2

Fotometría

La fotometría podría definirse como la medición de la luz realizada por comparación visual o por algún otro método que proporcione los mismos resultados.

Sin embargo, el desarrollo de la moderna radiometría electroóptica ha hecho posible la existencia de una física radiométrica que convierte a la fotometría en una parte concreta de la radiometría. Se pueden dar entonces las siguientes definiciones:

Radiometría es la ciencia que tiene por objeto la medición de la energía radiante en general.

Fotometría es la parte de la radiometría que tiene por objeto la medición de la energía radiante en cuanto activadora de sensaciones visuales.

ENERGIA RADIANTE

La energía radiante es una forma de energía que puede propagarse en el vacío, es decir, sin necesidad de soporte alguno. Esta energía que se desprende de un cuerpo difícilmente puede producir trabajo debido a la pequeña fuerza que lleva consigo, pero sí puede producir calor. Para ello basta la presencia de un cuerpo absorbente que transforme la energía radiante en agitación molecular.

La energía radiante está constituida por ondas electromagnéticas con una gama de frecuencias (ν) que van de 10^8 a 10^{24} seg^{-1}. Se denomina espectro energético al conjunto diferenciado de las distintas radiaciones que integran la energía radiada. Cada uno de los componentes se denomina radiación monocromática y puede definirse por su frecuencia o por su longitud de onda (λ). En espectroscopia se emplea también el número de onda, que se define como el número de ondas por unidad de longitud.

La única característica física de la radiación es la frecuencia de su vibración (la longitud de onda depende de la velocidad, y por consiguiente, del medio en que se propaga). El valor de la frecuencia es función de las circunstancias de actuación del cuerpo emisor. Sin embargo, en lugar de utilizar la frecuencia para describir una radiación, se suele emplear la longitud de onda en el vacío (o en el aire), probablemente porque es más fácil de medir e imaginar. Así, por ejemplo, dentro del espectro electromagnético, el intervalo correspondiente al espectro visible se define generalmente como el comprendido entre las longitudes de onda que van desde 380 nm hasta 770 nm. En los estudios de visión se suele utilizar el intervalo de 400 a 700 nm, aunque con el ojo adaptado a la oscuridad puede ver desde 360 a 830 nm.

La radiación se emite en forma de cuantos, unidades elementales de energía que son proporcionales a la frecuencia de la radiación (fotones). La energía de un fotón viene dada por $E = h\nu$ (donde h es la constante de Planck).

En el estudio de la visión y el color, se aprovecha el aspecto corpuscular (cuantos) de la radiación para explicar las leyes de su emisión (ley de Planck) y de su recepción (comportamiento fotoquímico retiniano por el que la energía radiante se transforma en energía nerviosa). Sin embargo, para el análisis de la radiación luminosa en sí, se acude preferentemente a su aspecto ondulatorio.

FUNDAMENTOS DE LA RADIOMETRIA Y LA FOTOMETRIA

Como ocurre con la medida de cualquier magnitud, lo primero que hay que definir es un patrón. La medición de las magnitudes fotométricas se inició utilizando métodos de comparación visual, ya que el ojo es muy preciso en esta clase de medidas, pero no en las medidas absolutas. Con objeto de tener una referencia, se acordó internacionalmente utilizar un emisor de luz como patrón y por este camino se llegó a la definición de la unidad de intensidad luminosa, que se denominó candela. Así pues, la candela está considerada como la unidad fundamental S.I. de fotometría.

Para la obtención práctica de la candela es necesario un radiador completo o un cuerpo negro que emita a la temperatura de fusión del platino, y del cual hay que calcular su radiancia espectral a partir de la ley de Planck.

El desarrollo y puesta en funcionamiento de un radiador completo supone un coste elevado, por lo que la mayoría de los laboratorios utilizan como patrones, lámparas calibradas en otros laboratorios especializados. Sin embargo, la aparición de radiómetros piroeléctricos calibrados eléctricamente y de los detectores cuánticos, con sus excelentes características de linealidad, estabilidad, bajo ruido y constancia en el tiempo, los hacen compatibles como patrones para la medición de la energía radiante con las lámparas de incandescencia. Estos radiómetros convierten directamente la energía radiante recibida en energía eléctrica mensurable con facilidad y con precisión. Permiten, además, eliminar el paso intermedio a través de la escala termodinámica de temperatura, paso que introduce los errores más graves en la obtención práctica de la candela a partir del radiador planckiano.

Todas estas nuevas posibilidades han conducido a una nueva definición de la candela en términos radiométricos, que la convierten en unidad derivada del vatio. Es decir, para la definición de candela ya no se necesita el cuerpo negro o radiador completo que materialice el patrón fundamental de la fotometría. Quiere decir esto, que no hace falta un emisor concreto, sino cualquier técnica, instrumento o artificio capaz de medir con suficiente precisión energía radiante en el intervalo visible del espectro. Esto lo llevan a cabo los radiómetros absolutos, unos instrumentos capaces de medir, y no sólo de detectar, la energía radiante que reciben sin necesidad de haber sido calibrados previamente respecto a una fuente patrón, lo cual permite obtener una escala espectrorradiométrica absoluta. Con estos aparatos se puede conocer el flujo radiante incidente en unidades absolutas de energía, esto es, en vatios. Además, si se conoce con exactitud el área sensible del detector se puede deducir la energía incidente por unidad de área, es decir, lo que más adelante denominaremos irradiancia sobre el detector.

Resulta entonces más apropiado definir primero las magnitudes radiométricas y luego las fotométricas.

MAGNITUDES RADIOMETRICAS

En la definición de algunas magnitudes, tanto radiométricas como fotométricas es importante saber si nos estamos refiriendo a una fuente puntual o a una fuente extensa. Es conveniente, pues, recordar lo que se entiende por fuente, y dejar para más adelante la descripción de los tipos más importantes.

