

# INSTALACIONES INDUSTRIALES

---

## Tema 4 Iluminación

**Pedro Benito**

**Enero 2.014**

## INDICE

### INTRODUCCION

1. **CAPITULO I: LA LUZ**
  - 1.1. Generalidades
  - 1.2. Características de las Ondas
  - 1.3. Espectro de Frecuencias
  - 1.4. Radiación de una fuente con espectro continuo
  - 1.5. Radiación de una fuente con espectro discontinuo
  - 1.6. Naturaleza de la Luz
    - 1.6.1. Teoría Ondulatoria
    - 1.6.2. Teoría Corpuscular
  
2. **CAPITULO II: EL OJO**
  - 2.1. El ojo humano como órgano receptor de la luz
  - 2.2. Descripción estructural del ojo
  - 2.3. Formación de imágenes
  - 2.4. Curva de sensibilidad del ojo
  - 2.5. Acomodación
  - 2.6. Contraste
  - 2.7. Adaptación
  - 2.8. Deslumbramiento
  
3. **CAPITULO III: PROPIEDADES OPTICAS DE LA MATERIA**
  - 3.1. Reflexión
  - 3.2. Transmisión
  - 3.3. Absorción
  - 3.4. Refracción
  
4. **BIBLIOGRAFIA**

## LUMINOTECNIA

### INTRODUCCIÓN.

La luminotecnia es la ciencia aplicada que concierne a la luz, a su control y a su manipulación, aunque también podemos decir que es el arte de la iluminación eléctrica.

La luminotecnia se preocupa principalmente de los elementos físicos que intercambian energía para producir luz, lámparas y luminarias.

La iluminación en la actualidad se basa casi completamente en fuentes de luz eléctricas: lámparas con filamento en ampollas de vacío, lámparas de descarga y lámparas fluorescentes.

Los edificios están iluminados con niveles de luz similares a los de la luz día, y la iluminación selectiva enfoca incluso a mayor nivel para tareas de especial dificultad.

Desde sus comienzos la iluminación artificial ha tenido dos propósitos concretos: permitir la visibilidad en la oscuridad natural, y la creación de efectos visibles, para ello el desarrollo de la luminotecnia se ha caracterizado por la invención de fuentes de luz con mayor flujo luminoso y eficiencia.

La evolución de lámparas y luminarias a lo largo de la historia es un hecho indudable, aunque podemos decir que hasta la primera mitad del siglo XVIII el desarrollo fue escaso y las antorchas o teas utilizadas en la prehistoria con fines de iluminación y defensa de los animales se mantenían, eran fuentes usuales de luz que desde el punto de vista técnico no habían sobrepasado al nivel de fuego primitivo de la madera y solo se utilizaban en simples actividades domésticas y poco más. Pero en la

segunda mitad del siglo XVIII, marcada por el comienzo de la era industrial, principalmente en Inglaterra, que trajo como resultado el incremento de la demanda del comercio en el mundo, pero principalmente entre Europa y América, hubo necesidad de aumentar constantemente la producción y la maquinaria entró en las factorías. Las horas de trabajo aumentaron para conseguir satisfacer la demanda y por ello, aparece la necesidad de ampliar la jornada laboral a las horas nocturnas, lo que llevó a la obligación de instalar mejores fuentes de luz destacando en este tiempo la lámpara cilíndrica de chimenea “los quinquet”

Hacia la mitad del siglo XIX, la técnica de producción de la luz fue desarrollada utilizando la inyección de gas de carbón, energía que se suministraba a los llamados mecheros. Otro paso importante se consiguió cuando se sustituyó el aceite de las lámparas por parafina y posteriormente la utilización del acetileno.

Pero el primer gran impacto de la producción de luz artificial lo dieron Edison y Swan en 1879, cuando consiguieron hacer una lámpara útil mediante un filamento alimentado con electricidad.

La lámpara de Edison al igual que la de Swan, contenía un filamento de carbón que se calentaba en forma incandescente al paso de una corriente eléctrica. Para proteger el filamento de carbón vegetal de su carbonización, se montó en el interior de un bulbo de vidrio en el que se practicó el vacío, pero como el filamento de carbono se evaporaba rápidamente y por lo tanto la vida de la lámpara era pequeña, había que mejorar el filamento y se reemplazó por otro metálico que podía soportar altas temperaturas. Primero se utilizó osmio y más tarde tantalio que daban más luz con menos potencia eléctrica. Finalmente estos resultados se mejoraron cuando se introdujo el tungsteno para la fabricación del filamento. (1906).

Más adelante se introdujo en la ampolla de cristal gas inerte, que reduce el grado de evaporación del tungsteno pero que disminuye la temperatura del filamento porque éste disipa el calor más rápidamente. Para resolver este problema se procedió al arrollamiento en espiral del filamento lo que hizo reducir más las pérdidas del material en el gas.

A partir de aquí se dio otro paso importante cuando las fuentes de luz eléctrica usan la descarga en gas. A diferencia de las lámparas incandescente basadas en la termorradiación, es decir la luz se produce por la elevación de la temperatura, desprendiendo luz y calor, en la descarga en gas, unos electrodos realizan una descarga eléctrica en el gas de relleno (sodio o mercurio) situado entre ambos electrodos provocando una interacción con los átomos del vapor, produciendo una emisión de luz.

Finalmente se desarrolló la lámpara de descarga fluorescente tubular (el tubo fluorescente) basado en cubrir el tubo en su interior por una sustancia fosforescente o fluorescente cuya misión es convertir los rayos de luz ultravioleta (que se generan dentro y que no son visibles para el ojo humano), en radiaciones de luz visible.

Por último como lámpara más moderna está la lámpara de inducción en la que no existen electrodos y al ser éstos los elementos más vulnerables para una lámpara de descarga, permite tener una larga vida.

En el desarrollo de la luminotecnia en los últimos años pueden identificarse dos o tres importantes aspectos: el primero de ellos es que técnicos en luz y especialista en visión humana, han colaborado estrechamente convencidos de que la iluminación artificial no solo tiene que ser decorativa sino además eficaz y confortable en términos de vista y fatiga ocular.

En segundo lugar el técnico en iluminación ha aprendido del arquitecto, el cual siempre ha estado preocupado por la iluminación natural de sus edificios, pero raramente por la iluminación artificial.

Y un tercer aspecto podría ser el reconocimiento por parte de los ingenieros de instalaciones y diseñadores de edificios, del hecho de que grandes cantidades de iluminación artificial, generan grandes cantidades de calor, el cual si se ignora puede producir numerosas molestias, pero sin embargo, puede aprovecharse en la climatización del edificio.

Finalmente diremos que para trabajar con la luz, es preciso conocer un lenguaje técnico y una serie de criterios de medida y valoración del objeto del trabajo, en este caso la luz. Así como para trabajar con madera o metal es necesario conocer un sistema de medidas capaz de definir el peso, medida, grosor, dureza etc., que nada tiene que ver con las herramientas para trabajar estos materiales, con la luz ocurre lo mismo, necesitamos una serie de criterios que nos indiquen detalles sobre la naturaleza intrínseca de la luz, ya sea forma, color, densidad y potencia.

Por ello a lo largo de la asignatura veremos aspectos como la intensidad luminosa, el flujo luminoso, la iluminancia, radiancia, luminancia y otros aspectos como, transmisión, reflexión, refracción, absorción etc.

Continuando con la historia de la evolución de las fuentes luminosas podemos concluir con un esquema de la eficiencia lumínica de las distintas lámparas empleadas a lo largo de la historia, tomando como referencia el lumen por vatio ( $\text{lm/w}$ ). Partiendo de la lámpara de parafina que proporcionaba  $0,2 \text{ lm/w}$ , la lámpara de filamento de Edison  $2$  a  $3 \text{ lm/w}$ , la lámpara de tungsteno  $10 \text{ lm/w}$ , las lámparas de vapor de

mercurio 40 lm/w, las de sodio 80 y las fluorescentes 40 lm/w. En la actualidad estos rendimientos se han superado ampliamente.

Estudios recientes sobre la salud y el comportamiento de las personas, indican que, la luz favorece la salud y repercute positivamente sobre la motivación de las personas. Podemos afirmar que una iluminación correcta incrementa el factor de bienestar, la motivación para trabajar y con ello los resultados de las personas, por lo que las conclusiones de estos estudios se aplican cada vez con mayor fuerza en el mundo laboral.

La automatización de los recintos de trabajo, para obtener un entorno luminoso y ambiental óptimo en la oficina y en las áreas de trabajo, proporciona bienestar y mayor motivación a los empleados.

Por ello, se puede afirmar que las inversiones en iluminación y gestión de espacios, no son inversiones en el edificio sino más bien, inversiones en las personas.

En una oficina, los costes de personal representan aproximadamente el 80%, los equipos y comunicaciones el 12% y el restante 8%, costes del local. La automatización de los recintos representaría un porcentaje del 2 o 3%. Sin embargo la creación de las condiciones óptimas de trabajo contribuye al aumento del rendimiento y al mantenimiento de la salud de los empleados y en consecuencia al descenso de los costes de personal.

Un sistema automático de iluminación no consiste solamente en que se conecte el alumbrado con la presencia de personas o cuando baja el nivel de iluminación. El sistema de automatización de la iluminación incluye un programa de luz dinámica, que permita cambiar de intensidad y de color a medida que pasan las horas y de alcanzar

niveles de iluminancia particularmente elevados, aprovechando la luz natural disponible y al mismo tiempo eliminando factores de perturbación generados por las condiciones cambiantes del exterior (deslumbramientos por la incidencia directa de los rayos solares, demasiada o muy poca luz, cambio de la temperatura exterior etc.)

Pero la luminotecnia que estudia la luz y su control, no solamente tiene aplicación en la iluminación de espacios, en la actualidad también es de aplicación en la medicina, que mediante técnicas asociadas permite la curación de enfermedades, así la LUMINOTERAPIA, es el tratamiento que mejores resultados está teniendo, tanto en cuadros depresivos de carácter estacional, como en patologías derivadas en turnos rotativos, o de los trastornos derivados de vuelos largos, trastornos del sueño, estados de ansiedad y otros. Básicamente se basa en la exposición a una luz blanca brillante con una intensidad de unos 10.000 lux o superior durante 30 minutos dos veces a la semana. El espectro de esta luz es un espectro sin ultravioletas (430 -700 nm) sin campos electromagnéticos, sin efecto estroboscópico.

Otros la CROMOTERAPIA que se utiliza en la medicina natural y se lleva a cabo a través de los colores en que se divide el espectro de la luz solar.

## CAPITULO I

### LA LUZ

#### 1.1. Generalidades.

Existen diversos tipos de energía: mecánica, electrostática y electromagnética.

