

Física Aplicada a la Arquitectura

Unidad 6-a: Naturaleza de la Luz

¿Qué es la luz?

La respuesta a esta pregunta ha sido en extremo huidiza a través de la historia de la ciencia. La larga búsqueda para encontrar tal respuesta es un ejemplo que nos sirve de modelo con el fin de ilustrar el procedimiento científico aplicable en la resolución de un problema.

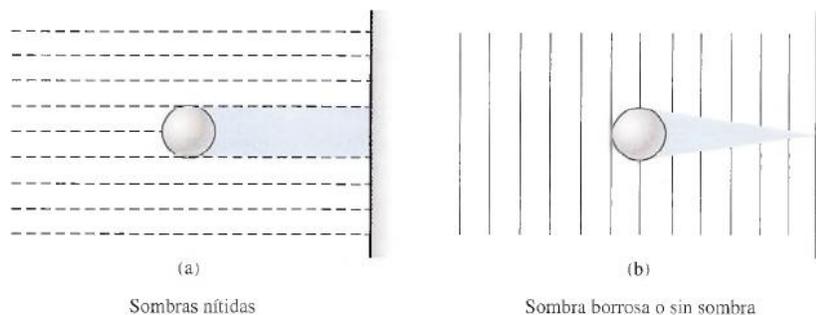
Cada una de las hipótesis que surgieron con miras a explicar la naturaleza de la luz se puso a prueba, tanto lógica como experimentalmente. La afirmación de los filósofos de la antigüedad acerca de que el ojo emitía los rayos visuales hasta llegar al objeto percibido fracasó desde el punto de vista lógico y también en el plano experimental.

A fines del siglo XVII se propusieron dos teorías para explicar la naturaleza de la luz: la teoría de partículas (corpúscular) y la teoría ondulatoria. El principal defensor de la teoría corpúscular fue sir Isaac Newton. La teoría ondulatoria era apoyada por Christian Huygens (1629-1695), un matemático y científico holandés 13 años mayor que Newton. Cada una de esas teorías intentaba explicar las características de la luz observadas en esa época.

Tres de estas importantes características se resumen a continuación:

1. *Propagación rectilínea*: La luz viaja en línea recta.
2. *Reflexión*: Cuando la luz incide en una superficie lisa, regresa a su medio original.
3. *Refracción*: La trayectoria de la luz cambia cuando penetra a un medio transparente.

De acuerdo con la teoría corpúscular, las partículas muy pequeñas, de masa insignificante, eran emitidas por fuentes luminosas tales como el Sol o una llama. Estas partículas viajaban hacia fuera de la fuente en líneas rectas con enorme rapidez. Cuando las partículas entraban al ojo, se estimulaba el sentido de la vista. La propagación rectilínea se explicaba fácilmente en términos de partículas. En realidad, uno de los más fuertes argumentos en favor de la teoría corpúscular se basó en esta propiedad. Se pensaba que las partículas producían sombras con contornos bien definidos como se muestra en la figura a, mientras que las ondas pueden flexionarse alrededor de los bordes. Dicha flexión de las ondas, como muestra la figura b, se llama *difracción*.



Las sombras nítidas que se forman bajo los rayos luminosos hicieron pensar a Newton que la luz se debía componer de partículas. Huygens, por otra parte, explicó que la flexión de las ondas acuáticas y las ondas sonoras alrededor de los obstáculos se apreciaba fácilmente debido a sus grandes longitudes de onda. El razonaba que, si la luz era en realidad una serie de ondas con una longitud de onda corta, daría lugar a una sombra bien definida puesto que el grado de flexión sería pequeño.

Física Aplicada a la Arquitectura

Unidad 6-a: Naturaleza de la Luz

Era difícil explicar por qué las partículas que viajaban en líneas rectas provenientes de gran número de direcciones podían cruzarse sin estorbarse entre sí.