Se llama fuente a una superficie o volumen que emite energía radiante. Una fuente se denomina primaria si es ella misma la que produce la energía emitida. Es secundaria si lo que hace es reenviar parte de la energía radiante que ella misma recibe. El sol es, por tanto, una fuente primaria y la luna una fuente secundaria.

Una fuente es puntual cuando sus dimensiones son pequeñas con respecto a la distancia que la separa del observador. Una estrella es siempre una fuente puntual a pesar de su enorme tamaño, ya que es muchísimo más grande la distancia desde donde se observa. Por el contrario, una lámpara de incandescencia vista a un metro nunca podrá considerarse con rigor una fuente puntual. El límite del diámetro aparente que debe tener una fuente para ser considerada como puntual es de 1′ aproximadamente. Lógicamente, una fuente será extensa cuando su tamaño aparente sea comparable con la distancia de observación. Nos referimos siempre a tamaños aparentes porque, por ejemplo, no subtiende el mismo diámetro angular un planeta visto a ojo desnudo que mediante un telescopio. En el primer caso consideraríamos al planeta como fuente puntual y en el segundo no.

Fuentes puntuales

Energía radiante (Q_e). Es la energía emitida, transferida o recibida en forma de ondas electromagnéticas o fotones. La unidad es el julio (J).

Flujo radiante (P_e). Es la energía radiante emitida, transferida o recibida en un intervalo elemental de tiempo, dividido por el valor de dicho intervalo: $P_e = dQ_e/dt$. La unidad es el vatio (w).

Sea ahora una esfera S que tiene en su centro una fuente puntual O. Si la energía radiante que recibe de O cualquier punto de la superficie S permanece constante, diremos que dicha fuente O es uniforme. Por el contrario, si esto no se cumple, habrá que caracterizar la fuente en cada dirección (O_x) mediante la intensidad radiante.

Para ello, consideremos alrededor de la dirección O_x (fig. 2-1) un cono de vértice O y pequeño ángulo sólido Ω. Si tenemos en cuenta la ley de la propagación rectilínea en un medio homogéneo y suponemos que dicho medio no absorbe la radiación, la energía emitida en el cono permanece constante durante la propagación y por consiguiente si cortamos el cono por un plano cualquiera, el flujo radiante P_e a través del área del plano limitado por el cono es independiente del plano escogido, π_1, π_2... (fig. 2-1). Entonces se puede caracterizar la emisión de energía radiante en la dirección de O_x por la relación P_e/Ω, o más exactamente por el límite de esta relación cuando el cono tiende hacia O_x en todas sus dimensiones. Dicha emisión de energía se denomina intensidad radiante (I_e):

$$I_e = dP_e/d\Omega \tag{1}$$

Intensidad radiante (I_e). Referida a un punto y a una dirección, es el flujo radiante emitido o transferido dentro de un elemento de ángulo sólido con vértice en el punto y que contiene la dirección dada, dividido por el valor de dicho elemento del ángulo sólido. Unidad: $W \times sr^{-1}$.

Si M es el punto de intersección del eje O_x con el área infinitamente pequeña dS del plano π_2 (fig. 2-1), $OM = r$ y θ es el ángulo que forma el eje O_x con la normal MN a la superficie dS, por la definición de ángulo sólido se podrá escribir:

$$d\Omega = dS \cos \theta / r^2 \tag{2}$$

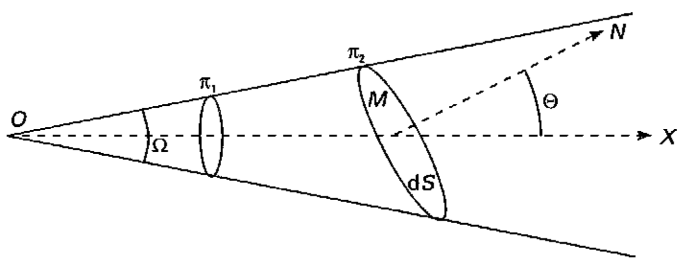

Figura 2-1. Esquema geométrico para la descripción del concepto de intensidad radiante.

y por consiguiente,

$$I_e = \mathrm{d}P_e \cdot r^2/\mathrm{d}S \cos\theta \tag{3}$$

En el caso particular de una fuente uniforme, $\Omega = 4\pi$, la ecuación (1) queda:

$$I_e = P_e/4\pi \tag{4}$$

donde P_e representa el flujo radiante total emitido en todo el ángulo alrededor de la fuente.

Fuentes extensas

En el caso de fuentes extensas, la noción de intensidad definida en el apartado anterior resulta inaplicable, por lo que se reemplaza dicha magnitud por dos nuevas diferentes: la *extancia radiante*, cuando se trata de conocer la energía emitida en todas las direcciones y la *radiancia*, cuando sólo interesa una determinada dirección.

Para el primer caso, consideremos una área pequeña S alrededor de un punto O sobre la superficie de la fuente extensa, y sea P_e el flujo radiante emitido por S en todo el ángulo sólido 2π situado del lado del plano tangente en O donde no se encuentra la fuente. Denominaremos exitancia radiante (Me) de la fuente en el punto O al límite de la relación P_e/S cuando S tiende a cero en todas sus dimensiones alrededor de O:

$$M_e = \mathrm{d}P_e/\mathrm{d}S \tag{5}$$

Exitancia radiante (M_e). Referida a un punto de una superficie, es el flujo radiante emitido por un elemento de superficie que contiene el punto, dividido por el área de dicho elemento de superficie. Unidad: vatios/m^2 = $w \times m^{-2}$.

