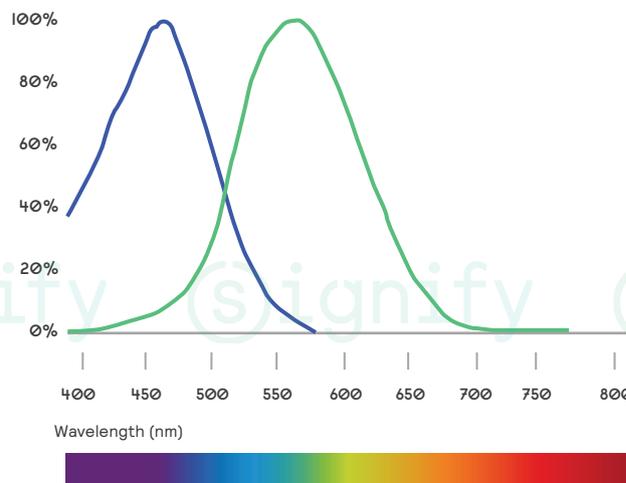


Fig. 7.4. Curva de sensibilidad espectral biológica no visual (basada en la supresión de melatonina), en azul, y curva de sensibilidad visual del ojo $V(\lambda)$, en rojo.

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.

Aprenda más sobre
conceptos básico de
luz y salud

[Ver más >>](#)

Calidad de la iluminación

8

- 134** Nivel de iluminación
 - 135 Luminancia e iluminancia
 - 135 Efectos del nivel de iluminación
 - 136 Planos para la especificación del nivel de iluminación
 - 137** Distribución espacial de la luz
 - 137 Relaciones de uniformidad y luminancia
 - 138 Limitación del deslumbramiento

- 140** Direccionalidad de la luz
 - 140 Luz direccional
 - 140 Luz difusa
 - 142 Luz indirecta
 - 142 Distribución luminosa de las luminarias

- 143** Color de la luz
 - 144 Reproducción del color
 - 144 Temperatura de color
 - 144 Luz de colores

- 145** Economía de la luz
 - 145 Instalación de iluminación
 - 146 Control de iluminación

- 147** La luz y el medio ambiente
 - 149 Cambio climático



La iluminación es un
arte al mismo tiempo
que es una ciencia.



Puesto que no hay reglas fijas que controlen el proceso de diseño de iluminación, tampoco habrá una solución única ideal 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

Nivel de iluminación

El nivel de iluminación se usa para indicar la cantidad de luz existente.

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.

Aprenda más sobre los niveles de iluminación

[Ver más >>](#)

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.

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



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

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.

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.



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.

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.

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

- **Techo:** 0.6-0.9
- **Paredes:** 0.3-0.8
- **Plano de trabajos:** 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. 8.3. Correspondencia de las reflectancias del campo de visión para lograr relaciones de luminancias correctas y cómodas.

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.

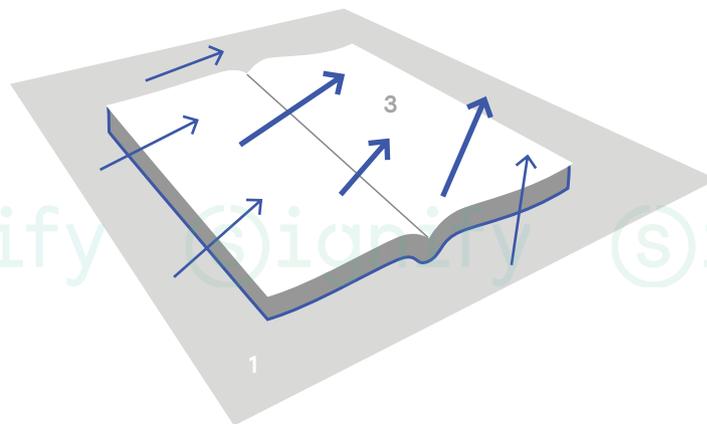


Fig. 8.4. La relación de luminancia en el entorno próximo a la tarea visual no debe ser superior a 3:1.