Si a un cuerpo en reposo se le suministra energía mecánica, éste tiende a ponerse en movimiento transformando la energía suministrada en energía cinética, energía que lleva consigo y que comunica a otros cuerpos si colisiona con ellos.

El calor es una forma de energía que se propaga por convección, conducción o radiación.

Cuando “encendemos la luz”, conectamos el filamento metálico de una lámpara incandescente a través de una diferencia de potencial, lo cual hace fluir carga eléctrica por el filamento de un modo parecido a como la diferencia de presión de una manguera de riego hace fluir el agua por su interior. El flujo de electrones constituye la corriente eléctrica. Usualmente asociamos la corriente al movimiento de cargas en cables conductores, pero la corriente eléctrica surge de cualquier flujo de carga. Cuando la corriente eléctrica se propaga a través de los conductores y llega a un receptor se transforma en éste en otro tipo de energía.

Si el cuerpo o la fuente emisora irradia energía, la propagación se produce en radiación en forma de ondas que son las perturbaciones físicas que se propagan a través de un determinado medio o en el vacío.

Las ondas mecánicas propagan este tipo de energía a través de un medio material elástico. Son ondas longitudinales porque en ellas coincide la vibración de las partículas con la dirección de la propagación. Dos ejemplos son las vibraciones de un muelle y el sonido. En un muelle las vibraciones se propagan en una sola dirección y en el caso del sonido, se propagan tridimensionalmente.

Las ondas electromagnéticas propagan energía producida por oscilaciones de campos eléctricos y magnéticos y no necesitan un medio material de propagación. Por ejemplo, la luz.

Dentro de las diferentes formas de propagación de las ondas, se definen diversos regímenes. Desde el punto de vista de la luminotecnia, nos interesa el régimen periódico, que se define como aquel que se repite a intervalos regulares de tiempo y que se expresa gráficamente mediante varias formas de onda.

La forma de onda en el régimen periódico depende de una magnitud independiente (el tiempo) y su valor medio es nulo. Se trata de funciones armónicas simples como el seno o el coseno de una sola variable y son transversales es decir se propagan perpendicularmente a la dirección en que vibran las partículas.

## 1.2. Características de las ondas

### Longitud de onda ( $\lambda$ )

Se define como la distancia recorrida por la onda en un período. En una onda transversal se puede definir como la distancia entre dos máximos consecutivos o entre otros dos puntos cualesquiera que se encuentren en la misma fase.

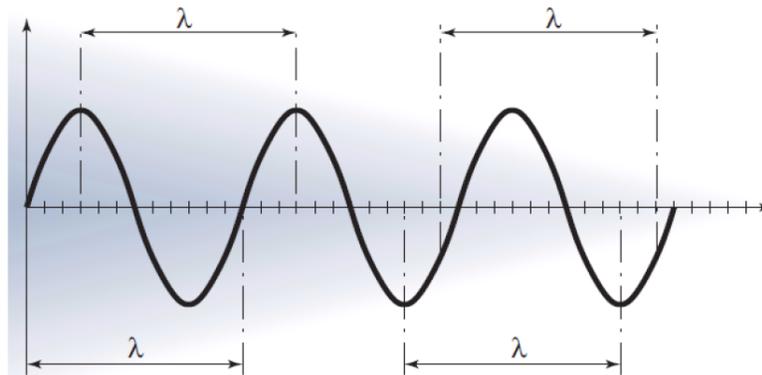


Figura 1. Longitud de onda  $\lambda$

La longitud de onda es una característica importante para clasificar el espectro de radiaciones visibles, objeto de estudio en esta LUMINOTECNIA.

Este parámetro queda determinado mediante el producto de la velocidad de propagación ( $V$ ), por el tiempo que tarda en realizar un ciclo (Periodo  $T$ ):

$$\lambda = V \times T \text{ (m/s} \cdot \text{s = m)}$$

Frecuencia ( $f$ ).

Se define como el número de periodos que tienen lugar en la unidad de tiempo.

Como el periodo es inverso de la frecuencia,  $T = 1/f$

$$\lambda = V \times T = V \cdot 1/f \text{ (m/s} \cdot \text{1/s}^{-1} = \text{m)}$$

Y por consiguiente, la frecuencia es directamente proporcional a la velocidad de propagación, e inversamente proporcional a la longitud de onda.

$f =$

Entre las radiaciones electromagnéticas debemos incluir los Rayos Gamma, Rayos X, Radiación Ultravioleta, Luz, Rayos Infrarrojos, Microondas, Ondas de Radio y otras radiaciones.

**El ojo humano es sensible a la radiación electromagnética con** longitudes de onda comprendidas entre 380 y 780 nm aproximadamente, margen que se denomina luz visible. Las longitudes de onda más cortas del espectro visible corresponden a la luz violeta y la más larga a la luz roja, y entre estos extremos se encuentran todos los colores del arco iris. Las ondas electromagnéticas con longitudes de onda ligeramente inferiores a las de la luz visible se denominan rayos ultravioleta, y las que poseen longitudes de onda ligeramente superiores, se conocen como ondas infrarrojas. La radiación térmica emitida por los cuerpos a temperaturas ordinarias está situada en la región infrarroja del espectro electromagnético. No existen límites en las longitudes de onda de la radiación electromagnética; es decir todas las longitudes de onda (o frecuencias) son teóricamente posibles.

Hay que tener en cuenta que los intervalos de longitud de onda (o de frecuencia) en los que se divide el espectro electromagnético no estén a veces bien definidos y frecuentemente se solapan. Por ejemplo, las ondas electromagnéticas con longitudes de onda del orden de 0,1 nm suelen denominarse Rayos X, pero si se originan a partir de radiactividad nuclear, se llaman Rayos Gamma.

Los fabricantes de lámparas suelen dar las curvas radiospectrométricas con valores comprendidos entre 380 nm y 780 nm.

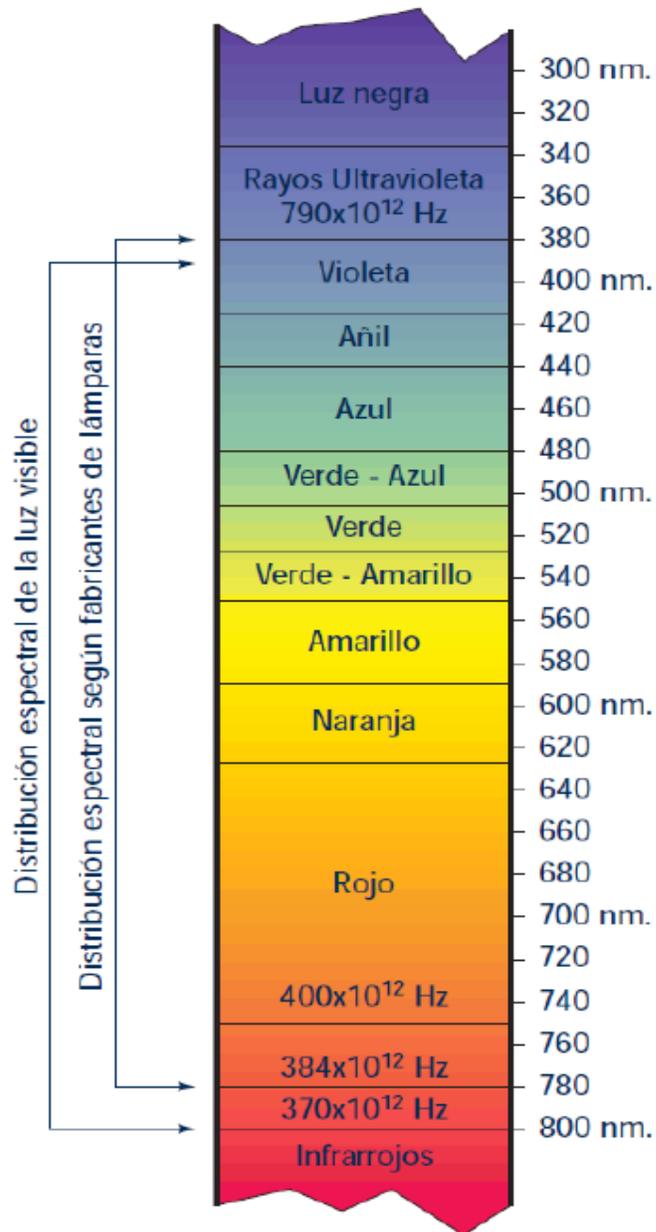


Figura 2. Clasificación del espectro visible

Como hemos visto, además del metro, para expresar la longitud de onda se emplea también el nanómetro (nm.) y otras unidades como son el Angstrom (Å) y la micra ( $\mu$ )

$$\mu\text{m.} = 10^{-6} \text{ m}$$

$$\text{nm.} = 10^{-9} \text{ m}$$

$$\text{Å} = 10^{-10} \text{ m}$$

#### 1.4. Radiación de una fuente con espectro continuo

Todo cuerpo a cualquier temperatura distinta del cero absoluto (-273 °C) irradia energía según un amplio campo de longitudes de onda. Esta radiación se denomina incandescente o radiación de temperatura. Son fuentes de luz artificial incandescente:

- La llama de una combustión, como la vela, un candil etc.
- Un lingote o barra de acero caliente al rojo vivo.
- El filamento de la lámpara de incandescencia.

Y es que el término incandescencia se aplica a los tipos de radiación asociados con la temperatura.

Para saber cómo se distribuye la potencia radiada en función de las longitudes de onda se utiliza el espectrorradiómetro que nos da la función espectrorradiométrica o curva de distribución espectral en la que en abcisas se sitúan longitud de onda y en ordenadas valores de energía radiada.