Hay que advertir que la exitancia radiante es una densidad superficial de flujo energético y que se refiere a energía *emitida.*

Para el segundo caso, cuando sólo interesa una determinada dirección consideremos un punto O perteneciente a la superficie de la fuente S y una dirección O_x cualquiera que forma un ángulo θ con la normal (fig. 2-2). Una pantalla π_1 opaca normal a O_x y a una distancia cualquiera de O está provista de un pequeño orificio de área σ que deja pasar la energía radiante contigua al eje O_x. Un observador se coloca sobre el eje O_x en un plano π_2 situado a una distancia r de π_1 lo suficientemente grande como para poder considerar a la abertura σ como una fuente puntual de intensidad radiante I_e en la dirección O_x. Denominaremos radiancia L_e de la fuente en la dirección O_x al límite de la relación I_e/σ cuando el orificio σ tiende a cero en todas sus dimensiones alrededor de O_x:

$$L_e = \mathrm{d}I_e/\mathrm{d}\sigma \tag{6}$$

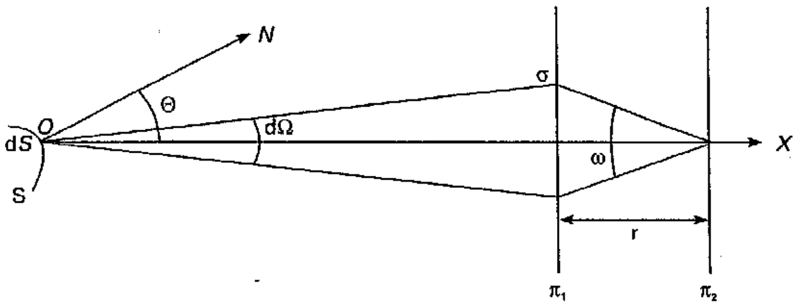

Figura 2-2. Esquema geométrico para la descripción del concepto de radiancia.

Una definición más general se obtendría teniendo en cuenta la definición de intensidad radiante ($I_e = dP_e/d\Omega$), con lo que

$$L_e = dP_e/d\Omega \; d\sigma \qquad (7)$$

Si colocamos la pantalla π_1 lo suficientemente cerca de la superficie de la fuente S, de forma que entre el área $d\sigma$ del orificio y el área dS de la superficie de la fuente que el observador ve a través del orificio se verifique la relación,

$$d\sigma = dS \cos \theta \qquad (8)$$

la expresión (7) queda como sigue:

$$L_e = dP_e/d\Omega \; dS \cos \theta \qquad (9)$$

Radiancia (L_e). Referida a un punto de una superficie y a una dirección, es el flujo radiante transferido por un elemento de superficie que contiene el punto dado, dentro de un ángulo sólido elemental que contiene la dirección y del que es indicador el límite del elemento de superficie, dividido por el área del elemento de superficie y el valor del ángulo sólido. Unidad: $W \times sr^{-1} \; m^{-2}$.

La noción de radiancia se suele aplicar a volúmenes luminosos desprovistos de superficie exterior, como el cielo azul, mientras que la exitancia radiante se aplica a fuentes extensas con bordes o límites bien definidos.

Superficie receptora

Una vez que se ha caracterizado radiométricamente una fuente puntual (intensidad radiante) y una fuente extensa (exitancia radiante y radiancia), sólo queda por caracterizar una superficie receptora de energía radiante.

Para ello consideremos sobre una superficie real o ficticia una área finita S, limitada por una curva cerrada que es atravesada por un flujo radiante P_e. Si alrededor de un punto M perteneciente a dicha superficie, hacemos tender la misma a cero en todas sus dimensiones, el flujo radiante P_e que atraviesa S tenderá también a cero y el límite de la relación,

$$E_e = dP_e/dS \qquad (10)$$

tenderá a un valor que denominaremos irradiancia.

Irradiancia (E_e). Referida a un punto de una superficie, es el flujo radiante transferido o recibido por un elemento de superficie que contiene el punto, dividido por el área de dicho elemento de superficie. Unidad: $W \times m^{-2}$.

Al igual que ocurre con la exitancia radiante, la irradiancia es una densidad de flujo energético, pero, por el contrario, se refiere a energía *recibida*.

Relaciones entre magnitudes radiométricas

Intensidad radiante-Irradiancia

Fijémonos en la figura 2-1 y sustituyamos la relación (2) en la definición de irradiancia (10),

$$E_e = \mathrm{d}P_e \cos\theta / r^2 \, \mathrm{d}\Omega \tag{11}$$

teniendo en cuenta (1), queda,

$$E_e = I_e \cos\theta / r^2 \tag{12}$$

que como se puede observar es la clásica *ley de la inversa del cuadrado de la distancia*, que dice que la irradiancia sobre una superficie es directamente proporcional a la intensidad radiante e inversamente proporcional a la inversa del cuadrado de la distancia entre la fuente y la superficie.

Radiancia-Irradiancia

Considerando la fig. 2-2 y teniendo en cuenta (12), la irradiancia en O_x sobre el plano π_2 será:

$$E_e = I_e / r^2 \tag{13}$$

Por otro lado, el ángulo sólido bajo el cual la abertura σ se ve desde π_2 puede escribirse como

$$\mathrm{d}\omega = \mathrm{d}\sigma / r^2 \tag{14}$$

Partiendo de la definición de radiancia expresada por (6) y sustituyendo (14) y (13), obtenemos:

$$L_e = \mathrm{d}I_e / \mathrm{d}\sigma = \mathrm{d}E_e / \mathrm{d}\omega \tag{15}$$

Esta expresión puede considerarse también como una *nueva definición de la radiancia*, que tiene la ventaja de no tener en cuenta la pequeña abertura σ, que podría causar perturbaciones por efecto de la difracción.