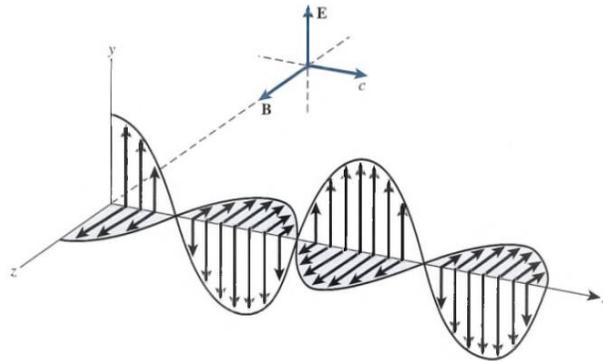
Propagación de la luz

El descubrimiento de la interferencia y la difracción en 1801 y en 1816 inclino el debate en favor de la teoría ondulatoria de Huygens. Sin duda, la interferencia y la difracción se podían explicar únicamente en términos de la teoría ondulatoria. Sin embargo, aún quedaba un problema sin resolver. Se creía que todos los fenómenos ondulatorios requerían de la existencia de un medio de transmisión. Así, por ejemplo, ¿cómo podían viajar las ondas a través del vacío si no había nada más que “vibrara”? Además, ¿cómo podría la luz llegar a la Tierra desde el Sol o desde otras estrellas a través de millones de millas de espacio vacío? Para evitar esta contradicción, los físicos postularon la existencia de un “éter transportador de luz”. Se pensó que este medio universal, que lo penetraba todo, llenaba todo el espacio entre y dentro de todos los cuerpos materiales.

Pero, ¿cuál era la naturaleza de ese éter? Con seguridad no podía ser un gas, un sólido o un líquido que obedeciera las leyes físicas conocidas en ese tiempo. Sin embargo, no podía desecharse la teoría ondulatoria tomando en cuenta las pruebas de la interferencia y la difracción.

No parecía haber opción posible salvo definir el éter como “lo que transporta la luz”.

En 1865, un físico escocés, James Clerk Maxwell, emprendió la tarea de determinar las propiedades de un medio que pudiera transportar luz y además tomar parte en la transmisión de calor y energía eléctrica. Su trabajo demostró que *una carga acelerada puede radiar ondas electromagnéticas en el espacio*. Maxwell explicó que la energía en una onda electromagnética se divide por igual entre los campos eléctricos y magnéticos que son perpendiculares entre sí.



Ambos campos oscilan en forma perpendicular a la dirección de propagación de la onda, como muestra la figura. Por tanto, una onda luminosa no tendría que depender de una materia que vibrara. Se propagaría mediante campos oscilatorios transversales. Una onda de ese tipo “surgiría” de los alrededores de una carga acelerada y cruzaría el espacio con la velocidad de la luz. Las ecuaciones de Maxwell predijeron que el calor y la acción eléctrica, al igual que la luz, se propagaban a la rapidez de la luz como perturbaciones electromagnéticas.

En 1885 H. R. Hertz logró confirmar experimentalmente la teoría de Maxwell, al probar que la radiación de la energía electromagnética puede ocurrir *a cualquier frecuencia*. Es decir, la luz, la radiación térmica y las ondas de radio son de la misma naturaleza, y todas

Física Aplicada a la Arquitectura

Unidad 6-a: Naturaleza de la Luz

ellas viajan a la rapidez de la luz ($c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$). Todos los tipos de radiación pueden ser reflejados, enfocados mediante lentes, polarizados, etc.

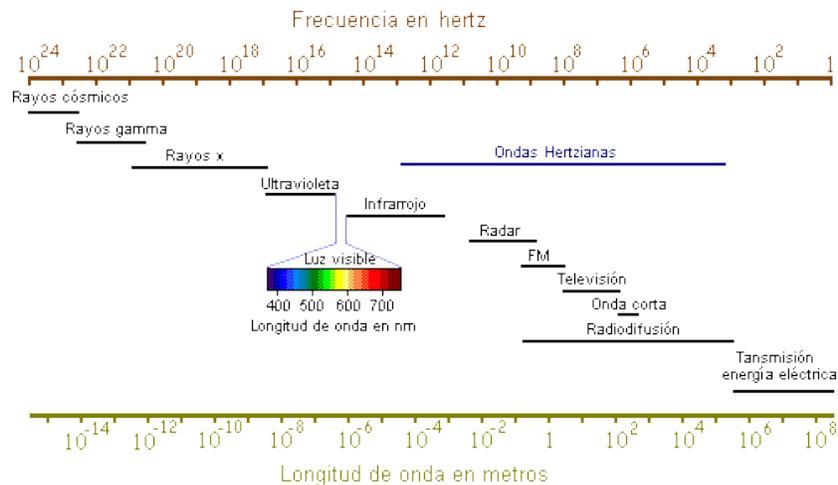
La luz, que llega a nuestros ojos y nos permite ver, es un pequeño conjunto de radiaciones electromagnéticas de longitudes de onda comprendidas entre los 380 nm y los 770 nm.