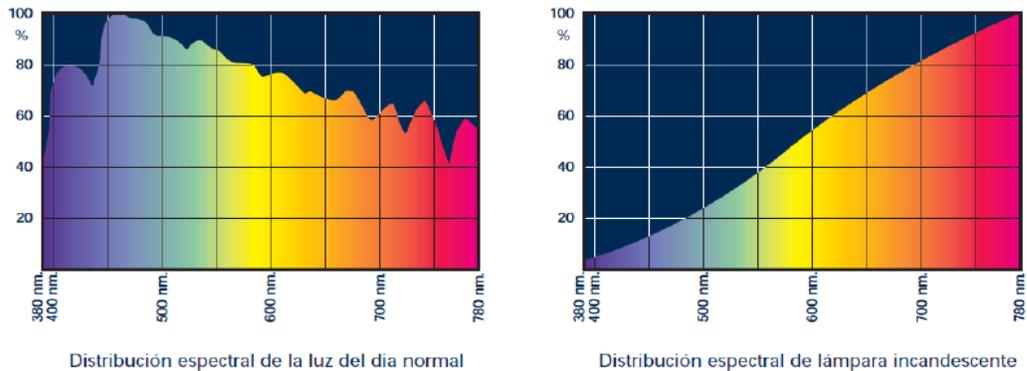
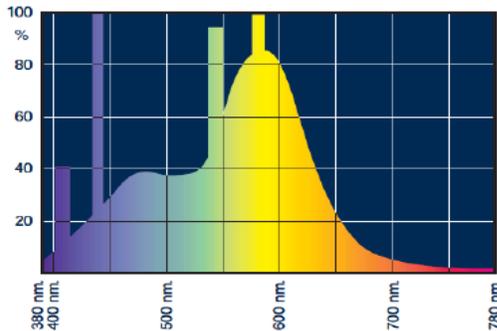


Figura 3

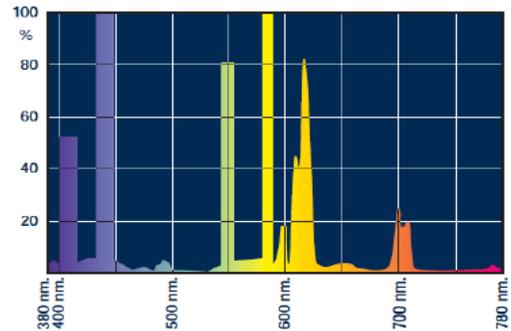
## 1.5. Radiación de una fuente con espectro discontinuo

Corresponde con la energía radiante procedente de una fuente de descarga gaseosa (vapor de sodio, vapor de mercurio, neón, fluor etc) y consiste en una radiación integrada por pequeños intervalos de longitud de onda que se denominan picos de emisión.

Este tipo de descarga se denomina **luminiscencia** y se caracteriza porque son picos de radiación independientes de la temperatura



Distribución espectral de una lámpara fluorescente de color blanco frío



Distribución espectral de una lámpara de vapor de mercurio de color corregido

Figura 4.

## 1.6. Naturaleza de la luz

Las teorías más antiguas consideraban a luz como algo emitido por el ojo. Posteriormente se comprendió que la luz debía proceder de los objetos que se veían y que entraba en el ojo produciendo la sensación de la visión.

Newton defendió la teoría corpuscular de la luz es decir que la luz es un haz de partículas, y que aplicó en su teoría de la ley de la refracción, en la que decía que la luz se mueve con más rapidez en el agua o el vidrio que en el aire, hipótesis que más tarde se demostró que era falsa.

Sin embargo la teoría ondulatoria de la luz fue defendida por Robert Hooke y Christian Huygens que explicaron la teoría de la refracción y la reflexión suponiendo que la luz viaja más lentamente en el agua y el vidrio que en el aire y fueron los

primeros en introducir la idea de interferencias como un fenómeno ondulatorio que se presentaba tanto en la luz como en el sonido.

Aunque la teoría ondulatoria es generalmente correcta cuando describe la propagación de la luz, falla a la hora de explicar otras propiedades de la luz, especialmente la intersección de la luz con la materia.

Otro científico llamado Hertz también descubrió el efecto fotoeléctrico de la luz, y este efecto solo puede explicarse mediante un modelo de partículas en el que las partículas de la luz se denominan fotones y la energía de un fotón está relacionada con la frecuencia de la onda luminosa, por la famosa fórmula de Einstein ( $E = h \cdot f$ ) donde  $h$  es la constante de Planck.

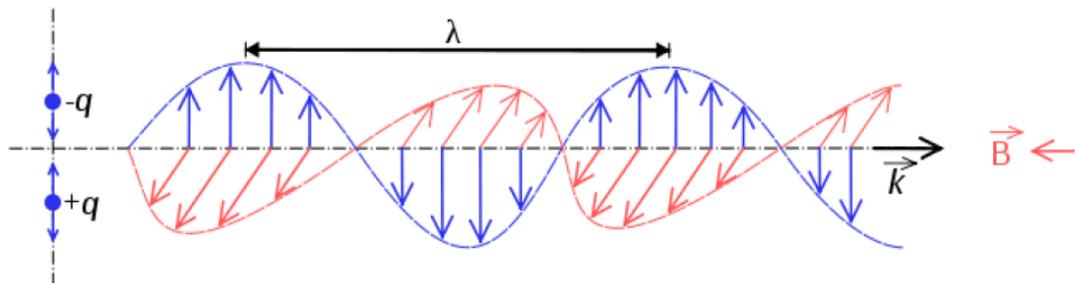
En definitiva la teoría moderna de la mecánica cuántica de la radiación luminosa, acepta el hecho de que la luz parece tener una doble naturaleza; por un lado los fenómenos de propagación de la luz encuentran mejor explicación dentro de la teoría electromagnética de Maxwell (naturaleza fundamental ondulatoria electromagnética) y por otro, la acción mutua entre la luz y la materia, en los procesos de absorción y emisión, es un fenómeno fotoeléctrico (naturaleza corpuscular).

La luz presenta una naturaleza compleja: depende de cómo la observemos, se manifestará como una onda o como una partícula. Estos dos estados no se excluyen, sino que son complementarios. Sin embargo, para obtener un estudio claro y conciso de su naturaleza, podemos clasificar los distintos fenómenos en los que participa según su interpretación teórica:

## TEORIA ONDULATORIA

### Descripción

Esta teoría considera que la luz es una onda electromagnética, consistente en un campo eléctrico que varía en el tiempo generando a su vez un campo magnético y viceversa, ya que los campos eléctricos variables generan campos magnéticos (ley de Ampère) y los campos magnéticos variables generan campos eléctricos (ley de Faraday). De esta forma, la onda se autopropaga indefinidamente a través del espacio, con campos magnéticos y eléctricos generándose continuamente. Estas ondas electromagnéticas son sinusoidales, con los campos eléctrico y magnético perpendiculares entre sí y respecto a la dirección de propagación ( $k$ ).



Vista lateral (izquierda) de una onda electromagnética a lo largo de un instante y vista frontal (derecha) de la misma en un momento determinado. De color rojo se representa el campo magnético y de azul el eléctrico.

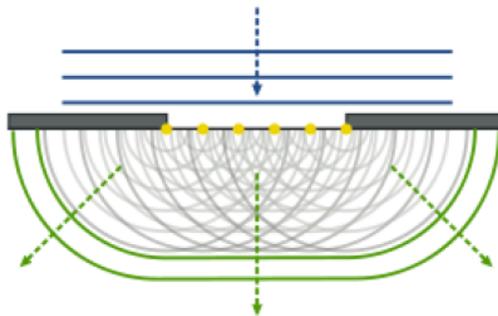
Para poder describir una onda electromagnética podemos utilizar los parámetros habituales de cualquier onda:

- **Amplitud (A):** Es la longitud máxima respecto a la posición de equilibrio que alcanza la onda en su desplazamiento.

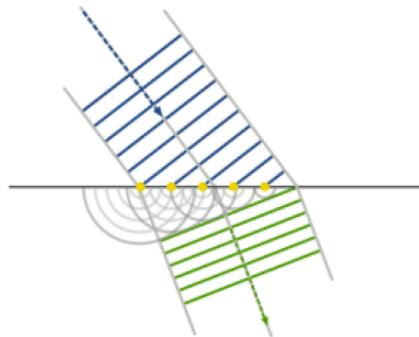
- **Periodo (T):** Es el tiempo necesario para el paso de dos máximos o mínimos sucesivos por un punto fijo en el espacio.
- **Frecuencia (v):** Número de oscilaciones del campo por unidad de tiempo. Es una cantidad inversa al periodo.
- **Longitud de onda ( $\lambda$ ):** Es la distancia lineal entre dos puntos equivalentes de ondas sucesivas.
- **Velocidad de propagación (V):** Es la distancia que recorre la onda en una unidad de tiempo. En el caso de la velocidad de propagación de la luz en el vacío, se representa con la letra c.

valle) formándose una interferencia destructiva, anulándose la onda. El experimento de Young, con sus rendijas, nos permite obtener dos focos de luz de la misma longitud de onda y amplitud, creando un patrón de interferencias sobre una pantalla.

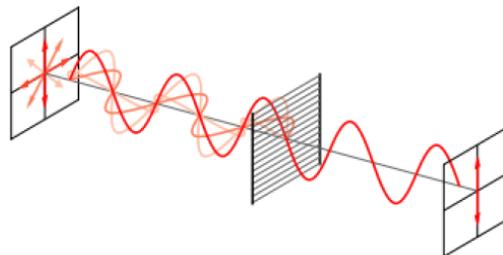
Las ondas cambian su dirección de propagación al cruzar un obstáculo puntiagudo o al pasar por una abertura estrecha. Como recoge el principio de Fresnel - Huygens, cada punto de un frente de ondas es un emisor de un nuevo frente de ondas que se propagan en todas las direcciones. La suma de todos los nuevos frentes de ondas, hacen que la perturbación se siga propagando en la dirección original. Sin embargo, si por medio de una rendija o de un obstáculo puntiagudo, se separa uno o unos pocos de los nuevos emisores de ondas, predominará la nueva dirección de propagación frente a la original.



La **difracción** de la luz se explica fácilmente si se tiene en cuenta este efecto exclusivo de las ondas. La **refracción**, también se puede explicar utilizando este principio, teniendo en cuenta que los nuevos frentes de onda generados en el nuevo medio, no se transmitirán con la misma velocidad que en el anterior medio, generando una distorsión en la dirección de propagación:



Otro fenómeno de la luz fácilmente identificable con su naturaleza ondulatoria es la **polarización**. La luz no polarizada está compuesta por ondas que vibran en todos los ángulos, al llegar a un medio polarizador, sólo las ondas que vibran en un ángulo determinado consiguen atravesar el medio, al poner otro polarizador a continuación, si el ángulo que deja pasar el medio coincide con el ángulo de vibración de la onda, la luz pasará íntegra, si no sólo una parte pasará hasta llegar a un ángulo de  $90^\circ$  entre los dos polarizadores, donde no pasará nada de luz.



Este efecto, además, permite demostrar el carácter transversal de la luz (sus ondas vibran en dirección perpendicular a la dirección de propagación).

El efecto Faraday y el cálculo de la velocidad de la luz,  $c$ , a partir de constantes eléctricas (permitividad,  $\epsilon_0$ ) y magnéticas (permeabilidad,  $\mu_0$ ) por parte de la teoría de Maxwell:

## TEORIA CORPUSCULAR

### Descripción

La teoría corpuscular estudia la luz como si se tratase de un torrente de partículas sin carga y sin masa llamadas **fotones**, capaces de portar todas las formas de radiación electromagnética. Esta interpretación resurgió debido a que, la luz, en sus interacciones con la materia, intercambia energía sólo en cantidades discretas (múltiplos de un valor mínimo) de energía denominadas cuantos. Este hecho es difícil de combinar con la idea de que la energía de la luz se emita en forma de ondas, pero es fácilmente visualizado en términos de corpúsculos de luz o fotones.