Deslumbramiento por luz natural

Las ventanas puede 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/m^2 . con un cielo cubierto, el valor puede llegar a ser de hasta 200 cd/m^2 . 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.

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.

Aprenda más sobre cálculos básicos para un diseño de iluminación

[Ver más >>](#)

Aprenda más sobre el método del factor de utilización para calcular un nivel de iluminación medio

[Ver más >>](#)



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

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.

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.

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.

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.

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.

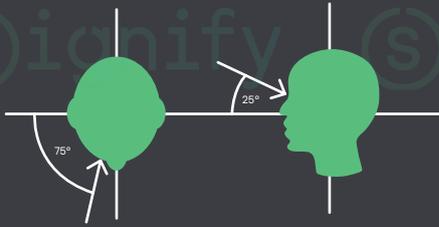


Fig. 8.6. Luz direccional desde la derecha de la figura

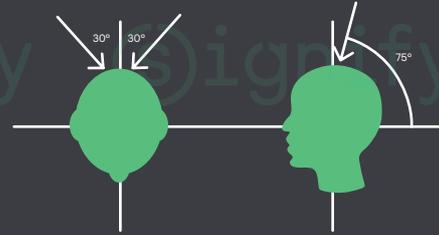


Fig. 8.9. Iluminación posterior

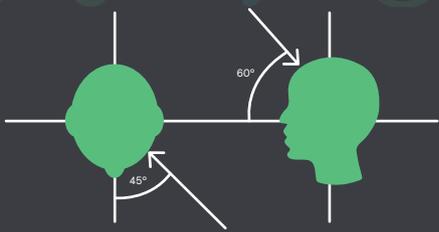


Fig. 8.7. Luz direccional desde la parte superior izquierda de la figura.

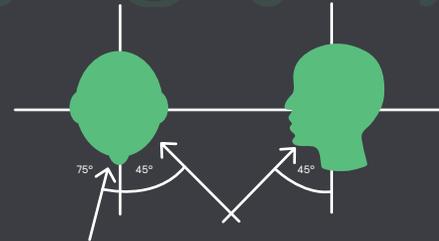


Fig. 8.10. Iluminación desde abajo

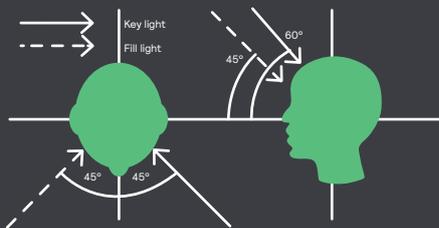


Fig. 8.8. Combinación de luz principal y de relleno

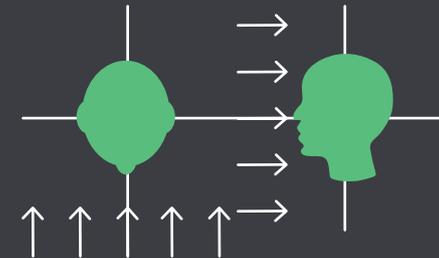


Fig. 8.11. Iluminación difusa

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.

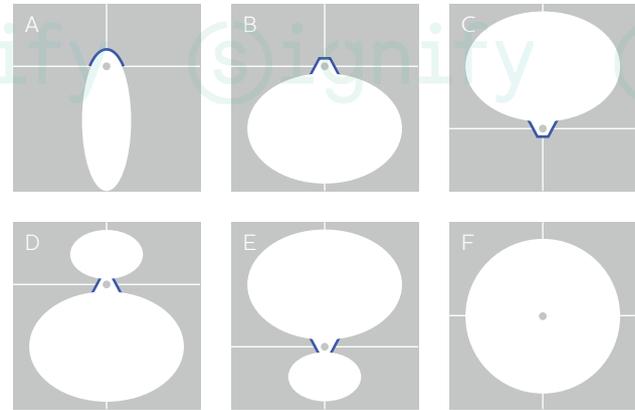
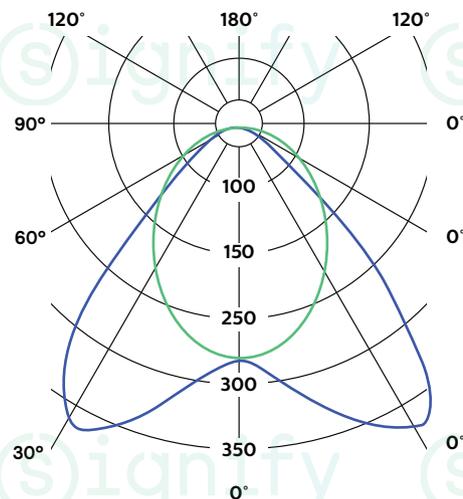