El espectro electromagnético

La luz forma parte del espectro electromagnético que comprende tipos de ondas tan dispares como los rayos cósmicos, los rayos gamma, los ultravioletas, los infrarrojos y las ondas de radio o televisión entre otros. Cada uno de estos tipos de onda comprende un intervalo definido por una magnitud característica que puede ser la longitud de onda (λ) o la frecuencia (f). Recordemos que la relación entre ambas es:

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

Donde c es la velocidad de la luz en el vacío ($c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$).



Espectro Electromagnético

Propiedades de la luz

Cuando la luz encuentra un obstáculo en su camino choca contra la superficie de este y una parte es reflejada. Si el cuerpo es opaco el resto de la luz será absorbida. Si es transparente una parte será absorbida como en el caso anterior y el resto atravesará el cuerpo transmitiéndose. Así pues, tenemos tres posibilidades:

- Reflexión.
- Transmisión - refracción.
- Absorción.

Física Aplicada a la Arquitectura

Unidad 6-a: Naturaleza de la Luz

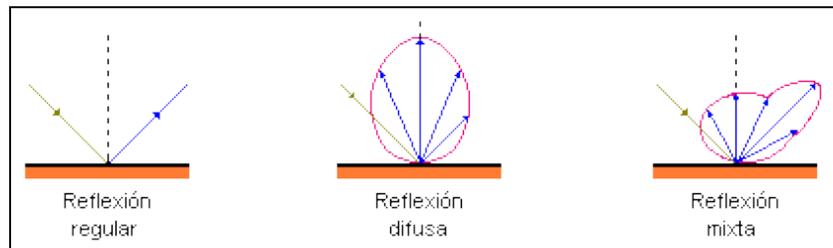
Para cada una se define un coeficiente que nos da el porcentaje correspondiente en tanto por uno. Son el factor de reflexión (ρ), el de transmisión (τ) y el de absorción (α) que cumplen:

$$\rho + \alpha + \tau = 1 \text{ Cuerpos transparentes}$$

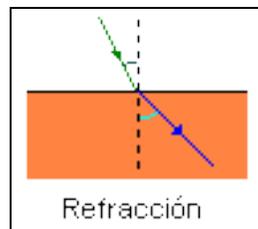
$$\rho + \alpha = 1 \text{ Cuerpos opacos} (\tau = 0)$$

La luz tiene también otras propiedades, como **la polarización, la interferencia, la difracción o el efecto fotoeléctrico**, pero estas tres son las más importantes en luminotecnia.

La reflexión es un fenómeno que se produce cuando la luz choca contra la superficie de separación de dos medios diferentes (ya sean gases como la atmósfera, líquidos como el agua o sólidos) y está regida por la ley de la reflexión. La dirección en que sale reflejada la luz viene determinada por el tipo de superficie. Si es una superficie brillante o pulida se produce la reflexión regular en que toda la luz sale en una única dirección. Si la superficie es mate y la luz sale desperdigada en todas direcciones se llama reflexión difusa. Y, por último, está el caso intermedio, reflexión mixta, en que predomina una dirección sobre las demás. Esto se da en superficies metálicas sin pulir, barnices, papel brillante, etc.



