

Capítulo 1.  
**LA LUZ**

1.1.	Generalidades .....	15
1.2.	Características de las ondas .....	15
1.3.	Espectro de frecuencias .....	16
1.4.	Naturaleza dual de la luz .....	18



## 1.1. Generalidades

Es sabido que existen diversos tipos de energía: mecánica, térmica, 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 fuente emisora irradia energía, la propagación se produce por 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.

Aquí, la forma de la onda representa oscilaciones como fenómenos en los que la magnitud física es función periódica de una variable independiente (el tiempo), cuyo valor medio es nulo. Es decir, se trata de funciones armónicas simples o fundamentales, como el seno o el coseno, de una sola variable, unidimensional y transversales (se propagan perpendicularmente a la dirección en que vibran las partículas). En definitiva, existe un conjunto muy amplio de fenómenos físicos, eléctricos y electromagnéticos, entre los que se incluye la electricidad, la luz, el sonido, las ondas hertzianas o el oleaje del mar, cuyas características quedan determinadas mediante el estudio de las ondas sinusoidales. De ahí que se utilice el concepto de *radiación* de las ondas y las características que las definen.

## 1.2. Características de las ondas

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

Se define como la *distancia recorrida por la onda en un periodo*. 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* (Fig. 1).

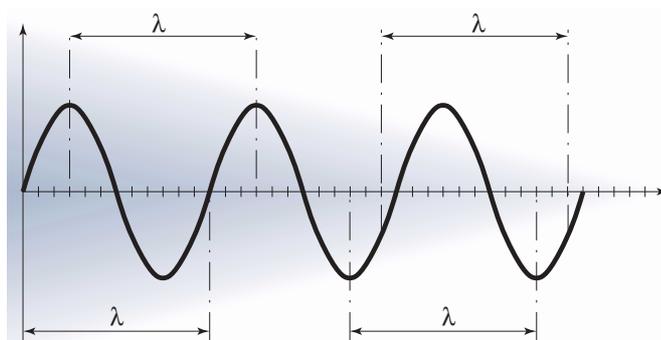


Figura 1. Longitud de onda  $\lambda$ .

\* Onda: Expresión gráfica de una variación periódica representada en amplitud y tiempo. La amplitud es el valor u ordenada máxima que toma la onda.

La longitud de onda es una característica importante para clasificar el espectro de radiaciones visibles, objeto de estudio en esta LUMINOTECNIA 2002.

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

$$\lambda = \nu \cdot T \quad (\text{m/s} \cdot \text{s} = \text{m})$$

### 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,  $T = \frac{1}{f}$ , la ecuación anterior se transforma en:

$$\lambda = \frac{\nu}{f} \quad (\text{m/s} \cdot 1/\text{s}^{-1} = \text{m})$$

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

$$f = \frac{\nu}{\lambda} \quad (\text{s}^{-1} = \text{ciclos/segundo} = \text{Hz})$$

La longitud de onda disminuye con el aumento de la frecuencia.

La frecuencia es fija e independiente del medio por el que se propaga la onda, y por ello es una característica importante para clasificar las ondas electromagnéticas.

### Velocidad de propagación ( $\nu$ )

La velocidad de propagación depende del tipo de onda, de la elasticidad del medio y de su rigidez. Si el medio es homogéneo e isótropo, la velocidad de propagación es la misma en todas las direcciones.

Por ejemplo, la velocidad de propagación del sonido en el aire, a 20 °C, es de 343.5 m/s, mientras que la velocidad de propagación de las *ondas electromagnéticas* en el vacío es de 300.000 km/s =  $3 \cdot 10^8$  m/s.