### Fenómenos corpusculares

Existen dos efectos que demuestran el carácter corpuscular de la luz. Según el orden histórico, el primer efecto que no se pudo explicar por la concepción ondulatoria de la luz fue **la radiación del cuerpo negro**.

Un **cuerpo negro** teóricamente perfecto que absorbe toda la luz que incide en él y por eso, cuando se calienta se convierte en un emisor ideal de radiación térmica, que permite estudiar con claridad el proceso de intercambio de energía entre radiación y materia. La distribución de frecuencias observadas de la radiación emitida por la caja a una temperatura de la cavidad dada, no se correspondía con las predicciones teóricas de la física clásica. Para poder explicarlo, Max Planck, al comienzo del siglo XX, postuló que para ser descrita correctamente, se tenía que asumir que la luz de frecuencia  $\nu$  es absorbida por múltiplos enteros de un cuanto de energía igual a  $h\nu$ , donde  $h$  es una constante física universal llamada Constante de Planck.

$$E=hf$$

En 1905, Albert Einstein utilizó la teoría cuántica recién desarrollada por Planck para explicar otro fenómeno no comprendido por la física clásica: el **efecto fotoeléctrico**. Este efecto consiste en que cuando un rayo monocromático de radiación electromagnética ilumina la superficie de un sólido (y, a veces, la de un líquido), se desprenden electrones en un fenómeno conocido como fotoemisión o efecto fotoeléctrico externo. Estos electrones poseen una energía cinética que puede ser medida electrónicamente con un colector con carga negativa conectado a la superficie emisora. No se podía entender que la emisión de los llamados "fotoelectrones" fuese inmediata e independiente de la intensidad del rayo. Eran incluso capaces de salir despedidos con intensidades extremadamente bajas, lo que excluía la posibilidad de que la superficie acumulara de alguna forma la energía suficiente para disparar los electrones. Además, el número de electrones era proporcional a la intensidad del rayo incidente. Einstein demostró que el efecto fotoeléctrico podía ser explicado asumiendo que la luz incidente estaba formada de fotones de energía  $hf$ .

La demostración final fue aportada por Arthur Compton que observó como al hacer incidir rayos X sobre elementos ligeros, estos se dispersaban con menor energía y además se desprendían electrones (fenómeno posteriormente denominado en su honor como **efecto Compton**). Compton, ayudándose de las teorías anteriores, le dio una explicación satisfactoria al problema tratando la luz como partículas que chocan elásticamente con los electrones como dos bolas de billar. El fotón, corpúsculo de luz, golpea al electrón: el electrón sale disparado con una parte de la energía del fotón y el fotón refleja su menor energía en su frecuencia.

## CAPITULO II

### EL OJO

#### 2.1. El ojo humano como órgano receptor de la luz.

El ojo es el órgano fisiológico del sentido de la vista, mediante el cual se experimentan las sensaciones de la luz y color. Para que se realice el proceso de la iluminación, como acción y efecto de iluminar y ver, se requieren tres agentes:

- 1) La fuente productora de luz o radiación luminosa.
- 2) El objeto a iluminar que necesitamos que sea visible.
- 3) El ojo, que recibe la energía luminosa y la transforma en imágenes que son enviadas al cerebro para su interpretación.

El estudio y descripción de los componentes del ojo, así como el proceso que se realiza desde que la luz le llega y pasa por las vías y centros visuales hasta que es interpretada por el cerebro, nos llevaría al campo de la neurofisiología. Aquí descubriremos y expondremos algunos comportamientos y conceptos del sentido de la vista, cuyo conocimiento es indispensable y contribuye a un mejor diseño de las instalaciones de iluminación.

#### 2.2. Descripción estructural del ojo

El ojo está constituido principalmente por los siguientes elementos:

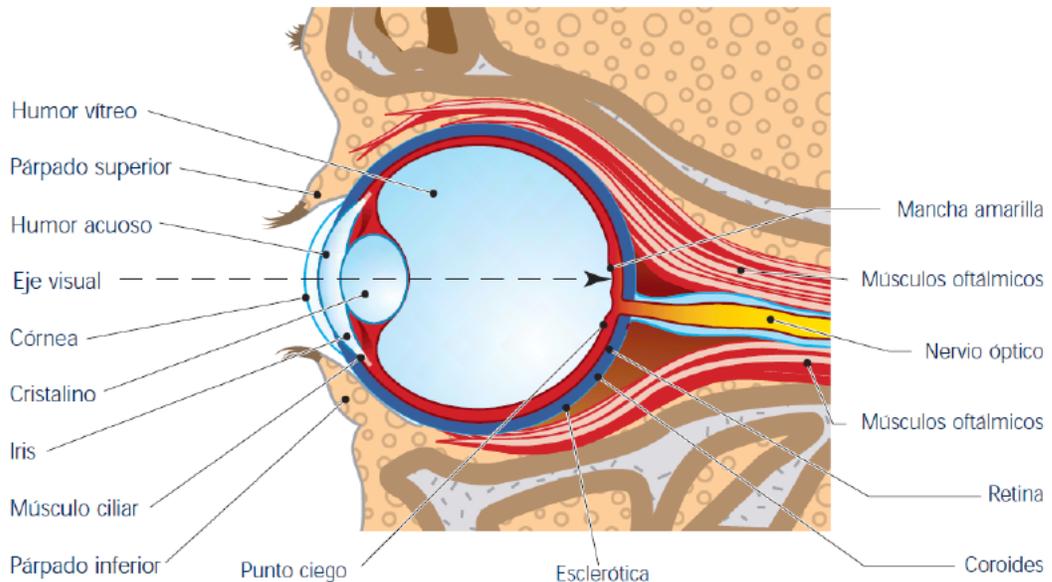


Figura 1. Constitución del ojo humano

**a) Globo ocular:** Cámara que tiene como función principal la formación de la imagen en la retina.

**b) Córnea:** Tiene la misión de recibir y transmitir las impresiones visuales y constituye el componente óptico refractor fundamental del ojo.

**c) Cristalino:** Es una lente biconvexa, transparente e incolora situado tras el iris. Esta membrana elástica cambia su forma para enfocar los objetivos

**d) Iris:** Lámina circular situada frente al cristalino y muy pigmentada. Puede contraer la pupila controlando la cantidad de luz que pasa al cristalino.

**e) Pupila:** Orificio circular situado en el centro del iris y a través del cual pasan los rayos luminosos. La abertura de este orificio la controla el iris y su constricción se llama miosis y la dilatación midriasis.

**f) Retina:** Es la película interna posterior del ojo constituida por una membrana nerviosa, expansión del nervio óptico, que tiene la función de recibir y transmitir imágenes o impresiones visuales. Contiene una finísima capa de células fotosensibles, conos y bastones, que divergen del nervio óptico y que están en la parte externa próximas a la capa pigmentada.

**g) Conos:** Células fotosensibles de la retina o fotorreceptores que se encuentran principalmente en la fóvea. Son muy sensibles a los colores y casi insensibles a la luz. De ahí que cumplan la función de discriminar los destellos finos y la de percibir los colores (Fig. 2)

**h) Bastones y bastoncillos:** Células fotosensibles de la retina o fotorreceptores que se encuentran solo fuera de la fóvea y más concentrados en la periferia. Son muy sensibles a la luz y al movimiento, y casi insensibles al color. De ahí que la misión de los bastones sea la de percibir la mayor o menor claridad con que están iluminados los objetos (Fig. 2).-

**i) Mácula:** Mancha amarilla situada en el polo posterior de la retina, sobre el eje óptico, donde se produce la fijación nítida y precisa de detalles y colores. En su centro se encuentra la fóvea, que solo está formada por conos.

**j) Punto ciego:** Punto de la retina por donde el nervio óptico conduce las imágenes o sensaciones de luz al cerebro. En este punto no hay fotorreceptores.

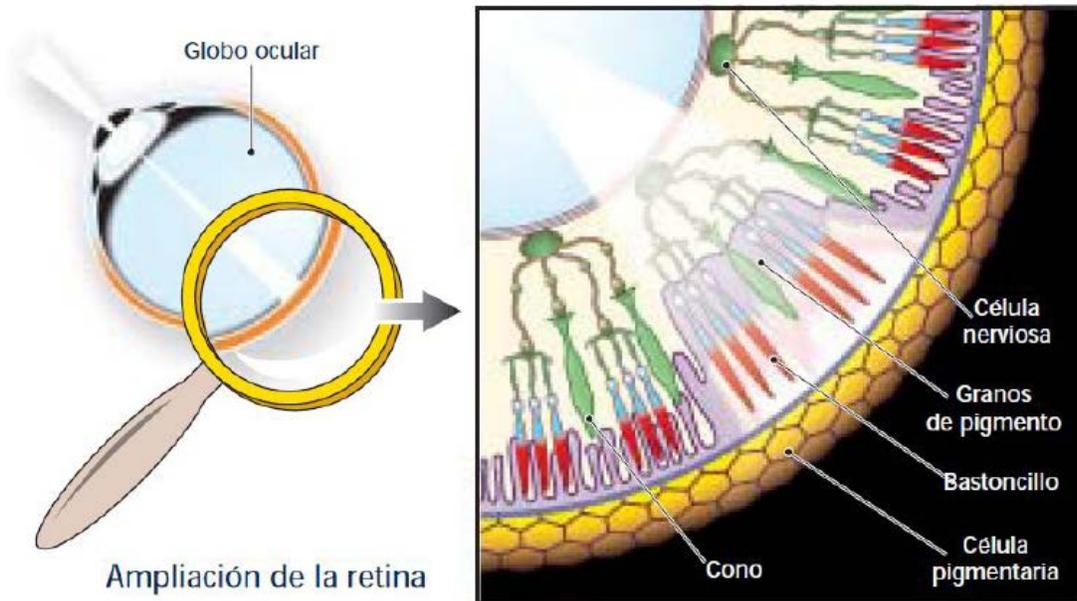


Figura 2. Parte fotosensible del ojo. Actuación de bastoncillos y conos.

## Consecuencias prácticas de la función de conos y bastones

Cuando miramos un espacio iluminado con poca luz, por ejemplo, en la penumbra por la noche, la agudeza visual es baja, porque no actúan los conos y no se distinguen los colores ni los detalles, de ahí el famoso refrán “de noche todos los gatos son pardos”. A esta visión nocturna se le llama escotópica y en ella intervienen esencialmente los bastones que captan con gran sensibilidad la mayor o menor cantidad de luz y el movimiento de los objetos.

Ello justifica que en algunos alumbrados públicos de avenidas, carreteras, y grandes superficies se efectúe el alumbrado con lámparas de vapor de sodio que reproducen mal los colores, pero aportan gran cantidad de luz.