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

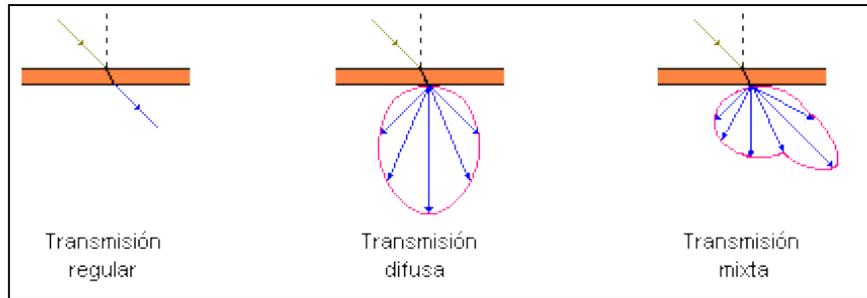


La transmisión se puede considerar una doble refracción. Si pensamos en un cristal; la luz sufre una primera refracción al pasar del aire al vidrio, sigue su camino y vuelve a refractarse al pasar de nuevo al aire. Si después de este proceso el rayo de luz no es desviado de su trayectoria se dice que la transmisión es regular como pasa en los vidrios transparentes. Si se difunde en todas direcciones tenemos la transmisión difusa que es lo

Física Aplicada a la Arquitectura

Unidad 6-a: Naturaleza de la Luz

que pasa en los vidrios translúcidos. Y si predomina una dirección sobre las demás tenemos la mixta como ocurre en los vidrios orgánicos o en los cristales de superficie labrada.



La absorción es un proceso muy ligado al color. El ojo humano sólo es sensible a las radiaciones pertenecientes a un pequeño intervalo del espectro electromagnético. Son los colores que mezclados forman la luz blanca. Su distribución espectral aproximada es:

Tipo de radiación	Longitudes de onda (nm)
Violeta	380 - 436
Azul	436 - 495
Verde	495 - 566
Amarillo	566 - 589
Naranja	589 - 627
Rojo	627 - 770

Cuando la luz blanca choca con un objeto una parte de los colores que la componen son absorbidos por la superficie y el resto son reflejados. Las componentes reflejadas son las que determinan el color que percibimos. Si las refleja a todas es blanco y si las absorbe todas es negro. Un objeto es rojo porque refleja la luz roja y absorbe las demás componentes de la luz blanca. Si iluminamos el mismo objeto con luz azul lo veremos negro porque el cuerpo absorbe esta componente y no refleja ninguna. Queda claro, entonces, que el color con que percibimos un objeto depende del tipo de luz que le enviamos y de los colores que este sea capaz de reflejar.

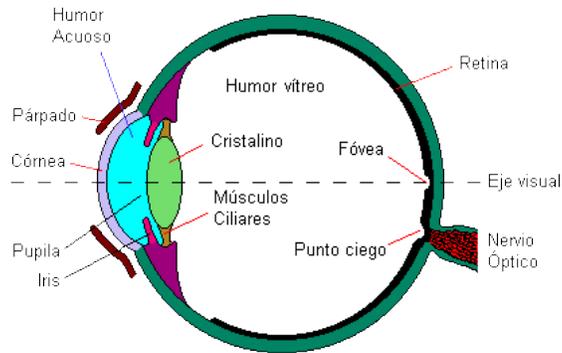
EL PROCESO VISUAL Y SUS CARACTERÍSTICAS

Fisiología del ojo

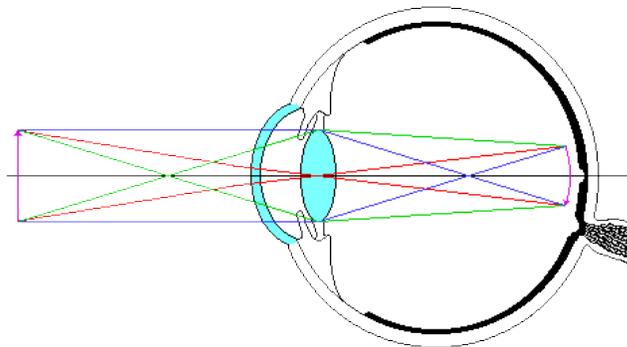
El ojo humano está formado por un grupo óptico - la córnea, el iris, la pupila y el cristalino, un fotorreceptor - la retina- y otros elementos accesorios encargados de diversas tareas como protección, transmisión de información nerviosa, alimentación, mantenimiento de la forma, etc.