Fig. 8.12. Diagramas polares de intensidad luminosa de
 A: haz estrecho B: haz ancho C: haz indirecto
 D: haz predominantemente directo E: haz
 predominantemente indirecto F: haz omnidireccional.



Fotometrías

Tipos de simetría para luminarias:

Diagrama de intensidad polar

Distribución luminosa en 2 planos:

- Plano C0–C180 plano vertical perpendicular al eje de la luminaria
- Plano C90 – C270 plano vertical a lo largo del eje de la luminaria

Intensidad luminosa en candelas/1000 lúmenes

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



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 Ra de reproducción del color para muchos usos de iluminación de interiores y exteriores.

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.

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.

No hace falta mencionar que junto a los colores saturados, también es bueno utilizar algo de luz blanca con una buena reproducción de color para generar un buen efecto natural.



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

Economía de la luz

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

Instalación de iluminación

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.

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
- 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

Aprenda más sobre las instalaciones de iluminación y los costes asociados

[Ver más >>](#)

El coste principal es el de la energía. La iluminación, además 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.

Sistemas de Control

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.

Luz y medioambiente

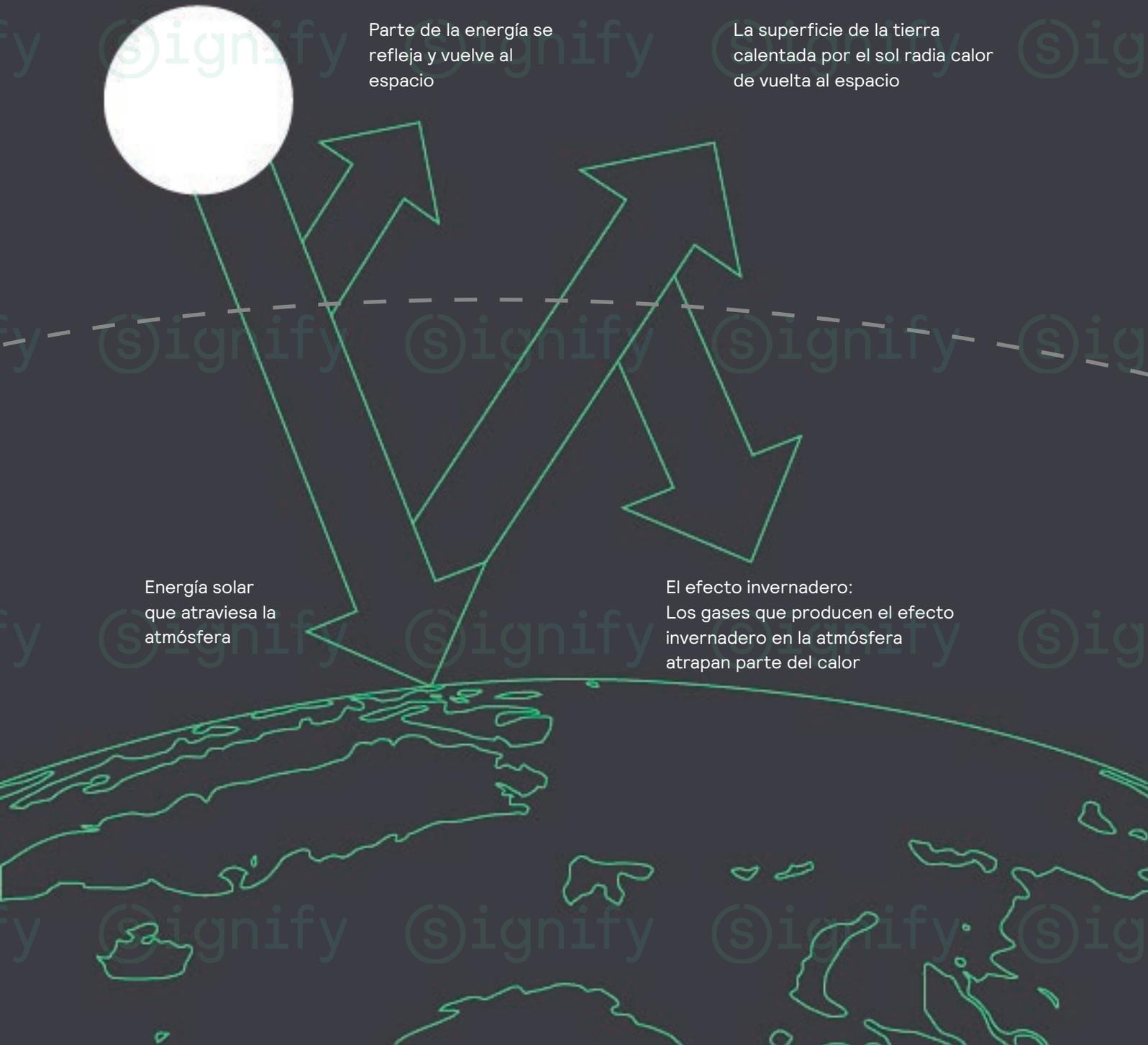
El Club de Roma, grupo internacional de profesionales de los campos de la diplomacia, la industria, la educación y la sociedad civil, publicó en 1972 el informe “Los límites del crecimiento”.