Por el contrario, con luz diurna o cuando el nivel de iluminación se eleva lo suficiente, los objetos se ven con precisión y detalle porque actúan los bastones y principalmente los conos, con lo cual se pueden distinguir los colores. A la luz diurna se le llama visión fotópica. En este caso la cantidad de luz exige ir acompañada de calidad, pues solo la cantidad produciría irritabilidad en los ojos y deslumbramientos muy molestos.

### 2.3. Formación de imágenes

El campo visual del hombre está limitado por un ángulo de unos  $130^\circ$  en sentido vertical y unos  $180^\circ$  en sentido horizontal.

De los objetos iluminados o con luz propia situados en el campo visual parten rayos luminosos que atraviesan la córnea y el humor acuoso. El iris, mediante la abertura de la pupila, controla la cantidad de luz que se refracta a través del cristalino para incidir finalmente en la retina, donde el pigmento fotosensible de los fotorreceptores la registran como imágenes invertidas y mucho más pequeñas de lo natural, al igual que ocurre en la cámara fotográfica. Una vez recibidas y formadas las imágenes en la retina, a través del nervio óptico, son enviadas al cerebro, que se encarga de interpretarlas y rectificar su posición.

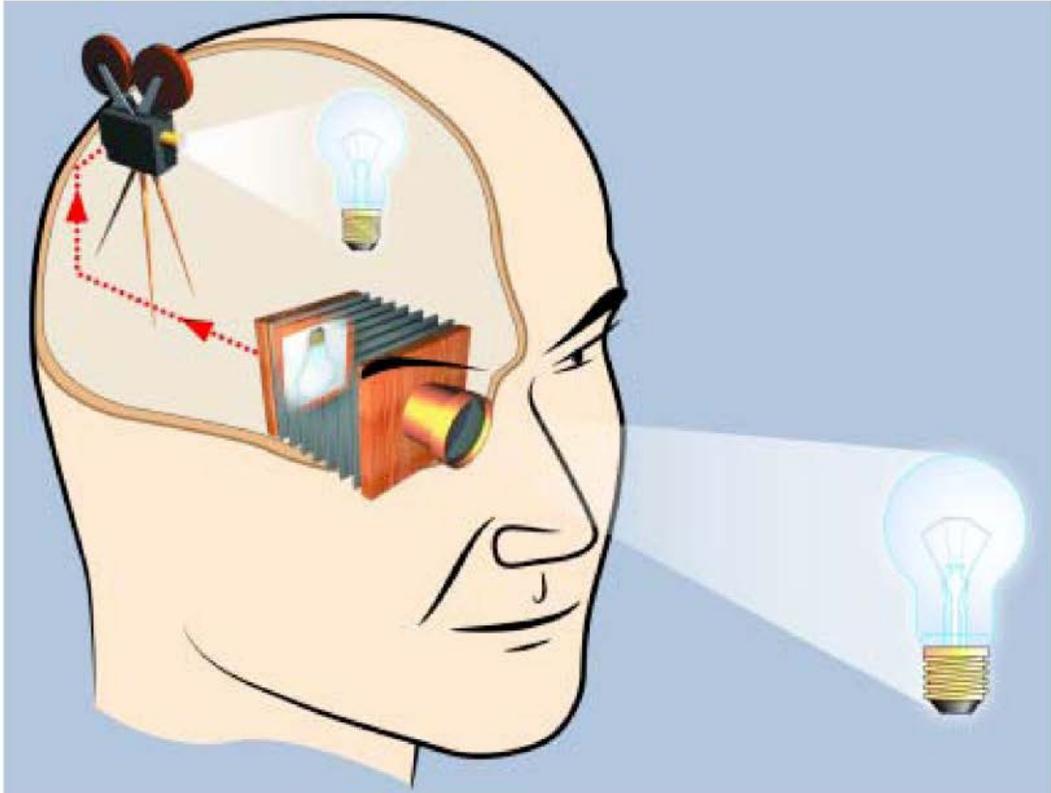


Figura 3. Formación de imagen y su rectificación en el cerebro.

## 2.4. Curva de sensibilidad del ojo

Las radiaciones de longitud de onda comprendidas entre los 380 nm y 780 nm son transformadas por el ojo en luz. Fuera de esta gama el ojo no ve, es ciego y no percibe nada, por lo tanto todas las fuentes luminosas tienen su propia radiación o mezcla de ellas comprendida dentro de dichos límites.

La luz blanca del medio día soleado es suma de todas las longitudes de onda del espectro visible. Si las hacemos llegar al ojo independientemente y con la misma

energía, se obtiene una curva como la que indicamos que ha sido elaborada por el CIE (Comité Internacional de Iluminación).

En esta curva se observa que para la luz blanca del día (fotópica), la máxima sensibilidad del ojo corresponde a la longitud de onda de 555 nm y al color amarillo y la mínima sensibilidad corresponde a los colores rojo y violeta.

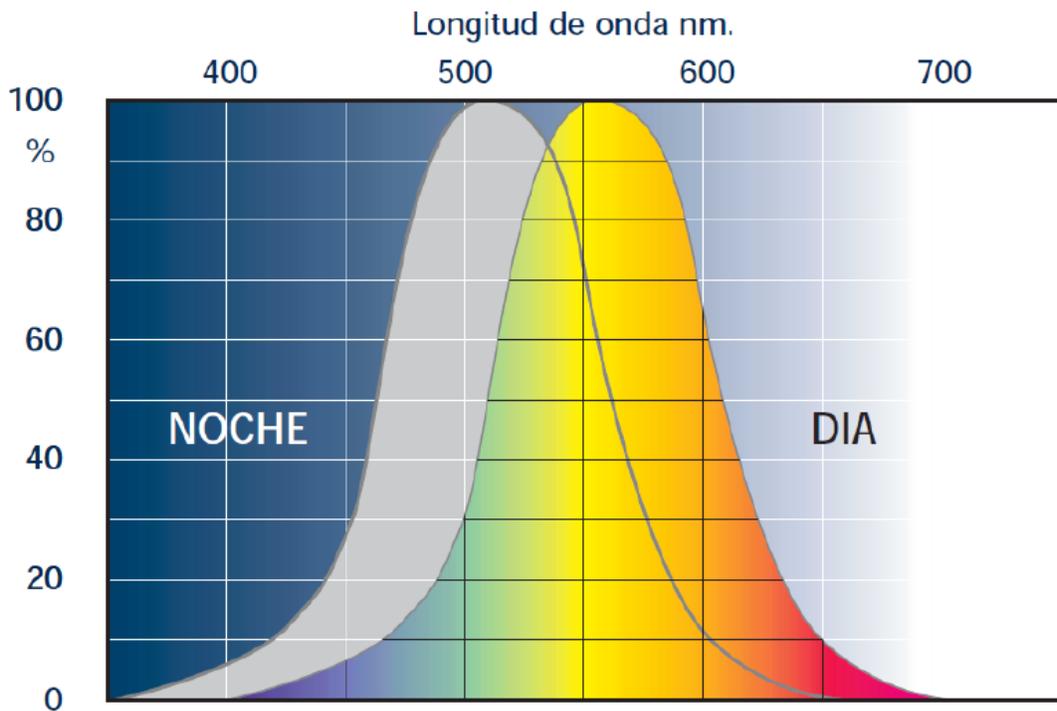


Figura 4. Curva de sensibilización del ojo a las radiaciones monocromáticas.

Por esta razón las fuentes luminosas cuyas longitudes de onda corresponden al amarillo-verde son las que tienen más eficacia, aunque de peor calidad debido a que tal luz no es apropiada para nuestro ojo, acostumbrado a la luz blanca del sol. Por este motivo en locales con alto nivel de iluminación se realzan los colores naranja y rojo.

En el caso de la luz nocturna (escotópica), el máximo de sensibilidad se desplaza hacia longitudes de onda menores (efecto Purkinje) y por consiguiente, las radiaciones de menor longitud de onda (azul-violeta) producen mayor intensidad de sensación con baja iluminación. Este efecto es de gran importancia cuando se proyectan locales con bajo nivel de iluminación en los que se ven mejor los colores azul y violeta.

## 2.5. Acomodación

Es la capacidad que tiene el ojo para ajustarse automáticamente a las diferentes distancias de los objetos, y obtener de esta forma imágenes nítidas en la retina. Este ajuste se efectúa variando la curvatura del cristalino y con ello la distancia focal por la contracción o distensión de los músculos filiares. Si el objeto se encuentra próximo al ojo, la curvatura del cristalino se hace mayor que cuando está lejos. En la máquina fotográfica el ajuste se hace variando la distancia entre el objetivo y la película sensible.

La acomodación o enfoque es más fácil con altas luminancias (iluminaciones).

La capacidad de acomodación del ojo disminuye con la edad a consecuencia del endurecimiento del cristalino.

## 2.6. Contraste

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

Para niveles de iluminación suficientemente elevados, el ojo normal es sensible a los colores, mientras que para bajos niveles de iluminación los objetos son percibidos fundamentalmente por el contraste de luminancias que presentan con relación al fondo. La diferencia de luminancia entre objeto que se observa y su espacio inmediato, es lo que se conoce por contraste.

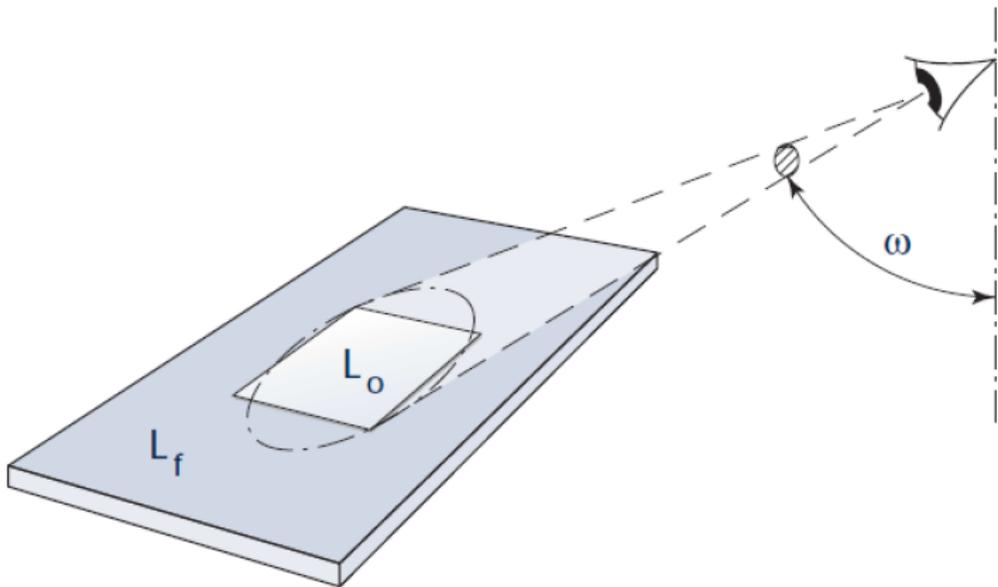


Figura 5.