Física Aplicada a la Arquitectura

Unidad 6-a: Naturaleza de la Luz



A menudo, se compara el funcionamiento del ojo con el de una cámara fotográfica. La pupila actuaría de diafragma, la retina de película, la córnea de lente y el cristalino sería equivalente a acercar o alejar la cámara del objeto para conseguir un buen enfoque. La analogía no acaba aquí, pues al igual que en la cámara de fotos la imagen que se forma sobre la retina está invertida. Pero esto no supone ningún problema ya que el cerebro se encarga de darle la vuelta para que la veamos correctamente.



Formación de la imagen en el ojo.

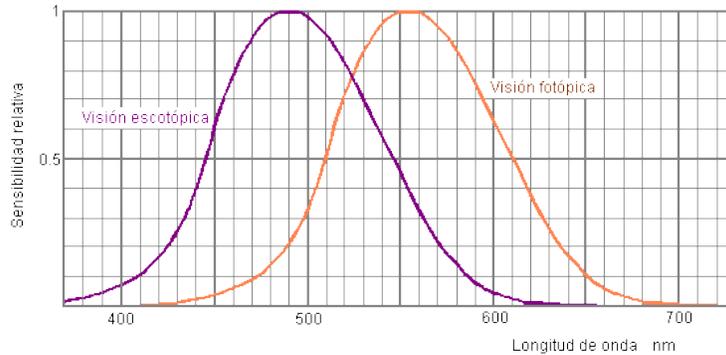
La sensibilidad y los tipos de visión

Al igual que en la fotografía, la cantidad de luz juega un papel importante en la visión. Así, en condiciones de buena iluminación (más de 3 cd/m^2) como ocurre de día, la visión es nítida, detallada y se distinguen muy bien los colores; es la **visión fotópica**. Para niveles inferiores a $0,25 \text{ cd/m}^2$ desaparece la sensación de color y la visión es más sensible a los tonos azules y a la intensidad de la luz. Es la llamada **visión escotópica**. En situaciones intermedias, la capacidad para distinguir los colores disminuye a medida que baja la cantidad de luz pasando de una gran sensibilidad hacia el amarillo a una hacia el azul. Es la **visión mesiópica**.

En estas condiciones, se definen unas **curvas de sensibilidad del ojo** a la luz visible para un determinado observador patrón que tiene un máximo de longitud de onda de **555 nm** (amarillo verdoso) para la **visión fotópica** y otro de **480 nm** (azul verdoso) para la **visión escotópica**. Al desplazamiento del máximo de la curva al disminuir la cantidad de luz recibida se llama **efecto Purkinje**.

Física Aplicada a la Arquitectura

Unidad 6-a: Naturaleza de la Luz



Curvas de sensibilidad del ojo

Toda fuente de luz que emita en valores cercanos al máximo de la visión diurna (555 nm) tendrá un rendimiento energético óptimo porque producirá la máxima sensación luminosa en el ojo con el mínimo consumo de energía. No obstante, si la fuente no ofrece una buena reproducción cromática puede provocar resultados contraproducentes.

La acomodación

Se llama **acomodación** a la capacidad del ojo para enfocar automáticamente objetos situados a diferentes distancias. Esta función se lleva a cabo en el cristalino que varía su forma al efecto. Pero esta capacidad se va perdiendo con los años debido a la pérdida de elasticidad que sufre; es lo que se conoce como presbicia o vista cansada y hace que aumente la distancia focal y la cantidad de luz mínima necesaria para que se forme una imagen nítida.

La adaptación

La **adaptación** es la facultad del ojo para ajustarse automáticamente a cambios en los niveles de iluminación. Se debe a la capacidad del iris para regular la abertura de la pupila y a cambios fotoquímicos en la retina. Para pasar de ambientes oscuros a luminosos el proceso es muy rápido, pero en caso contrario es mucho más lento. Al cabo de un minuto se tiene una adaptación aceptable. A medida que pasa el tiempo, vemos mejor en la oscuridad y a la media hora ya vemos bastante bien. La adaptación completa se produce pasada una hora.