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.

Aprenda más sobre luz y medioambiente.

[Ver más >>](#)



Parte de la energía se refleja y vuelve al espacio

La superficie de la tierra calentada por el sol radia calor de vuelta al espacio

Energía solar que atraviesa la atmósfera

El efecto invernadero: Los gases que producen el efecto invernadero en la atmósfera atrapan parte del calor

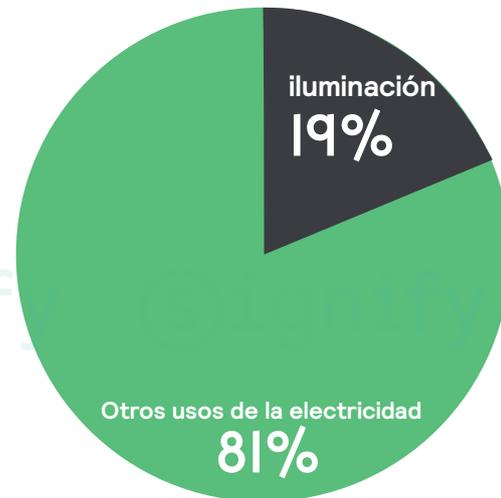
Cambio climático

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 vuelve totalmente al espacio. 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.



Glossary

Glosario de términos y abreviaciones

Candela (CD): Es la unidad del SI de medidas para la Intensidad luminosa. La candela se usa normalmente en las curvas polares de distribución luminosa para medir la intensidad de la luz en cada dirección. Se debe tener cuidado al leer las candelas porque pueden mal interpretarse fácilmente.

CIE: Abreviatura de “Commission Internationale de l’éclairage”. También conocida como la Comisión Internacional de Iluminación. Esta es una organización global, independiente y sin fines de lucro que se ocupa de todos los aspectos del conocimiento y la investigación sobre iluminación. El CIE hace recomendaciones que a menudo se utilizan como códigos de práctica nacionales.