Si la superficie del objeto tiene una luminancia " $L_o$ " y la superficie de fondo una luminancia " $L_f$ ", por tanto se llama contraste " $K$ " a la diferencia de estas dos luminancias, divididas por la de fondo, es decir:

Como hemos comentado, la visibilidad de un objeto situado sobre un fondo, depende de la diferencia de luminancias entre el objeto y el fondo. Un

objeto claro sobre fondo oscuro, su contraste será positivo (valores entre 0 e  $\infty$ ), en cambio un objeto más oscuro que su fondo se verá en silueta y su contraste será negativo, variando entre 0 y (-1).

El contraste K puede ser positivo o negativo:

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

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

El contraste K puede adquirir los siguientes valores:

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

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

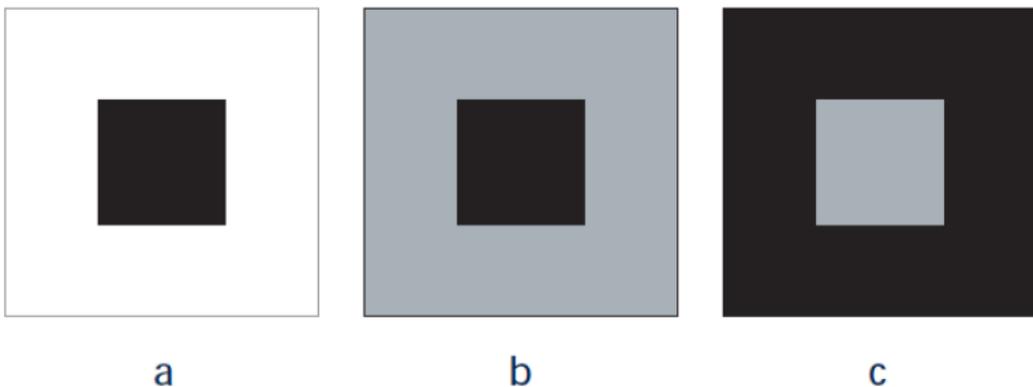


Figura 6

La figura 6a presenta un contraste fácil de distinguir mientras que la figura 6b y 6c ofrecen mayor dificultad.

También existe un contraste en colores:

Color del objeto	Color del fondo
1 Negro	Amarillo
2 Verde	Blanco
3 Rojo	Blanco
4 Azul	Blanco
5 Blanco	Azul
6 Negro	Blanco
7 Amarillo	Negro
8 Blanco	Rojo
9 Blanco	Verde
10 Blanco	Negro

## 2.7. Adaptación

Es la capacidad que tiene el ojo para ajustarse automáticamente a las diferentes iluminaciones de los objetos. Consiste en el ajuste del tamaño de la pupila para que la luminancia proyectada en la retina sea de un valor tolerable por las células sensibles. En su símil con la cámara fotográfica, sería la mayor o menor apertura del diafragma.

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

En iluminaciones de valores muy altos la pupila se reduce a un diámetro de aproximadamente 2 mm, y en iluminaciones muy bajas, se abre hasta aproximadamente 8 mm.

Cuando se pasa de un local con mucha iluminancia a otro completamente a oscuras, el ojo se ve sometido a un proceso de adaptación para cuyo ajuste total necesita unos 30 minutos; mientras que por el contrario, cuando se pasa de un local a oscuras a otro con mucha iluminancia, dicho periodo es de unos segundos.

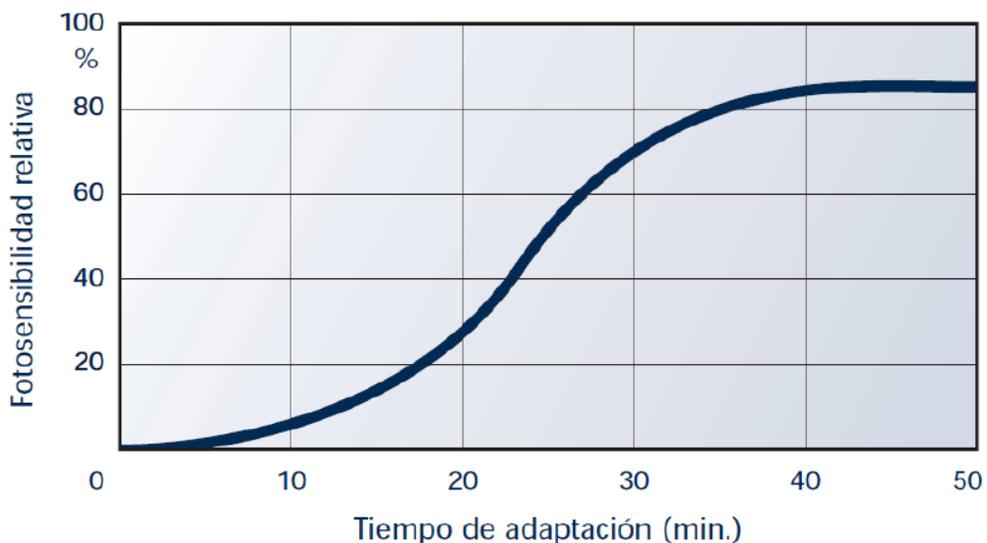


Figura 7. Curva de Fotosensibilidad relativa del ojo respecto al tiempo de adaptación.

## 2.8. Deslumbramiento

Es un fenómeno de la visión que produce molestia o disminución en la capacidad para distinguir objetos, o ambas cosas a la vez, debido a una inadecuada

distribución o escalonamiento de luminancias, o como consecuencia de contrastes excesivos en el espacio o en el tiempo.

Este fenómeno actúa sobre la retina del ojo en la cual produce una enérgica reacción fotoquímica, insensibilizándola durante un cierto tiempo, transcurrido el cual vuelve a recuperarse.

Los efectos que origina el deslumbramiento pueden ser de tipo psicológico (molesto) o de tipo fisiológico (perturbador). En cuanto a la forma de producirse puede ser directo como el proveniente de fuentes luminosas (lámparas, luminarias o ventanas), que se encuentran situadas dentro del campo visual, o reflejado por superficies de gran reflectancia, especialmente superficies especulares como las del metal pulido.

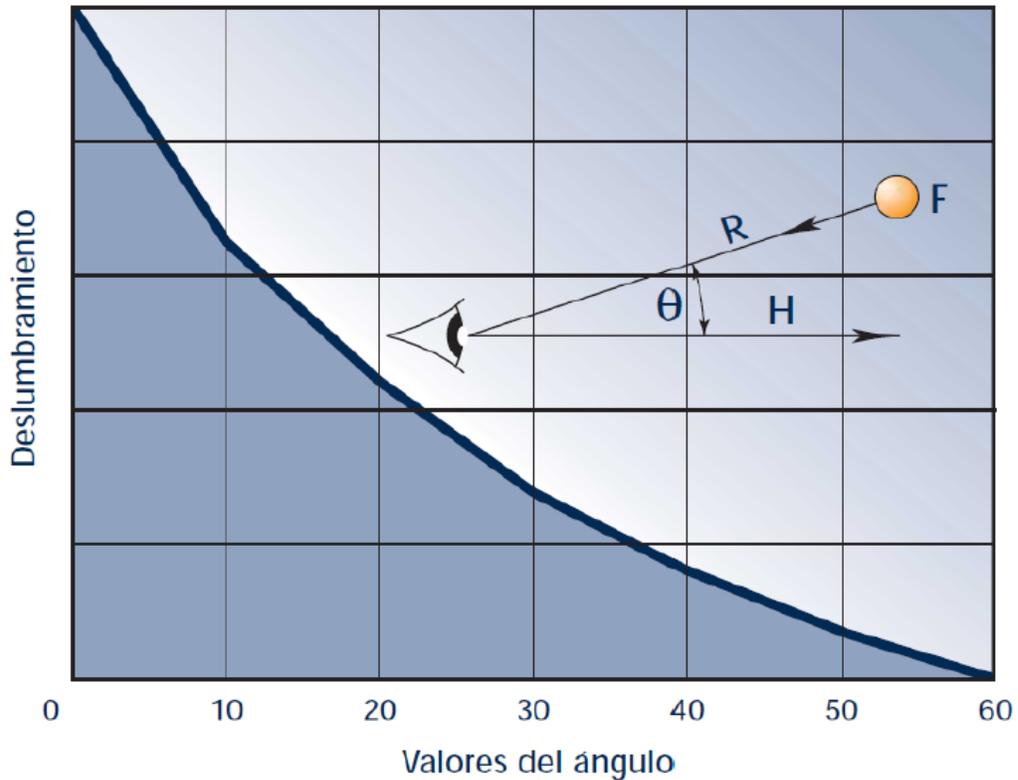


Figura 8. Deslumbramiento en función del ángulo  $\theta$ .

Las fuentes luminosas producen generalmente un deslumbramiento perturbador, éste es proporcional a la iluminación producida por la fuente de luz sobre la pupila del ojo, así como a un factor dependiente del ángulo " $\theta$ " que forman la línea recta "R" que une el ojo con el foco "F" y el plano horizontal "H" que pasa por el ojo en la posición de trabajo. En la Fig. 8 se indican los distintos deslumbramientos en función de este ángulo, habiéndose tomado como admisible un valor mínimo de  $30^\circ$ .

Las superficies que no sean completamente mates dan lugar, por reflexión de la luz, a imágenes más o menos netas de los focos luminosos. Incluso si su luminancia

no es excesiva, estas imágenes son casi siempre molestas cuando se encuentran en el campo visual y, especialmente, en la región central de este campo.

Según lo expuesto, se evitará en lo posible toda clase de superficies pulidas innecesarias (cristales sobre las mesas o superficies similares). En el caso que se utilicen superficies semi-pulidas (encerados) se iluminarán por medio de fuentes con la menor luminancia posible y cuya posición se calcule en función de los reflejos que puedan obtenerse (filtros, rejillas, difusores, etc.).