La ecuación fundamental que relaciona la velocidad de propagación con la longitud y frecuencia de la onda es

$$\nu = \lambda \cdot f \quad (\text{m} \cdot \text{s}^{-1} = \text{m/s})$$

## 1.3. Espectro de frecuencias

Dado que las radiaciones electromagnéticas son de la misma naturaleza y todas se propagan en el vacío a la misma velocidad ( $\nu = 3 \cdot 10^8$  m/s), las características que las diferencian es su *longitud de onda*, o lo que es lo mismo, su *frecuencia* ( $\nu = \lambda \cdot f$ ).

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 (Fig. 2). 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 están 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 la radiactividad nuclear, se llaman Rayos Gamma.

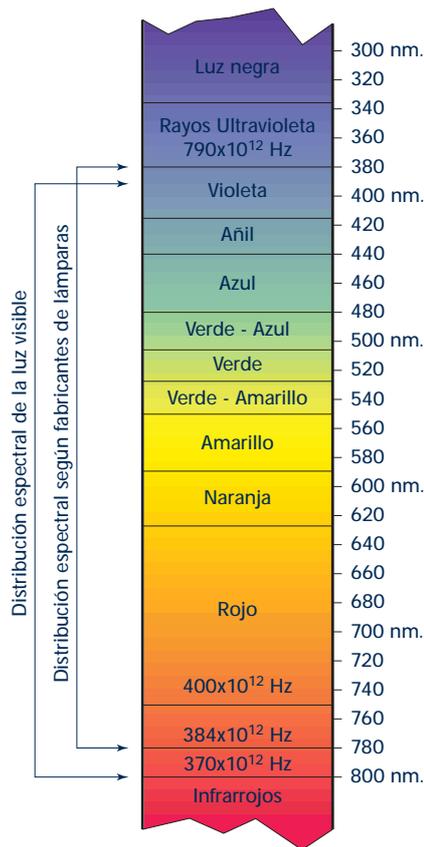


Figura 2. Clasificación del espectro visible.

Los fabricantes de lámparas suelen dar las curvas radioespectrométricas con valores comprendidos entre 380 nm. y 780 nm. 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 (μm.).

$$1 \mu\text{m.} = 10^{-6} \text{ m}$$

$$1 \text{ nm.} = 10^{-9} \text{ m}$$

$$1 \text{ Å.} = 10^{-10} \text{ m}$$

### Radiación de una fuente con espectro continuo

Todo cuerpo, a cualquier temperatura que no sea el cero absoluto, irradia energía según un amplio campo de longitud de onda. Esta radiación se denomina *incandescencia* o *radiación de temperatura*. Son fuentes de luz artificial incandescente:

- La llama de una combustión, como la vela, candil, etc.
- Un lingote o barra de acero caliente al rojo vivo.
- El filamento de la lámpara de *incandescencia*, como fuente más común de producir luz artificial.

El término *incandescencia* se aplica a los tipos de radiación asociados con la temperatura.

Para saber cómo está distribuida la potencia radiada entre las longitudes de onda, se utiliza el espectrorradiómetro. La función espectrorradiométrica o curva de distribución espectral que se obtiene se indica en la Fig. 3, en la que en abscisas se sitúan las longitudes de onda en nm. y en ordenadas los valores relativos de energía respecto a la máxima radiada que se toma como el 100%.