Rendimiento de color: El efecto de una fuente de luz en la apariencia del color de los objetos en comparación con su apariencia de color bajo una fuente de luz de referencia, como una lámpara de filamento de tungsteno o la luz del día.

Temperatura de color: Término que describe la apariencia del color de una fuente de luz térmica, medida en Kelvin (K). Fuentes de luz cálidas tienen alrededor de 2,000K o 3,000K. Fuentes de luz frías tienen típicamente 4,500K 6,500K, o más. Estrictamente hablando, la apariencia de color de las lámparas de descarga y LED debe denominarse

Temperatura de color correlacionada, CCT

Driver: Similar a un transformador, excepto que produce una corriente constante como salida en lugar de un voltaje constante. A medida que se agregan más LED al circuito, el voltaje de salida del controlador aumenta para mantener una corriente constante a través de los LED. Tenga en cuenta que en Europa el voltaje de salida está limitado a un máximo de 50 V. Esto hace que las instalaciones de LED sean inherentemente seguras. Vea el texto principal para una descripción completa.

Eficacia: Una forma de describir la eficiencia de una fuente de luz, como una lámpara o un LED. La eficacia se mide en lm / W .

Deslumbramiento: Una luz que causa incomodidad o reduce la capacidad visual porque proviene de una fuente que es demasiado brillante en comparación con su fondo. El deslumbramiento puede reducirse atenuando la fuente, bloqueando la vista directa o aumentando la luminancia del fondo. Aunque hay existen métodos para calcular el deslumbramiento en diseños de iluminación, el “deslumbramiento” sigue siendo muy subjetivo y se ve afectado por muchos factores, por ejemplo, la edad de las personas.

Lumen (lm): Una medida de la cantidad total de luz visible emitida por una fuente. El término proviene de la denominación de flujo luminoso del SI y se denota con el símbolo lm. No indica nada sobre el color, la intensidad o la calidad de la luz. Solo es una descripción de cuánta luz emite la fuente. Ver también Lux.

Luminaria: Aparato que distribuye, filtra o transforma la luz producida por una lámpara o conjunto de lámparas y que incluye todos los elementos necesarios para fijar y proteger las lámparas y para conectarlas a la red

Lux: Unidad de nivel de iluminación (el término SI es iluminancia). Un lux es un lumen por metro cuadrado. Una oficina puede estar iluminada a 300 lux, un salón doméstico a 50 lux. Tenga en cuenta que esto es un promedio; no tiene en cuenta la uniformidad, la calidad de la luz o su color.

Visión Mesópica: Condición de visión en situaciones de iluminación baja pero no del todo oscura. La visión mesópica es típica de las condiciones de visión al atardecer o donde bajo el alumbrado público. Es la etapa intermedia entre la visión fotópica y escotópica.

Visión fotópica: Condición de visión normal durante todo día, con nivel de iluminación elevado y los colores se pueden ver claramente. En la visión fotópica, los conos en nuestro ojo están completamente operativos. Compare esto con la visión mesópica y escotópica.

RGB: Una abreviatura para los colores rojo, verde, azul. Estos tres colores se pueden combinar para producir una amplia gama de colores y sombras. Tenga en cuenta que puede no ser posible lograr el tono exacto. Esto es importante si está tratando de hacer coincidir un color de pintura en particular.

Visión escotópica: Condición de visión a niveles muy bajos de iluminación (típicamente nivel inferior que el que proporciona la luna llena), bajo esta condición nuestros ojos no son capaces de distinguir colores, los objetos se ven solo en escala de grises. ver también visión mesópica y fotópica.

Estado Sólido: Término general que se refiere a todas las fuentes de luz electrónicas. No solo se refiere a LED, sino también a OLED, PLED, paneles planos, etc.

UV: Ultravioleta. Esta es una radiación de onda corta que daña materiales como telas, pinturas y plásticos. Los LED no emiten ningún UV.