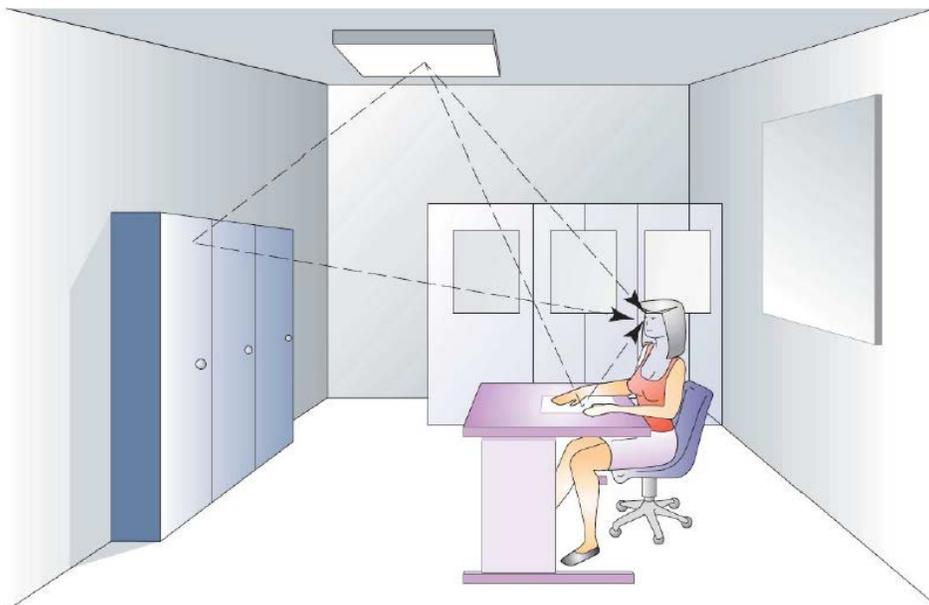


Figura 9. Superficies que reflejan la luz

## CAPITULO III

### PROPIEDADES ÓPTICAS DE LA MATERIA

Cuando un rayo de luz se propaga por un medio y alcanza el límite que lo separa de un segundo medio, puede suceder que retorne al primero (reflexión) o que lo atraviese y que ingrese al segundo medio donde parte se convertirá en otro tipo de energía (absorción) y parte no cambiará (transmisión).

Dos o los tres fenómenos ocurren simultáneamente, y como la energía no se puede destruir, la suma de la energía transmitida, absorbida y reflejada debe ser igual a la energía incidente.

Por lo tanto la aplicación de la luz en la forma más conveniente exige un control y una distribución que se consigue modificando sus características a merced a los fenómenos físicos de reflexión, absorción y transmisión de la luz sin olvidarnos de otro cuarto factor como la refracción.

#### 3.1. REFLEXIÓN

Cuando unas ondas de cualquier tipo inciden sobre una barrera plana como un espejo, se generan nuevas ondas que se mueven alejándose de la barrera. Este fenómeno se denomina reflexión.

Cuando la luz es reflejada por una superficie, un porcentaje de dicha luz se pierde debido al fenómeno de absorción. La relación entre la luz reflejada y la luz incidente se denomina reflectancia de la superficie.

Cualquier superficie que no es completamente negra puede reflejar luz. La cantidad de luz que refleja y la forma en que dicha luz es reflejada se determina por las propiedades de reflexión de la superficie. Se distinguen cuatro tipos de reflexiones: reflexión especular, reflexión compuesta, reflexión difusa y reflexión mixta. En estas propiedades de reflexión se fundamentan los sistemas reflectores.

Reflexión especular: Se produce cuando la superficie reflectora es lisa. Dicha reflexión obedece a dos leyes fundamentales: El rayo incidente, el rayo reflejado y la normal a la superficie en un punto de incidencia se trazan en un mismo plano, y la segunda es que el ángulo de incidencia es igual al ángulo de reflexión.

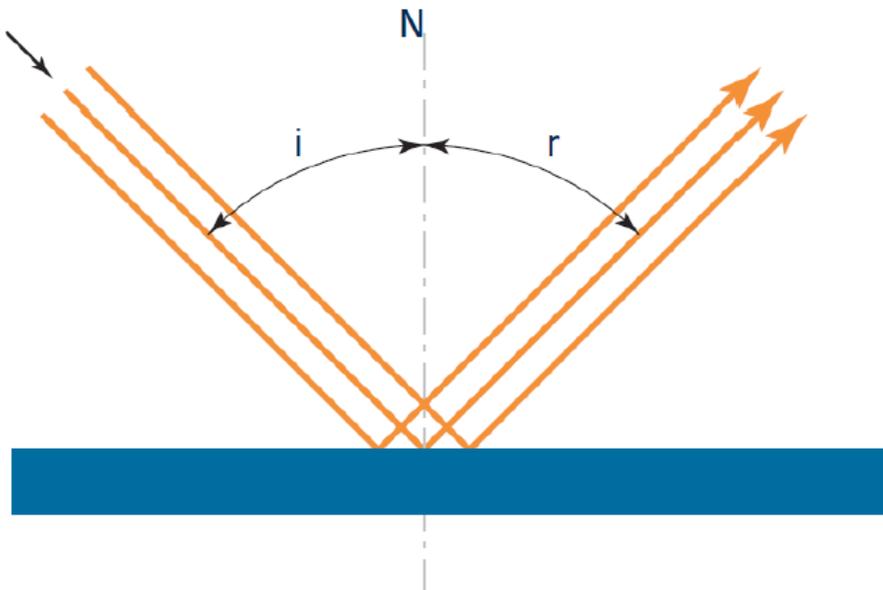


Figura 1. Reflexión especular

Reflexión compuesta: A diferencia de lo que ocurre en la reflexión especular, no hay imagen de espejo de la fuente de luz, pero el ángulo de intensidad máxima reflejada es igual al ángulo de incidencia. Esta reflexión ocurre cuando la superficie es irregular o rugosa.

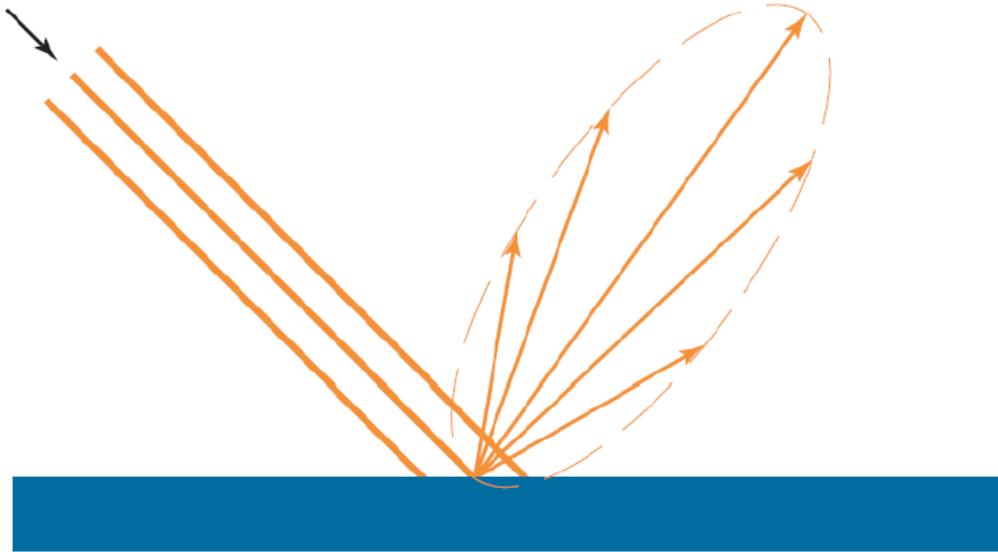


Figura 2. Reflexión compuesta.

Reflexión difusa: Se produce cuando la luz que incide sobre una superficie es reflejada en todas las direcciones, siendo el rayo normal a la superficie el de mayor intensidad. Este tipo de reflexión se produce en superficies como el papel blanco mate, las paredes y cielos rasos de yeso, la nieve etc.



Figura 3. Reflexión difusa.

Reflexión mixta: Es una reflexión intermedia entre la especular y la difusa, en la que parte del haz incidente se refleja y parte se difunde. Este tipo de reflexión la presentan los metales no pulidos, el papel brillante y las superficies barnizadas.

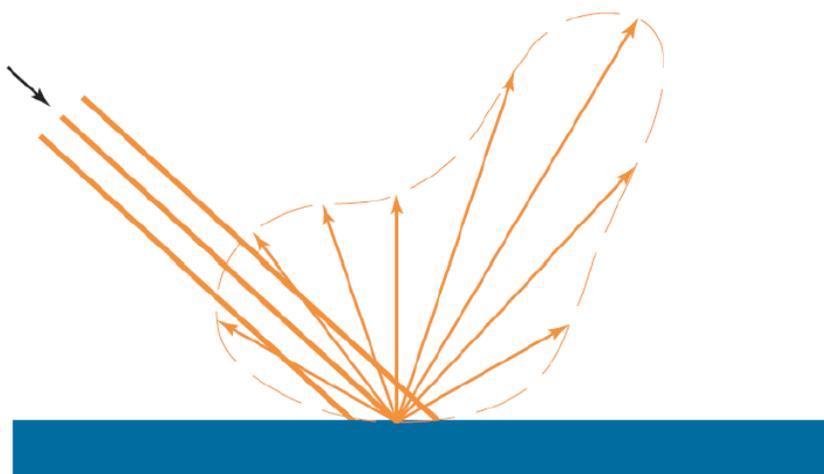


Figura 4. Reflexión mixta.

A continuación se indican algunos porcentajes de reflexión para la luz blanca día:

Superficie reflectora %	Factor de reflexión
Plata brillante	92-97
Cobre	35-80
Oro	60-92
Espejos	80-85
Aluminio pulido	67-72
Pintura blanca mate	70-80
Amarillo	60-75
Techos acústicos	60-75
Rojo claro	30-50
Negro	3-4

### 3.2. TRANSMISIÓN

Es el paso de una radiación a través de un medio sin cambio de frecuencia de las radiaciones monocromáticas que la componen. Este fenómeno es característico de ciertos tipos de vidrio, cristales, plásticos, agua y otros líquidos y del aire.

Al atravesar el material, parte de la luz se pierde debido a la reflexión en la superficie del medio y parte se absorbe. La relación entre la luz transmitida y la luz incidente se denomina transmitancia del material.

En la transmisión se pueden diferenciar tres tipos: regular, difusa y mixta.

Transmisión regular: En esta transmisión, el haz que incide sobre un medio, la atraviesa y sale de él como tal haz. Los medios que cumplen esta propiedad, se les denomina cuerpos transparentes y permiten ver con nitidez los objetos colocados detrás de ellos.