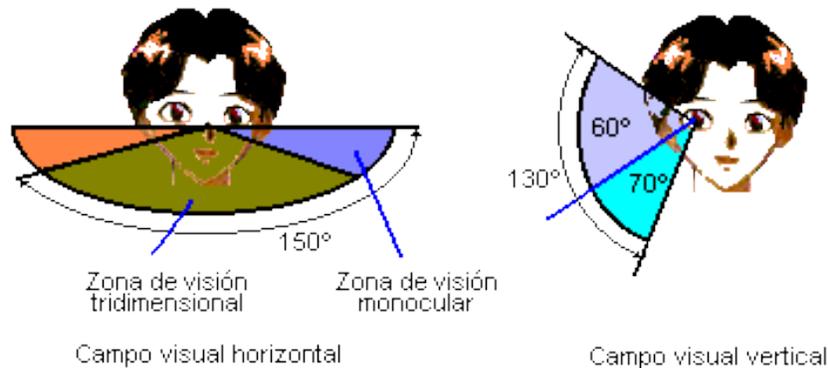
Física Aplicada a la Arquitectura

Unidad 6-a: Naturaleza de la Luz

El campo visual

Volviendo al ejemplo de la cámara de fotos, el ojo humano también dispone de un **campo visual**. Cada ojo ve aproximadamente 150° sobre el plano horizontal y con la superposición de ambos se abarcan los 180° . Sobre el plano vertical sólo son unos 130° , 60° por encima de la horizontal y 70° por debajo.

El campo visual de cada ojo es de tipo monocular, sin sensación de profundidad, siendo la visión en la zona de superposición de ambos campos del tipo binocular. La sensación de profundidad o visión tridimensional se produce en el cerebro cuando este superpone e interpreta ambas imágenes.



Factores que influyen en la visión

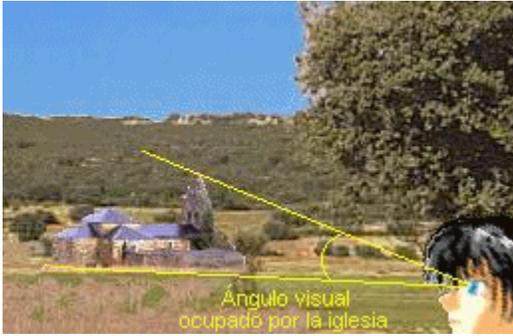
Los factores externos que influyen sobre la formación de una buena imagen en la retina pueden dividirse en dos clases: los subjetivos y los objetivos. Los primeros dependen del propio individuo como su salud visual (depende de la edad y del deterioro de la vista), el nivel de atención en lo que mira, si está en reposo o en movimiento o la comodidad visual (nivel de iluminación y deslumbramiento). Mientras que los segundos dependen de lo que estamos mirando, del objeto visual. Son los factores objetivos y son: **el tamaño, la agudeza visual, el contraste y el tiempo.**

El tamaño

El **tamaño** aparente de un cuerpo en relación con el resto de los elementos que forman el campo visual es un factor importante para distinguirlo con rapidez. Si analizamos las fotos, vemos que la iglesia de la foto de la izquierda parece más pequeña que la de la derecha. Comparada con otros objetos más cercanos, como el árbol que hay en primer plano, parece pequeña. Pero vista de cerca parece muy grande. ¿Qué ha ocurrido si el tamaño real del edificio es el mismo? Lo que ha pasado es que el ángulo visual del ojo abarcado por la construcción respecto al ocupado por el fondo ha aumentado.

Física Aplicada a la Arquitectura

Unidad 6-a: Naturaleza de la Luz



Objeto lejano.



Objeto cercano.

La agudeza visual

La **agudeza visual** es la capacidad de distinguir entre objetos muy próximos entre sí. Es una medida del detalle más pequeño que podemos diferenciar y está muy influenciada por el nivel de iluminación. Si este es bajo como ocurre de noche cuesta mucho distinguir cosas al contrario de lo que ocurre de día.



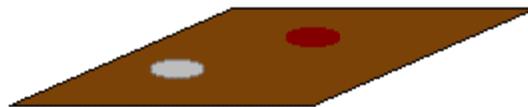
Influencia del nivel de iluminación sobre la agudeza visual

El contraste

El **contraste** se produce por diferencias entre colores o luminancias (porción de luz reflejada por un cuerpo que llega al ojo) entre un elemento del campo visual y el resto. Mientras mayor sea mejor lo veremos, más detalles distinguiremos y menos fatigaremos la vista. Una buena iluminación ayudará mucho y puede llegar a compensar bajos contrastes en colores aumentando la luminancia.