Exitancia radiante-Radiancia

Como hemos mencionado, la noción de exitancia radiante se aplica a fuentes extensas con superficie emisora bien definida. Volviendo a la figura 2-2, coloquemos la pantalla π_1 muy cerca de la fuente, de forma que se cumpla la relación (8) entre el área $d\sigma$ de la abertura y el área dS de la fuente que el observador ve a través de dicha abertura. En el ángulo sólido elemental $d\Omega$ alrededor de O_x, la intensidad radiante de la fuente puntual que constituye el elemento dS tendrá un valor I_e y por consiguiente, según (1), el flujo radiante elemental correspondiente será igual al producto $I_e \times d\Omega$, y el flujo total P_e emitido en todas las direcciones por dS se obtendrá por integración,

$$P_e = \int I_e \, d\Omega \tag{16}$$

la integral se extiende a todo el ángulo sólido 2π situado del lado del plano tangente en O donde no se encuentra la fuente. Teniendo en cuenta (5) y (6), tendremos

$$dP_e = M_e \, dS$$

$$dI_e = L_e \, d\sigma \rightarrow I_e = \int L_e \, d\sigma$$

ya que

$$dP_e = I_e \, d\Omega$$

sustituyendo obtendremos

$$M_e \, dS = \int L_e \, d\sigma \, d\Omega \tag{17}$$

y sustituyendo (8) obtendremos la relación entre M_e y L_e,

$$M_e = \int L_e \cos\theta \, d\Omega \tag{18}$$

Si consideramos una fuente primaria y no existe ninguna causa externa de asimetría, L_e es función de θ. En este caso, si consideramos dos conos de revolución alrededor del eje ON y de semiángulos θ y $\theta + d\theta$, el ángulo sólido que subtienden entre ellos viene dado por

$$d\Omega = 2\pi \operatorname{sen} \theta \, d\theta \tag{19}$$

que sustituida en (18) da

$$M_e = 2\pi \int_0^{\pi/2} L_e \operatorname{sen} \theta \cos \theta \, d\theta \tag{20}$$

Puede además ocurrir que L_e no dependa más que de θ, es decir, que la radiancia de la fuente no dependa más que de la dirección desde donde se observa.

Entonces se dice que la fuente sigue la ley de Lambert. En este caso la expresión (20) queda así:

$$M_e = 2\pi L_e \int_0^{\pi/2} \text{sen}\,\theta \cos\theta \, d\theta = 2\pi L_e \int_0^1 u \, du \tag{21}$$

y como la integral definida vale $^1/_2$, obtendremos la relación simple,

$$M_e = \pi L_e \tag{22}$$

PROPIEDADES DEL SISTEMA VISUAL EN CUANTO RECEPTOR DE ENERGIA RADIANTE

El proceso de la visión se pone en marcha a partir de la absorción de energía radiante por la retina.

Como hemos mencionado, las magnitudes radiométricas caracterizan perfectamente cualquier tipo de energía radiante. Cabría preguntarse si dichas magnitudes son suficientes para caracterizar la respuesta del sistema visual a la energía radiante. La respuesta es evidentemente negativa. Basta pensar que una radiación ultravioleta queda físicamente caracterizada por las magnitudes definidas hasta ahora. Sin embargo, el ojo no detecta dicha radiación, por lo que la respuesta del sistema visual es lógicamente nula.

Esto obliga a definir unas magnitudes específicas que caractericen la radiación en cuanto activadora de sensaciones visuales. Lógicamente, deberán estar relacionadas con las magnitudes radiométricas, y las modificaciones vendrán impuestas por las propiedades específicas del sistema visual en cuanto receptor de energía radiante.

Integración de la energía radiante en el tiempo

En general, cualquier detector de energía radiante produce una respuesta que será mayor o menor dependiendo del valor del flujo de energía. Como es lógico, existirá un umbral por debajo del cual el detector no dará señal y un límite de saturación por encima del cual la respuesta será constante. Si este límite es demasiado amplio, el detector se puede llegar a deteriorar. Sin embargo, dentro del intervalo útil puede ocurrir que la respuesta del detector sea función sólo del flujo P_e y no del tiempo t, como ocurre por ejemplo en los receptores fotoeléctricos. Por el contrario, en la emulsión fotográfica, la densidad óptica no depende en una primera aproximación más que del producto $P_e t$, es decir, de la energía total recibida. Recuérdese que en este último caso se puede compensar un débil flujo de energía aumentando el tiempo de exposición.

El sistema visual no es estrictamente de ninguno de estos dos tipos, sino una combinación de ambos. Para tiempos muy breves, de centésimas o décimas de segundo, sólo es importante la energía total, es decir, el producto $P_e t$. Pero una vez que han transcurrido algunos segundos, lo único que influye es el flujo P_e, debido a que se establece un equilibrio, no entre la energía absorbida y la emitida, sino a causa de los fenómenos fotoquímicos y nerviosos. En una primera aproximación supondremos que el tiempo es el suficiente para que se produzca el equilibrio.

Observador de referencia fotométrico

La caracterización del sistema visual como receptor de energía radiante se lleva a cabo mediante la determinación de la curva de eficacia luminosa relativa espectral o curva de visibilidad espectral (V_λ). Esta curva proporciona la sensibilidad relativa del sistema visual a las distintas longitudes de onda del espectro visible (fig. 2-3). Dada la importancia de esta función, en el capítulo 3 se estudian con detenimiento tanto su determinación experimental como sus implicaciones más importantes. Una de ellas es la definición del *observador de referencia fotométrico*, que da una V_λ media de muchos observadores que se toma como estándar.

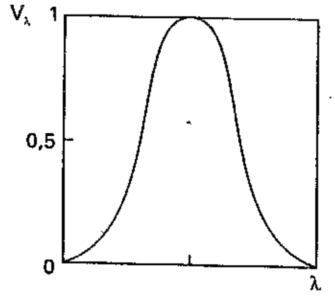

Figura 2-3. Forma genérica de la curva de eficacia luminosa relativa espectral V_λ.