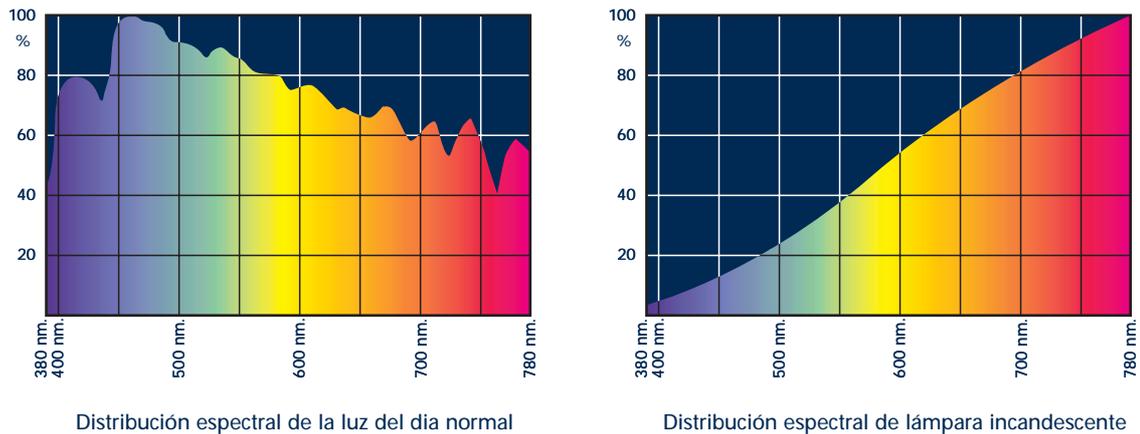


Figura 3

### Radiación de una fuente con espectro discontinuo

La energía radiante de una fuente de descarga gaseosa, como la de vapor de sodio, vapor de mercurio, argón, neón, etc., consiste en una radiación integrada por pequeños intervalos de longitud de onda que se denominan picos de emisión.

Cada gas tiene una longitud de onda característica de su radiación, que depende de la estructura molecular del gas a través del cual tiene lugar la descarga.

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

Las fuentes luminosas o lámparas de descarga más usuales son los tubos fluorescentes, los de vapor de mercurio, los de vapor de sodio y los de inducción.

Al igual que con la incandescencia, se obtiene la curva de distribución espectral mediante el espectrorradiómetro. La función espectrorradiométrica que se obtiene se indica en la Fig. 4, indicando en abscisas las longitudes de onda en nm. y en ordenadas los valores relativos de energía respecto a la máxima radiada que se toma como el 100%.

También se suele dar en ordenadas la potencia específica en mW/nm. de longitud de onda.

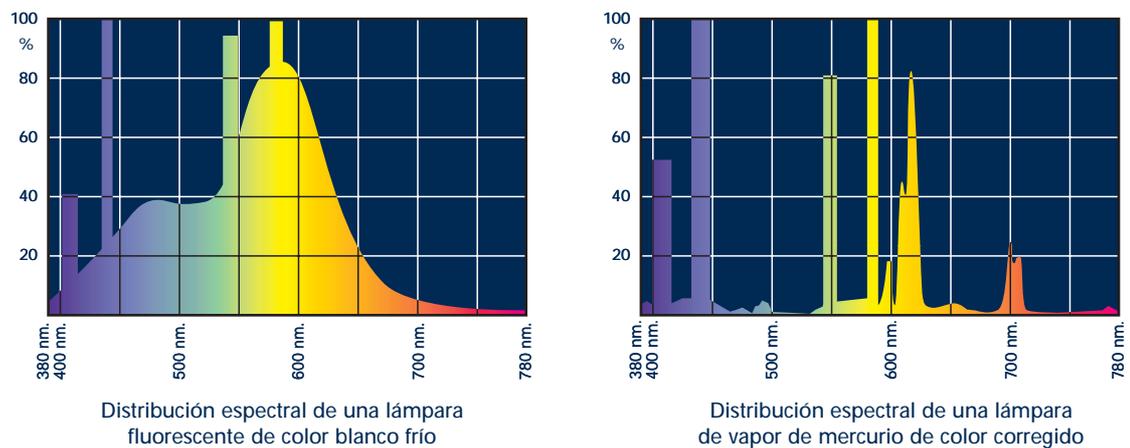


Figura 4

## 1.4. Naturaleza dual de la luz

La luz ha intrigado a la humanidad durante siglos. Las teorías más antiguas consideraban a la luz como algo que era *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. La cuestión de si la luz está compuesta por un haz de partículas o si es un cierto tipo de movimiento ondulatorio ha sido una de las más interesantes en la historia de la ciencia. Entre los proponentes y defensores de la **teoría corpuscular de la luz** el más influyente fue sin duda Newton. Utilizando esta teoría pudo explicar las leyes de la reflexión y de la refracción. Sin embargo, su