Volt: La unidad de fuerza electromotriz o diferencia de potencial. El alto voltaje puede matar y el aislamiento que recubre los cables eléctricos (normalmente PVC) nos protegen.

Watio (W): La unidad de poder. Para circuitos resistivos simples, voltios x amperios = vatios. Tenga en cuenta que otras formas de potencia, como la mecánica y la térmica, también se pueden expresar en vatios.

Capítulo 1

Ondas electromagnéticas

Aprenda más sobre las diferentes ondas de luz.

[Ver más >>](#)

El espectro electromagnético

Aprenda más sobre el espectro electromagnético.

[Ver más >>](#)

¿Qué es un prima?

Aprenda más sobre la función de un prima.

[Ver más >>](#)

Capítulo 2

Temperatura de color

Aprenda más sobre la temperatura de color.

[Ver más >>](#)

Lámparas incandescentes y halógenas

Aprenda más sobre las lámparas incandescentes y halógenas

[Ver más >>](#)

Descarga en gas

Aprenda más sobre los conceptos básicos de las lámparas de descarga en gas.

[Ver más >>](#)

¿Qué es HID?

Aprenda más sobre las lámparas de alta intensidad y sus beneficios

[Ver más >>](#)

¿Qué es la fluorescencia?

Aprenda más sobre luz fluorescente.

[Ver más >>](#)

Connected LEDs

Aprenda más leyendo nuestro ebook: "Connected LED"

[Ver más >>](#)

LED

Aprenda más sobre como funciona un LED.

[Ver más >>](#)

Capítulo 3

Reflexión y absorción de la luz

Aprenda más sobre los diferentes tipos de reflexión y absorción de la luz.

[Ver más >>](#)

Refracción

Aprenda más sobre la refracción de la luz.

[Ver más >>](#)

Capítulo 4

¿Cuál es el valor de 1 vatio?

Aprenda más sobre el valor de 1 vatio.

[Ver más >>](#)

Fotometría

Aprenda más sobre fotometría

[Ver más >>](#)

Flujo luminoso

Aprenda más sobre flujo luminoso.

[Ver más >>](#)

Intensidad luminosa

Aprenda más sobre intensidad luminosa.

[Ver más >>](#)

Luminancia e iluminancia

Aprenda más sobre los conceptos de luminancia e iluminancia

[Ver más >>](#)

Capítulo 5

El proceso visual del ojo

Aprenda más sobre el proceso visual del ojo.

[Ver más >>](#)

Visión

Aprenda más sobre la visión.

[Ver más >>](#)

¿Qué es el deslumbramiento?

Aprenda más sobre los diversos tipos de deslumbramiento

[Ver más >>](#)

Capítulo 6

Mezcla de color

Aprenda más sobre la mezcla de color.

[Ver más >>](#)

Rendimiento en color

Aprenda más sobre rendimiento en color.

[Ver más >>](#)

Capítulo 7

Luz y salud

Aprenda más sobre los conceptos básicos de luz y salud.

[Ver más >>](#)

Capítulo 8

Requerimientos de niveles de iluminación

Aprenda más sobre los requerimientos de niveles de iluminación

[Ver más >>](#)

Cálculos de iluminación

Aprenda más sobre cálculos básicos de iluminación.

[Ver más >>](#)

¿Qué es el método del factor de utilización?

Aprenda más sobre como calcular el nivel de iluminación medio mediante el método del factor de utilización

[Ver más >>](#)

Economía de la luz

Aprenda más sobre instalaciones de iluminación y sus costes asociados.