Gracias a esta definición del observador de referencia fotométrico, es posible definir las magnitudes fotométricas a partir de las radiométricas. Por ejemplo, si se parte de una fuente que emite una radiación monocromática de radiancia L_e, su aspecto visual estará caracterizado por el producto $V_\lambda \cdot L_e$, es decir, por la misma L_e pesada por la función de eficacia luminosa V_λ, que caracteriza la respuesta del sistema visual para cada longitud de onda. La radiancia visual, que denominaremos luminancia, se define por la expresión:

$$L = k_m V_\lambda L_e \quad (23)$$

donde k_m es un coeficiente que depende de las unidades elegidas para medir L y L_e, ya que V_λ es adimensional.

Si en lugar de una radiación monocromática, se trata de una radiación compuesta o de un espectro continuo, la luminancia total será la suma de las componentes, es decir:

$$L = k_m \int V_\lambda L_{e\lambda} d_\lambda \quad (24)$$

donde los límites de integración se corresponden con los del espectro visible, que es donde V_λ toma valores distintos de cero.

Todos estos razonamientos son válidos para visión fotópica. Debido a la dualidad retiniana, es decir, a la presencia de dos tipos de fotorreceptores, en visión escotópica la V_λ definida deja de ser válida. Entonces se determina una nueva curva de visibilidad V'_λ para visión escotópica. V'_λ está desplazada respecto a V_λ hacia las longitudes de onda cortas (este corrimiento recibe el nombre de *efecto Purkinje*).

Ahora bien, la expresión (24) implica que las luminancias son aditivas, lo cual no deja de ser suposición. La ley de Abney, que realmente es un postulado, da base a esta suposición sobre la cual descansa toda la fotometría.

Abney comprobó experimentalmente que las luminancias son aditivas, o lo que es lo mismo, que la relación entre energía radiante y energía luminosa es lineal. La expresión analítica de la ley de Abney vendría dada por la relación (24).

En visión escotópica esta ley se cumple siempre, mientras que en visión fotópica ya no es tan exacta pues hay que matizar las condiciones (por ejemplo, visión lateral o colores complementarios).

Cáculo de k_m

El valor más lógico que podría darse al coeficiente k_m sería la unidad, ya que de esta forma la luminancia visual sería igual a la energética para una fuente radiante de una longitud de onda de 555 nm. Sin embargo, esto no es así por el único motivo de que las unidades luminosas fueron definidas mucho antes que las energéticas. En un principio se definió como unidad de intensidad de una determinada lámpara de incandescencia. Posteriormente se definió la «bujía nueva», de forma que la luminancia del cuerpo negro a la temperatura de solidificación del platino a la presión normal era exactamente 60 bujías nuevas por cm^2. Esta unidad se llama en la actualidad candela (cd).

Para el cálculo de k_m habrá que tener en cuenta la expresión (24), donde pondremos $L = 60$ cd/cm^2, V_λ, que corresponderá a la eficacia luminosa del observador de referencia, y $L_{e\lambda}$, que corresponderá a la luminancia energética espectral del cuerpo negro en el punto de solidificación T del platino. Para el observador de referencia fotométrico de la CIE se obtiene

$$k_m = 680{,}23 \text{ (lúmenes por vatio)}$$

Como veremos más adelante, el lúmen es una unidad de flujo. Es decir, un vatio de energía radiante proporciona un máximo de 680 lúmenes, que se alcanza cuando se utiliza una radiación monocromática de 555 nm. Como es lógico, en todos los demás casos se obtiene menos. Se llama *eficacia luminosa específica* al flujo luminoso en lúmenes que corresponde a un flujo energético de 1 w para la radiación considerada.

Clásicamente, la unidad fundamental en fotometría era la candela, una unidad de intensidad luminosa a partir de la cual se definían todas las demás. Sin embargo, esta elección es desafortunada, fundamentalmente porque depende de una fuente emisora y en concreto del desarrollo de una escala termodinámica de temperatura. Por esta razón es mejor abandonar la emisión del platino fundente y redefinir el patrón de fotometría en términos radiométricos y con luz monocromática, sin tenerlo sujeto a una fuente de emisión, como se ha explicado anteriormente. El valor de k_m se puede adaptar arbitrariamente por acuerdo, y se le puede dar un valor de 680, sin más objeto que el de mantener la tradición.

De esta manera, las magnitudes fotométricas se definen siguiendo el mismo esquema que las radiométricas. Así, en este caso, la magnitud fundamental es el flujo luminoso.

MAGNITUDES FOTOMETRICAS

Flujo luminoso (F). Se define como flujo luminoso de una fuente de energía radiante que emite un flujo energético P_e de longitud de onda λ, al que corresponde una eficacia luminosa V_λ, al producto

$$F = P_{e\lambda} V_\lambda \tag{25}$$

Si la fuente emite distintas longitudes de onda, su flujo luminoso será

$$F = \sum_i P_{e\lambda i} V_{\lambda i} \tag{26}$$

Si el espectro de emisión de la fuente es continuo, el flujo luminoso total será

$$F = k \int_0^\infty P_{e\lambda} V_\lambda \, d\lambda \tag{27}$$

La unidad es el lumen, que es el flujo luminoso de una radiación monocromática que se caracteriza por una frecuencia de $540 \cdot 10^{12}$ hercios (555 nm) y un flujo radiante de 1/680 vatios (1 W_{555} = 680 lúmenes).

Fuentes puntuales

Para caracterizar una fuente puntual se emplea la intensidad luminosa.

Intensidad luminosa (I). Si se supone una fuente puntual que emite un flujo luminoso dF en un ángulo sólido dw, se denomina intensidad luminosa al cociente

$$I = dF/d\omega \tag{28}$$

La unidad es la candela, que es la intensidad luminosa de una fuente que emite, en un ángulo sólido total de 4π *str*, una radiación monocromática que se caracteriza por una frecuencia de $540 \cdot 10^{12}$ hercios (555 nm) y un flujo radiante de $4\pi/680$ vatios (Candela = lumen/*Str*).