deducción de la ley de la refracción dependía de la hipótesis de que la luz se mueve con más rapidez en el agua o en el vidrio que en el aire, hipótesis que posteriormente se demostró que era falsa. Los principales proponentes de la **teoría ondulatoria de la luz** fueron Christian Huygens y Robert Hooke. Utilizando su propia teoría de la propagación de las ondas, Huygens fue capaz de explicar la reflexión y la refracción suponiendo que la luz viaja más lentamente en el vidrio o el agua que en el aire. Newton se dio cuenta de las ventajas de la teoría ondulatoria de la luz, particularmente porque explicaba los colores formados por películas delgadas, que había estudiado a fondo. No obstante, rechazó la teoría ondulatoria debido a la aparente propagación rectilínea de la luz. En su época no se había observado aún la difracción, desviación del haz luminoso que permite rodear obstáculos.

La teoría corpuscular de la luz de Newton fue aceptada durante más de un siglo. Luego, en 1801, Thomas Young revitalizó la teoría ondulatoria de la luz. Fue uno de los primeros en introducir la idea de interferencia como un fenómeno ondulatorio que se presentaba tanto en la luz como en el sonido. Sus observaciones de las interferencias obtenidas con la luz fueron una clara demostración de su naturaleza ondulatoria. Sin embargo, el trabajo de Young no fue conocido por la comunidad científica durante más de diez años. Quizás el mayor avance en lo que se refiere a la aceptación general de la teoría ondulatoria de la luz, se debió al físico francés Augustin Fresnel (1782-1827), que realizó extensos experimentos sobre interferencia y difracción y desarrolló la teoría ondulatoria sobre una sana base matemática. En 1850, Jean Foucault midió la velocidad de la luz en el agua y comprobó que es menor que en el aire, acabando así con la teoría corpuscular de la luz de Newton. En 1860, James Clerk Maxwell publicó su teoría matemática del electromagnetismo, que predecía la existencia de ondas electromagnéticas que se propagaban con una velocidad calculada mediante las leyes de la electricidad y el magnetismo y que resultaba valer  $3 \times 10^8$  m/s, el mismo valor que la velocidad de la luz. La teoría de Maxwell fue confirmada en 1887 por Hertz, quien utilizó un circuito eléctrico sintonizado para generar ondas y otro circuito semejante para detectarlas. En la segunda mitad del siglo XIX, Kirchoff y otros científicos aplicaron las leyes de Maxwell para explicar la interferencia y difracción de la luz y de otras ondas electromagnéticas y apoyar los métodos empíricos de Huygens de construcción de ondas sobre una base matemática firme.

Aunque la teoría ondulatoria es generalmente correcta cuando describe la propagación de la luz (y de otras ondas electromagnéticas), falla a la hora de explicar otras propiedades de la luz, especialmente la interacción de la luz con la materia. Hertz, en un famoso experimento de 1887 que confirmó la teoría ondulatoria de Maxwell, también descubrió el efecto fotoeléctrico. Este efecto sólo puede explicarse mediante un modelo de partículas para la luz, como Einstein demostró sólo unos pocos años después. Así se volvió a introducir un modelo corpuscular de la luz. Las partículas de la luz se denominan fotones y la energía  $E$  de un fotón está relacionada con la frecuencia  $f$  de la onda luminosa asociada por la famosa relación de Einstein  $E = h \cdot f$  ( $h$  = constante de Planck). No se logró una comprensión completa de la naturaleza dual de la luz hasta la década de los 20 en el siglo XX, cuando los experimentos realizados por los científicos del momento (Davisson, Germer, Thompson y otros) demostraron que los electrones (y otras "partículas") también tenían una naturaleza dual y que presentan las propiedades de interferencia y difracción además de sus bien conocidas propiedades de partículas.

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).