[Ver más >>](#)

Iluminación y medioambiente

Aprenda más sobre iluminación y medioambiente

[Ver más >>](#)

Index

1/4 Interferencia	47,49	Catarata	97
Absorción	44	Cátodo	22
Acomodación	86	Cebador	24
Adaptación	88	Células fotovoltaicas	70
Adaptación cromática	116	Ganglionares	81,125
Agotamiento	129	Chips 14	32
Agudeza	91	Chips de diodos	31
Agudeza Visual	91	Ciclo halógeno	21
Ajuste	86	CIE	81,110,111,119
Alumbrado público	41,68,137,134,135,136	Clasificación de la reproducción del color	119
Amortización	22	Club de Roma 55	147
Angulo sólido	57	Colisión elástica	23
Ánimo de las personas	100	Colisión ionizante	23
Ánodo	22	Color y emociones	100
Apariencia de color	113,115,119	Colores complementarios	106
Arcoíris	13	Colores primarios	106
Área aparente	60	Colores secundarios	106
Atención	93,126	Colores verdaderos	117
Azúcar en la sangre	126	Combinación de colores	105
Balasto electrónico	24	Combinación de colores aditiva	106
Bastones	81	Comodidad visual	90
Cambio climático	149	Conos	128
Candela	57	Contraste	90
Candela por metro cuadrado	59	Contraste de color	94
Cantidades de luz	70	Contraste de luminancia	91
		Controlador	32
		Convergencia	88
		Coordenadas de cromaticidad	110
		Corriente eléctrica	24
		Cortisol	126

Index

Costes de funcionamiento	145	Economía de la luz	145
Costes de instalación	145	Efecto biológico no visual	125
Costes de inversión	145	Efecto cebra	137
Costes de mantenimiento	145	Efecto invernadero	148
Costes de sustitución de lámparas	145	Efecto Purkinje	85
Costes energéticos	145	Efectos emocionales de la luz	100
Curva de la sensibilidad del ojo	54	Eficacia luminosa	56
Curva del cuerpo negro	111	Electrodo	22
Curva de sensibilidad espectral biológica no visual	128	Electroluminiscencia	26
Depresión invernal	129	Electrones libres 10, 12	24
Deslumbramiento	135	Emisión CO2 55	24
Deslumbramiento indirecto	135, 139, 142	Equipos eléctricos 10	22
Deslumbramiento por luz natural	139	Esfera de Ulbricht 28	8
Deslumbramiento superior	96	Espectro 6, 39, 42, 45	11
Dicroico	47	Espectro continuo 42, 43, 44	8
Diodo emisor de luz	31	Espectro discontinuo 42, 43	24
Dirección de visión	60	Espectro electromagnético	11
Diseño de iluminación	133	Familias de lámparas	37
Dispositivo de arranque	24	Fibras de vidrio	43
Dispositivo limitador de la corriente	41	Filamento	20
Distribución de la luz	142	Filtro de color	45
Distribución espacial de la luz	137	Filtros	47
Distribución espectral de la energía	28	Flujo	56
Distribución luminosa	142	Fluorescencia	27
Driver	32, 150	Fósforo	35
		Fotocélula	70
		Fotón	15
		Fóvea	81
		Frecuencia	10
		Gafas de lectura	97

Glándula pineal	124	Interferencia	47
Goniofotómetro	71	Ionización	23
Halógeno	21	ipRGC	125
HID	25	Iris	79
Hormona de la energía	126	Isolíneas de temperatura de color	111
Hormona del sueño	126	Luminancias naturales	134
Hormonas	125	Jet lag	129
Humor vítreo	97	Kelvin	19
IEC	56	Kruithof	100
Iluminación de calidad	130	Lámpara LED	32
Iluminación decorativa	140	Lámparas de baja presión compactas	24
Iluminación de instalaciones deportivas	136	Lámparas de descarga	22
Iluminación de túneles	88	Lámparas de descarga de alta intensidad	25
Iluminación dinámica	144	Lámparas de descarga de alta presión	25
Iluminancia	57	Lámparas halógenas	21
Iluminancia cilíndrica	66	Lámparas de halogenuros metálicos	25
Iluminancia horizontal	135	Lámparas de mercurio de baja presión	24
Iluminancia semicilíndrica	67	Lámparas fluorescentes	25
Iluminancia semiesférica	66	Lámparas incandescentes	21
Iluminancia vertical	64	Lámparas TL	37
Impresión CMYK	108	LED blancos	35
Incapacidad visual por deslumbramiento	138	LED de fósforo	35
Incomodidad visual por deslumbramiento	95	Ley de la inversa del cuadrado 24	63
Índice de refracción	46	Ley del coseno 24	37
Índice de reproducción cromática	117	Limitación del deslumbramiento	138
Índice de reproducción del color	119	lm/W	56
Inductivo	24	Longitud de onda	10
Infrarrojo	47	Lumen	151
Intensidad	57	Luminaria	151
Intensida luminosa	57	Luminancia	59