Fuentes extensas

Una fuente extensa se caracteriza fotométricamente, al igual que ocurre en radiometría, por dos magnitudes: la exitancia luminosa (que se corresponde con la exitancia radiante) y la luminancia (que se corresponde con la radiancia).

Exitancia luminosa (M). Si un elemento de área dS emite en total y en todas direcciones un flujo lumioso dF, se define como exitancia luminosa de dicha superficie el cociente:

$$M = \mathrm{d}F/\mathrm{d}S \tag{29}$$

Unidad: Lumen/m^2.

Luminancia (L). Supongamos un elemento de superficie dS (fig. 2-4) que emite luz en todas las direcciones y uniformemente en todos sus puntos, y una superficie dS' situada a una distancia r de dS, que recibe la luz. Supongamos además que la normal N a dS en P forma un ángulo α con r, que dS' es normal a r y que las dimensiones de dS y dS' son pequeñas respecto de r. Con vértice en cada punto de dS se puede imaginar un cono elemental de luz cuyo flujo recibirá dS'. Estos conos, dadas las pequeñas dimensiones de dS y dS' frente a r, pueden considerarse todos de igual ángulo sólido dω mientras nos movamos en órdenes infinitesimales y siempre que el ángulo α permanezca constante. Sin embargo, dicho flujo dependerá en general del ángulo α a través de un factor $f(\alpha)$ que en cada caso habrá que determinar. Es decir,

$$\mathrm{d}F = L_\alpha\, \mathrm{d}S\, \mathrm{d}\omega\, f(\alpha) \tag{30}$$

El coeficiente de proporcionalidad L_α es lo que se denomina luminancia de la superficie emisora en la dirección definida por el ángulo α. De ahí que se pueda expresar

$$L_\alpha = \mathrm{d}F/\mathrm{d}S\, \mathrm{d}\omega\, f(\alpha) \tag{31}$$

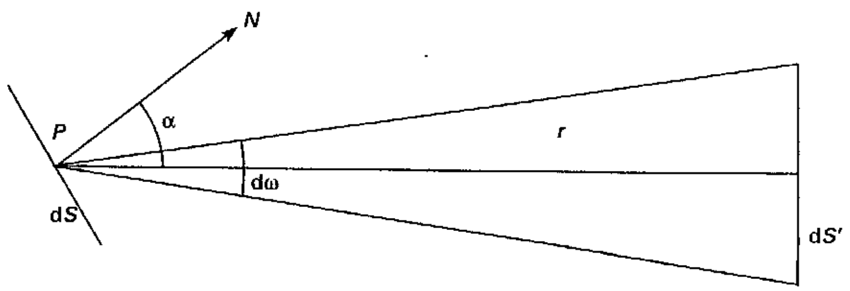

Figura 2-4. Esquema geométrico para la descripción del concepto de luminancia.

Como se puede ver, la luminancia caracteriza la fuente en una dirección y es una magnitud de particular importancia por ser la que aprecia el ojo cuando observa fuentes extensas.

Unidad: lúmenes/$Str \cdot m^2$ = candela/m^2 *

En la tabla 2-1 se muestra un orden de magnitud de los niveles de luminancia detectados por el ojo, con indicación del mecanismo implicado.

Superficie receptora

Finalmente nos queda por caracterizar fotométricamente una superficie receptora, lo que en radiometría denominábamos irradiancia y ahora definiremos como iluminación.

Iluminación (E). Cuando sobre un elemento de área dS llega un flujo luminoso dF, se dice que recibe una iluminación definida por el cociente

$$E = \mathrm{d}F/\mathrm{d}S \tag{32}$$

Unidad: lumen/m^2 = lux

Hay que advertir que, al igual que ocurriría en radiometría, las unidades de iluminación son las mismas que las de la exitancia luminosa, es decir, lumen/m^2, pero en el primer caso se refiere a flujo recibido, mientras que en el segundo a flujo emitido.

La Ley de la inversa del cuadrado de la distancia

Supongamos una fuente puntual P que emite un flujo luminoso dF (fig. 2-5). La intensidad será

$$I = \mathrm{d}F/\mathrm{d}\omega$$

y la iluminación sobre el área dS será

$$E = \mathrm{d}F/\mathrm{d}S = I\,\mathrm{d}\omega/\mathrm{d}S$$

como

$$\mathrm{d}\omega = \mathrm{d}S \cos \alpha/r^2$$

---

* Los anglosajones, suelen utilizar también como unidades de luminancia el footlambert y el mililambert, cuyas equivalencias son:

1 Footlambert = 3,43 cd/m^2.
1 Mililambert = 3,183 cd/m^2.

TABLA 2-1

Niveles de luminancia (en cd/m^2) a los cuales puede estar sometido el ojo, con indicación del mecanismo receptivo implicado. El Pto Aguilar-Stiles marca el nivel en que los bastones se saturan

10^{-7}		
10^{-6}	Umbral absoluto	
10^{-5}		
10^{-4}	Superficie blanca en una noche sin luna	Visión de bastones
10^{-3}		
10^{-2}	Superficie blanca en una noche con luna llena	
10^{-1}		Zona de transición
1	Lectura con dificultad	
10^{1}	Lectura confortable	
10^{2}		Pto Aguilar-Stiles
10^{3}	Adecuado para tareas visuales de precisión	
10^{4}	Luminancia de un papel blanco bajo sol radiante	
10^{5}		
10^{6}		Visión de conos
10^{7}	Filamento de lámpara de incandescencia	
10^{8}	Arco de carbono	
10^{9}	Sol	
10^{10}	Explosiones nucleares Láseres de gran potencia	Deterioro de la retina

entonces

$$E = I \cos \alpha / r^2 \qquad (33)$$

Esta expresión constituye la *ley de la inversa del cuadrado de la distancia*, que nos dice que la iluminación que recibe una superficie dS, proveniente de una fuente puntual P, es directamente proporcional a su intensidad y al coseno del ángulo que forma la normal a dicha superficie con la recta que la une a la