Contraste de colores



Contraste de luminancias

El tiempo

Como ya sabemos el ojo dispone de mecanismos para enfocar la imagen y transmitirla al cerebro. Este proceso no es instantáneo y requiere un cierto **tiempo**. Esta inercia es lo que nos permite disfrutar del cine, la televisión o los dibujos animados que no son más que una serie de imágenes estáticas sucesivas. Si, por el contrario, el objeto está en movimiento y

Física Aplicada a la Arquitectura

Unidad 6-a: Naturaleza de la Luz

hay un alto nivel de iluminación, la inercia visual provocará la impresión de una sucesión de imágenes fijas como ocurre en las discotecas. Es el llamado **efecto estroboscópico** que fuera de estos usos se debe evitar. Por otro lado, mientras más tiempo dispongamos para ver una imagen, más nítida y detallada será. Con una buena iluminación podremos reducirlo y aumentar la **velocidad de percepción**.

El color

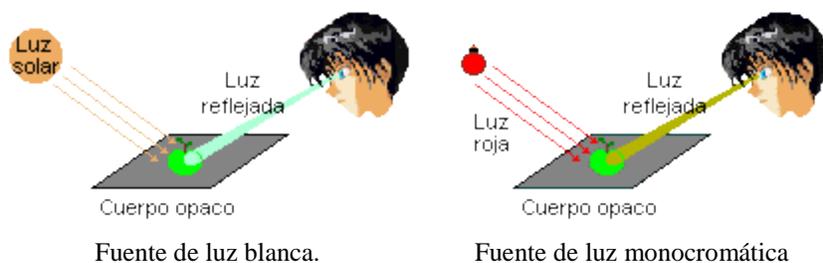
Al hablar del color hay que distinguir entre el fenómeno físico donde intervienen la luz y la visión (sensibilidad y contraste) y el fenómeno sensorial. Como fenómeno físico comentaremos, además, los sistemas de especificación y la realización de mezclas.

El color como fenómeno físico

Recordemos brevemente que la **luz blanca** del sol está formada por la unión de los colores del arco iris, cada uno con su correspondiente longitud de onda. Los colores van del violeta (380 nm) hasta el rojo (770 nm) y su distribución espectral aproximada es:

Color	Longitud de onda (nm)
Violeta	380 - 436
Azul	436 - 495
Verde	495 - 566
Amarillo	566 - 589
Naranja	589 - 627
Rojo	627 - 770

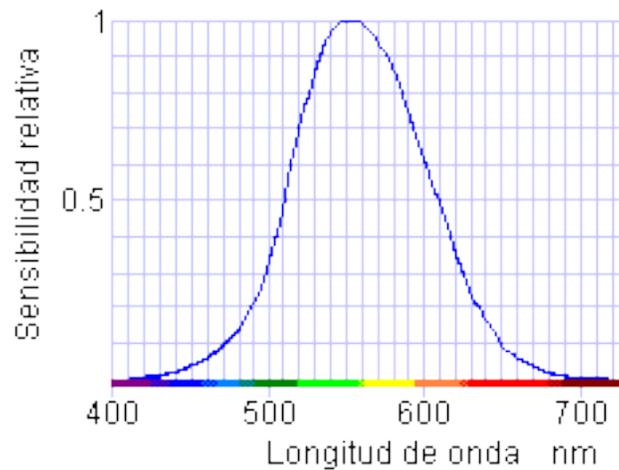
Cuando un cuerpo opaco es iluminado por luz blanca refleja un color o una mezcla de estos absorbiendo el resto. Las radiaciones luminosas reflejadas determinarán el color con que nuestros ojos verán el objeto. Si las refleja a todas será blanco y si las absorbe todas negro. Si, por el contrario, usamos una fuente de luz monocromática o una de espectro discontinuo, que emita sólo en algunas longitudes de onda, los colores se verán deformados. Este efecto puede ser muy útil en decoración, pero no para la iluminación general.