Índice

Luminacómetro	73
Luminosidad	61
Lux	151
Luz de escaparates	140
Luz de relleno	140
Luz difusa	140
Luz direccional	140
Luz indirecta	140
Luz natural	146
Luz principal	140
Luz y salud	122
Max Planck	15
Maxwell	8
Medidores de luz	70
Medioambiente	147
Melatonina	126
Mercurio	149
Mercurio de alta presión	25
Mercurio de baja presión	25
Mezcla sustractiva	108
Microonda	11
Nanómetro	11
Nivel de iluminación	134
Núcleo supraquiasmático	125
Ojo	77
OLED	34

Onda electromagnética	8
Pacientes con Alzheimer	129
Pantalla de ordenador	139
Pérdida por absorción	31
Persianas	139
Personas mayores	86
Pigmentos	88
Pinturas	108
Plano de trabajo	135
Plano horizontal	135
Plano vertical	136
Poder de refracción	86
Polvo fluorescente	27
Prisma	12
Proceso de ionización	23
Propiedades de las lámparas	21
Psicológico	75
Pupila	79
Radiación electromagnética	8
Radiador de cuerpo negro	19
Radiadores de descarga	22
Radiadores de estado sólido	31
Radiador térmico	19
Rayos cósmicos	11
Rayos gamma	11
Rayos X	11
Reciclaje	149
Reconocimiento facial	67
Reflectancia	41
Reflexión	41

Reflexión difusa	42	Sustancias peligrosas	149
Reflexión especular	42	Temperatura corporal	126
Reflexión interna total	43	Temperatura de color	144
Reflexión mixta	42	Temperatura de color correlacionada	28
Refracción	46	Teoría cuántica	15
Regulación	146	Terapia	129
Reloj biológico	125	Tiempo de observación	93
Rendimiento visual	77	Trabajos por turnos	129
Reproducción del color 43	117	Transmisión	45
Retina	81	Transmisión por televisión	136
Revestimiento dieléctrico	47	Trastornos afectivos estacionales	129
Ritmo cardíaco	126	Trastornos alimenticios	129
Ritmo de 24 horas	126	Trastornos del reloj biológico	129
Ritmos circadianos	126	Triángulo de color	110
Ritmo sueño-vigilia	129	Triángulo de colores de la CIE	110
SAD	129	Tubo de descarga	22
Salud	122	Tungstone	21
Semiconductor	31	Ultravioleta	23
Sensibilidad de color	70	Uniformidad	137
Sensibilidad de contraste	92	Unión p-n	31
Sensibilidad del ojo	13	UVA	11
Sensibilidad espectral	54	UVB	11
Sensibilidad espectral biológica no visual	128	UVC	11
Sensibilidad espectral del ojo	54	Valores de iluminación típicos	58
Sodio	25	valor Ra	119
Sol	13	Velocidad de la luz	10
Somnolencia	126	Vida útil	21, 25, 145
Sostenibilidad	149	Visión escotópica	82
Sueño	126	Visión fotópica	82
Superficie de carretera	42	Visión mesópica	85

Sobre los autores

Prof. Wout van Bommel MSc

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)

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

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)..

Publicado por Philips Lighting University
High Tech Campus, Building 48 / OA, 5656 AE Eindhoven, The Netherlands
www.signify.com/global/lighting-academy

© 2019 Signify Holding. All rights reserved.

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 lanzamiento segunda edición: 2019



©signify

Signify Lighting Academy