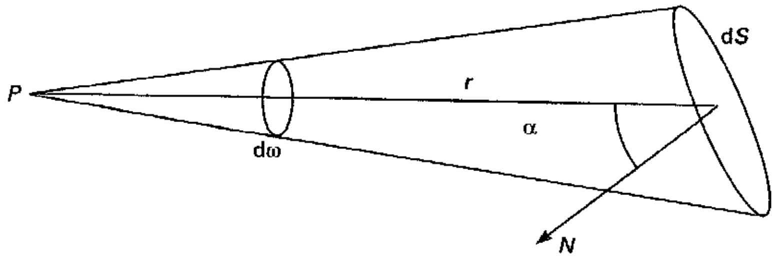

Figura 2-5. Esquema geométrico para la deducción de la ley de la inversa del cuadrado de la distancia.

fuente, e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que separa P de dS.

Ley de Lambert. (Difusores y emisores perfectos)

Recordemos la definición más general de la luminancia, que es según (31)

$$L_\alpha = \mathrm{d}F_\alpha/\mathrm{d}\omega\ \mathrm{d}S\, f(\alpha)$$

Ahora bien, si el emisor o difusor es perfecto se cumple que

$$f(\alpha) = \cos\alpha$$
$$L_\alpha = L = \text{cte}$$

Entonces se dice que el difusor o emisor es lambertiano y

$$L = \mathrm{d}F_\alpha/\mathrm{d}\omega\ \mathrm{d}S \cos\alpha$$

pero $\mathrm{d}F_\alpha/\mathrm{d}\omega$ tiene dimensiones de intensidad, por lo que se denomina *intensidad de una fuente extensa*, I_α, y entonces

$$L = I_\alpha/\mathrm{d}S \cos\alpha \tag{34}$$

Cuando la claridad de una superficie emisora es independiente del ángulo de observación, decimos que se trata de un emisor o difusor perfecto, para el cual tanto la luminancia como la claridad son independientes de la dirección de observación.

Si llamamos I_O a la intensidad según la normal

$$L_O = I_O/\mathrm{d}S$$
$$L_\alpha = I_\alpha/\mathrm{d}S \cos\alpha$$

Como

$$L_O = L_\alpha$$

entonces

$$I_\alpha = I_O \cos\alpha \text{ (Ley de Lambert o del coseno)} \tag{35}$$

es decir, en los emisores y difusores perfectos la intensidad varía con el coseno del ángulo que forma la dirección de emisión normal.

Si se sustituye (35) en (34) queda L independiente de la dirección. Esta cualidad del difusor perfecto es la que hace que una esfera traslúcida luminosa parezca un disco plano.

Intensidad de fuentes extensas

Anteriormente (34) hemos definido dicha intensidad como

$$I_\alpha = L\, dS \cos\alpha$$

Ahora deseamos conocer su relación con la intensidad definida para fuentes puntuales.

Supongamos (fig. 2-6) que se desea iluminar la superficie dS_2 para que tenga una iluminación E. Para ello deberá recibir un flujo dF tal que

$$E = dF/dS_2$$

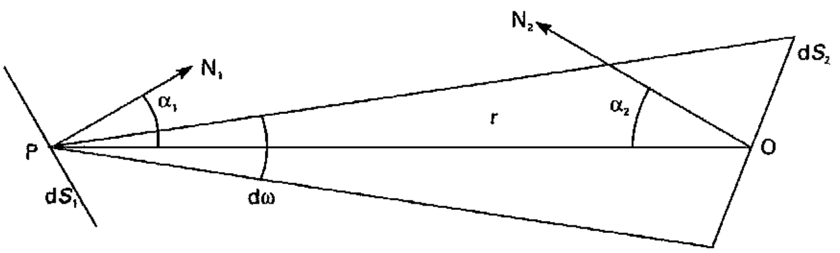

Figura 2-6. Esquema geométrico para la descripción del concepto de intensidad de fuentes extensas.

Esto se puede conseguir poniendo en P una fuente puntual o una fuente extensa dS_1.

Si se coloca una fuente puntual, todo el flujo estará contenido dentro del ángulo sólido $d\omega$. Si se coloca una fuente extensa, parte del flujo que recibe dS_2 irá por fuera de $d\omega$. Sin embargo, esto no importa, porque el flujo llega a dS_2 y aparece en la boca de un cono que con vértice en dS_1 se apoya en dS_2.

Por otra parte, las dos formas de definir la intensidad cumplen tanto la ley del cuadrado de la distancia como la del coseno. Es decir, teniendo en cuenta que

$$dF = L\, dS\, d\omega \cos\alpha$$

y que

$$d\omega = dS_2 \cos \alpha_2/r^2$$

entonces

$$dF = (L\, dS_1 \cos \alpha_1)\, d\omega = I_{\alpha_1}\, d\omega = I_{\alpha_1}\, dS_2 \cos \alpha_2/r^2 \qquad (36)$$

con lo que la iluminación será

$$E = dF/dS_2 = I_{\alpha_1} \cos \alpha_2/r^2 \qquad (37)$$

que como vemos concuerda dimensionalmente con (33), es decir, con

$$E = I \cos \alpha/r^2$$

donde I es la intensidad de una fuente puntual.

La diferencia fundamental estriba en que cuando la fuente es puntual la expresión (33) es aplicable con toda exactitud, mientras que si es extensa, la expresión (37) sólo es aproximada, ya que ni r puede considerarse constante para todos los conos, ni tampoco los ángulos α, con lo que el error aumenta conforme r disminuye.