El ojo humano no es igual de **sensible** a todas las longitudes de onda que forman la luz diurna. De hecho, tiene su máximo para un valor de 555 nm que corresponde a un tono amarillo verdoso. A medida que nos alejamos del máximo hacia los extremos del espectro (rojo y violeta) esta va disminuyendo. Es por ello que las señales de peligro y advertencia, la iluminación de emergencia o las luces antiniebla son de color amarillo.

Física Aplicada a la Arquitectura

Unidad 6-a: Naturaleza de la Luz



El color como fenómeno sensorial

El color como otras sensaciones que percibimos a través de los sentidos está sometida a criterios de análisis subjetivos. Depende de las preferencias personales, su relación con otros colores y formas dentro del campo visual (el contraste, la extensión que ocupa, la iluminación recibida, la armonía con el ambiente...), el estado de ánimo y de salud, etc.

Tradicionalmente distinguimos entre **colores fríos** y **cálidos**. Los primeros son los violetas, azules y verdes oscuros. Dan la impresión de frescor, tristeza, recogimiento y reducción del espacio. Por contra, los segundos, amarillos, naranjas, rojos y verdes claros, producen sensaciones de alegría, ambiente estimulante y acogedor y de amplitud de espacio.

Sensaciones asociadas a los colores.	
Blanco	Frialdad, higiene, neutralidad.
Amarillo	Actividad, impresión, nerviosismo.
Verde	Calma, reposo, naturaleza.
Azul	Frialdad
Negro	Inquietud, tensión.
Marrón	Calidez, relajación.
Rojo	Calidez intensa, excitación, estimulante.

Hay que destacar también el factor cultural y climático porque en los países cálidos se prefieren tonos fríos para la decoración de interiores mientras que en los fríos pasa al revés.

Colores y mezclas

A todos aquellos que hayan pintado alguna vez les sonarán términos como colores primarios, secundarios, terciarios o cuaternarios. Los **colores primarios o básicos** son aquellos cuya combinación produce todos los demás. En pintura son el cian, el magenta y el amarillo y en iluminación el azul, el verde y el rojo. Cualquier otro color se puede obtener combinándolos en diferentes proporciones. Así los **secundarios** se obtienen con mezclas al 50%; los **terciarios** mezclando dos secundarios entre sí, etc.

Física Aplicada a la Arquitectura

Unidad 6-a: Naturaleza de la Luz

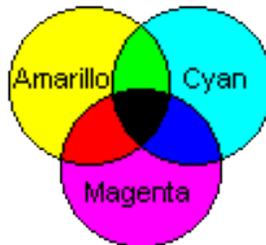
Las mezclas, que en luminotecnia se consiguen mediante filtros y haces de luces, pueden ser aditivas o sustractivas.

Las **mezclas aditivas u ópticas** se obtienen sumando haces de luces de colores. El color resultante dependerá de la componente que se halle en mayor proporción y será más intenso que estas. Si la suma diera blanco se diría que son **colores complementarios**.



Mezcla aditiva

Las **mezclas sustractivas o pigmentarias** se consiguen aplicando a la luz blanca una serie de sucesivos filtros de colores que darán un tono de intensidad intermedia entre las componentes.



Mezcla sustractiva

Para definir los colores se emplean diversos sistemas como el RGB o el de Munsell. En el **sistema RGB** (Red, Green, Blue), usado en informática, un color está definido por la proporción de los tres colores básicos - rojo, verde y azul - empleados en la mezcla. En el **sistema de Munsell** se recurre a tres parámetros: tono o matiz (rojo, amarillo, verde...), valor o intensidad (luminosidad de un color comparada con una escala de grises; por ejemplo, el amarillo es más brillante que el negro) y cromaticidad o saturación (cantidad de blanco que tiene un color; si no tiene nada se dice que está saturado).

La luz y la visión

Luz y sentido de la visión, dos caras de la misma moneda. Sin una la otra no tiene sentido. Sin luz los ojos no podrían percibir las formas, los colores de los objetos y, en definitiva, el mundo que nos rodea. Sin una visión que interpretara la luz, esta no serviría de nada.