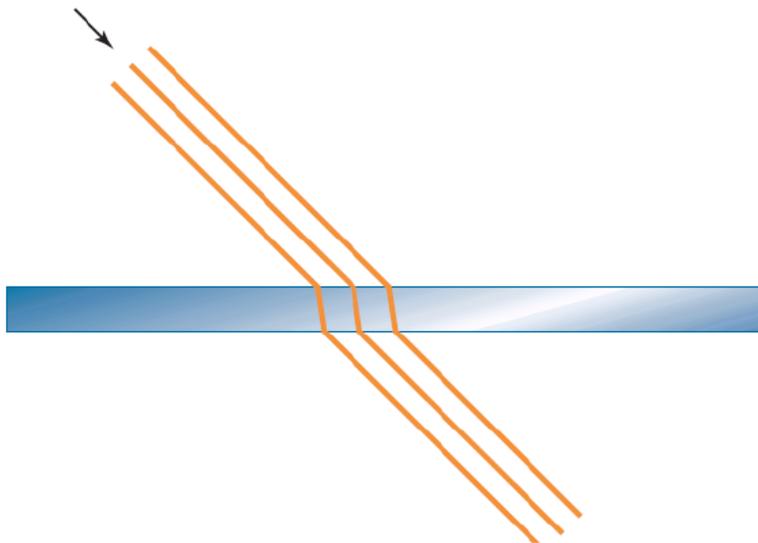


Figura 5. Transmisión regular

Transmisión difusa: Transmisión en la que el haz incidente se difunde por el medio, saliendo del mismo en múltiples direcciones. A estos medios se les denomina traslúcidos y los más conocidos son los cristales esmerilados y los vidrios opacos opalizados. Los objetos colocados tras de ellos no son distinguidos con precisión.

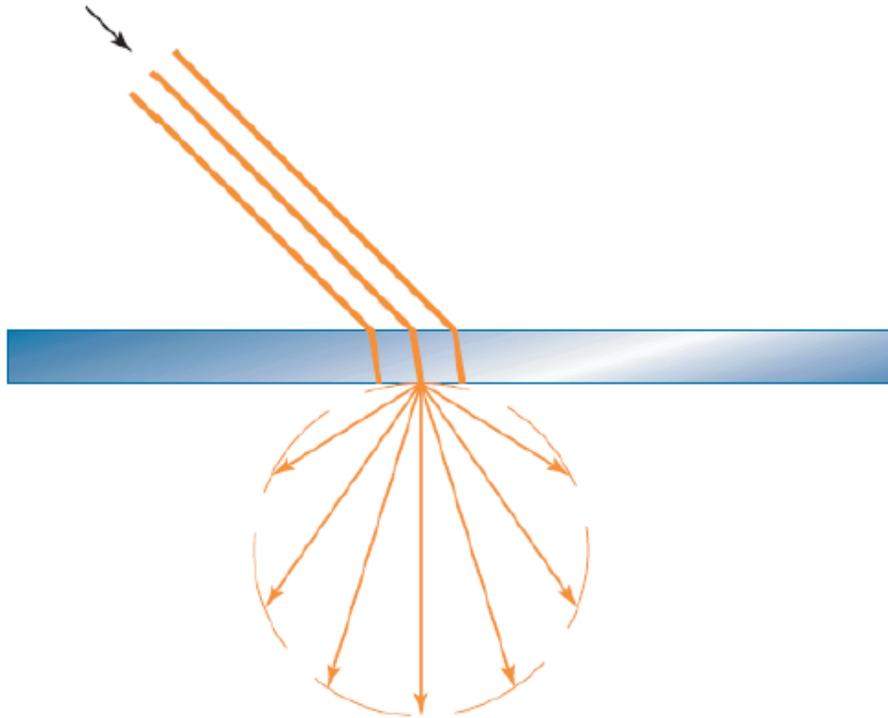


Figura 6. Transmisión difusa.

Transmisión mixta: Es una forma de transición de la transmisión, intermedia entre la regular y la difusa. Se presenta en vidrios orgánicos, vidrios orgánicos depulidos y cristales de superficie labrada. Aunque la difusión del haz de luz no es completa, los objetos no se pueden observar claramente detrás del mismo aunque sí su posición.

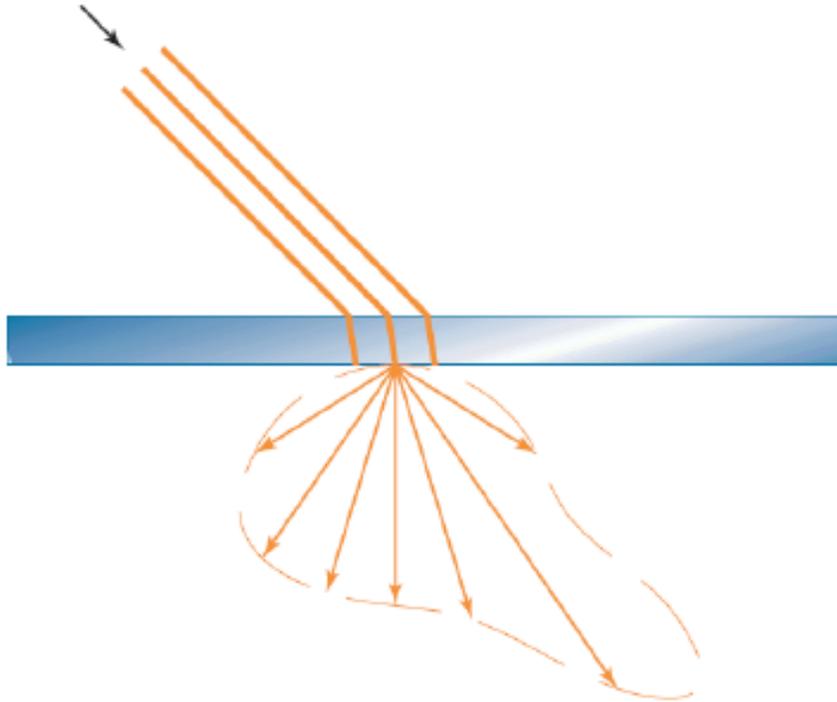


Figura 7. Transmisión mixta.

### 3.3. ABSORCIÓN

Se denomina absorción a la transformación de la energía radiante en otra forma de energía, generalmente en forma de calor. Este fenómeno es una característica de todas las superficies que no son completamente reflectoras, y de los materiales que no son totalmente transparentes. La relación entre la luz absorbida y la luz incidente se denomina absorptancia del material.

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

### 3.4. REFRACCIÓN

Al pasar de un medio a otro, el rayo de luz puede cambiar de dirección. Dicho cambio, se produce por una alteración en la velocidad de la luz. La misma disminuye si la densidad del nuevo medio es mayor, y aumenta si es menor. Este cambio de la velocidad y de dirección se denomina refracción.

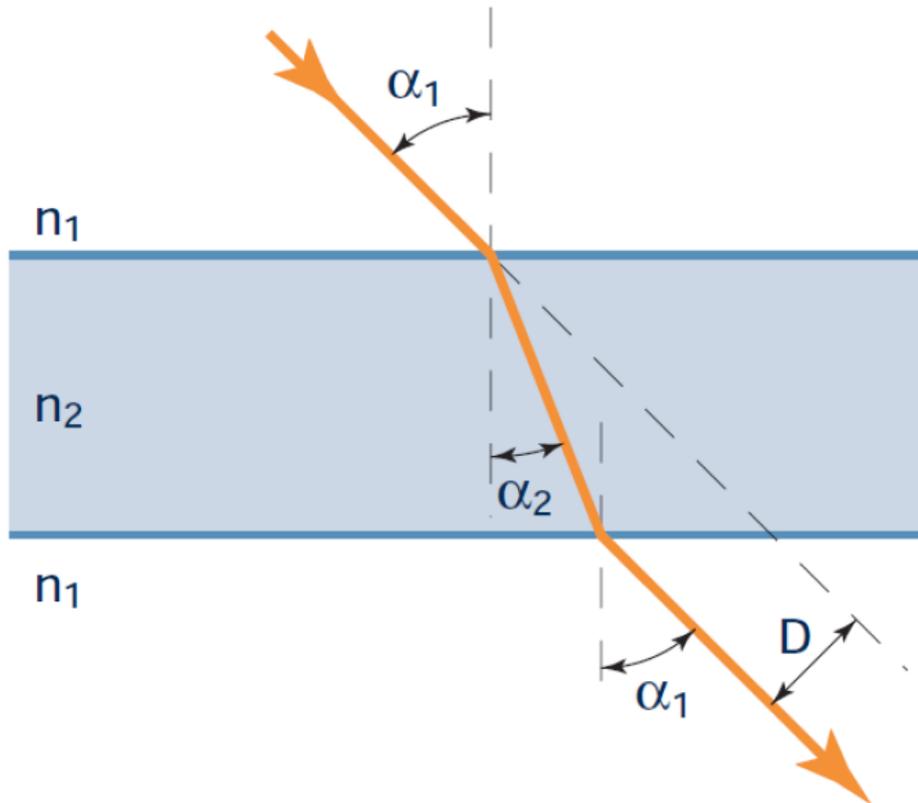


Figura 8. Refracción en el límite entre dos medios.

Existen dos leyes de refracción: 1.- Cuando la onda pasa de un medio a otro, el rayo incidente, el rayo refractado y la normal a la superficie de separación de los medios en el punto de incidencia, están en el mismo plano. 2.- La razón del seno del ángulo de incidencia y el seno del ángulo de refracción es una constante para los

medios comprendidos. Dicha constante se denomina índice de refracción,  $n$ , para ambos medios.

## BIBLIOGRAFÍA:

LUMINOTECNIA (2002). Manual práctico de INDALUX.

LUMINOTECNIA BÁSICA PARA INGENIEROS. ANTONIO ESPÍN ESTRELLA.

LUMINOTECNIA Principios y Aplicaciones de JOSA, S.A.

MANUAL ALUMBRADO PHILIPS. Editorial Paraninfo.

MANUAL ALUMBRADO WESTINGHOUSE. Editorial Dossat. (E85/3)

LUMINOTECNIA. RAMIREZ VÁZQUEZ, J. (1990) Enciclopedia CEAC  
Electricidad, 7ª edición, Ediciones CEAC.

APLICACIONES EFICIENTES DE LAMPARAS (1996) Comité Español de  
Iluminación (CEI) Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDEA).  
Cuadernos de eficiencia energética, nº 1 y nº 2.

MANUAL DE INSTALACIONES DE ALUMBRADO Y FOTOMETRIA. Chapa  
Carreón, J. (1990). Editorial Limusa.

ILUMINACION Y COLOR. Aguilar Rico, M.; Blanca Gimenez, V. (1995).  
Servicio de Publicaciones de la Universidad Politécnica de Valencia.

TECNICAS Y APLICACIONES DE LA ILUMINACION. Aguilar Rico, L.C.; De  
Landa Amezua, J. (1993). Editorial McGRAW-HILL.

INSTALACIONES DE ILUMINACION EN LA ARQUITECTURA. Feijó Muñoz, J.  
Secretariado de publicaciones Universidad de Valladolid (E85/11)

DISEÑO DE INSTALACIONES ELECTRICAS DE ALUMBRADO. Trashorras

# ILUMINACION



Montecelos, J. Editorial Paraninfo. (E85/17)