Relaciones entre magnitudes fotométricas

Relación intensidad-luminancia

Se puede utilizar la expresión ya mencionada

$$I_\alpha = L\, dS \cos \alpha$$

Relación fotométrica entre dos elementos de superficie

Para ello hay que fijarse de nuevo en la figura 2-6. Teniendo en cuenta (36), es decir,

$$dF = (L\, dS_1 \cos \alpha_1)\, d\omega$$

la iluminación en dS_2 será

$$E = dF/dS_2 = (L\, dS_1 \cos \alpha_1/dS_2)\, d\omega = L\, dS_1 \cos \alpha_1 \cos \alpha_2/r^2 \qquad (38)$$

Relación flujo-luminancia

Para ello consideremos la figura 2-7, donde un emisor perfecto dS emite un flujo total F en el semiespacio superior y presenta una luminancia L.

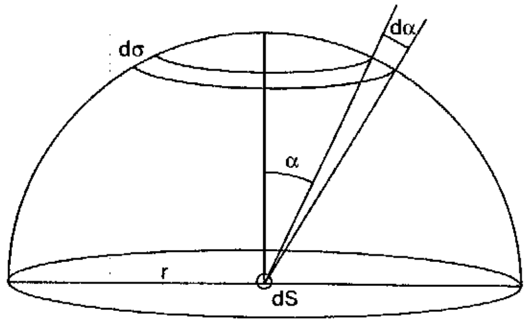

Figura 2-7. Esquema geométrico para la deducción de la relación flujo-luminancia.

Para calcular la relación entre F y L tomemos un elemento de superficie $d\sigma$. La zona de amplitud $d\alpha$ tendrá una área $d\sigma = 2\pi r^2$ sen α $d\alpha$ y el ángulo sólido que subtiende $d\sigma$ será

$$d\omega = d\sigma/r^2 = 2\pi \text{ sen } \alpha \ d\alpha$$

luego

$$dF = L \ dS \cos \alpha \ d\omega = 2\pi \ L \ dS \text{ sen } \alpha \cos \alpha \ d\alpha$$

Integrando para toda la semiesfera

$$F = 2\pi L dS \int_0^{\pi/2} \text{sen}\alpha \cos\alpha \ d\alpha$$

luego

$$F = \pi L \ dS \tag{39}$$

Relación iluminación-luminancia

Imaginemos un elemento difusor perfecto dS que recibe un flujo F y lo reemite totalmente. Se constituirá entonces en un emisor perfecto que emite un flujo F con una luminancia L. Como

$$E = F/dS$$

entonces, teniendo en cuenta (39),

$$E = \pi L \ dS/dS = \pi L \tag{40}$$

En la tabla 2-2 se muestra un esquema de las magnitudes radiométricas con sus correspondientes magnitudes fotométricas, especificando, en cada caso las unidades.

TABLA 2-2

Resumen de las magnitudes radiométricas y las correspondientes magnitudes fotométricas

	Radiometría		*Fotometría*	
	Magnitud	*Unidad*	*Magnitud*	*Unidad*
	Flujo radiante $P_e = dQ_e/dt$	Vatio (w)	**Flujo luminoso** $F = k_m (P_e)_\lambda V_\lambda$ $F = k_m \sum_i (P_e)_{\lambda i} V_\lambda$	Lumen (lm)
Fuente puntual	**Intensidad radiante** $I_e = dP_e/d\omega$	$w\ sr^{-1}$	**Intensidad luminosa** $I = dF/d\omega$	*lumen* sr^{-1} = = candela (cd)
Fuente extensa	**Exitancia radiante** $M_e = dP_e/dS$ P_e: total y en todas direcciones. Emitido. dS: elemento de superficie de la fuente.	$w\ m^{-2}$	**Exitancia luminosa** $M = dF/dS$ F: total y en todas direcciones. Emitido.	lumen m^{-2}
	Radiancia $L_e = dP_e/(d\omega\, dS \cos\alpha)$ P_e: en una dirección.	$w\ sr^{-1}\ m^{-2}$	**Luminancia** $L = dF/(d\omega\, dS \cos\alpha) =$ $= I_\alpha/(dS \cos\alpha)$ F: en una dirección.	$lm\ sr^{-1}\ m^{-2}$ $= cd\ m^{-2}$
Superficie receptora	**Irradiancia** $E_e = dP_e/dS$ P_e: total y en todas direcciones. Recibido. dS: elemento de superficie del receptor.	$w\ m^{-2}$	**Iluminación** $E = dF/dS$ F: total y en todas direcciones. Recibido.	lumen m^{-2} = lux

FUENTES DE LUZ

Las fuentes luminosas son aquellas que emiten energía radiante dentro del espectro visible. En principio consideramos sólo las fuentes primarias, que dividiremos en naturales y artificiales. Sin embargo, es conveniente recordar primero las propiedades fundamentales del emisor perfecto o cuerpo negro, ya que esto nos permitirá introducir diferentes conceptos que son necesarios para la descripción de las demás fuentes.

Cuerpo negro

Cualquier cuerpo caliente emite energía radiante bajo la forma de un espectro continuo. El reparto espectral de energía dependerá del cuerpo considerado, pero se puede imaginar un caso teórico en el cual el reparto de energía no dependa más que de la temperatura, es decir, sea independiente del cuerpo considerado. A este caso teórico se le denomina cuerpo negro o radiador integral. Un cuerpo negro puede llegar a obtenerse en la práctica y consiste en una pequeña abertura practicada en una superficie esférica pintada por dentro de negro. A bajas temperaturas, este agujero es un negro perfecto, pues cualquier radiación que penetre por él en la práctica no sale, ya que es absorbida totalmente debido a las múltiples reflexiones y difusiones que se producen en el interior de la esfera. La exitancia radiante espectral del cuerpo negro a diferentes temperaturas se muestra en la figura 2-8.

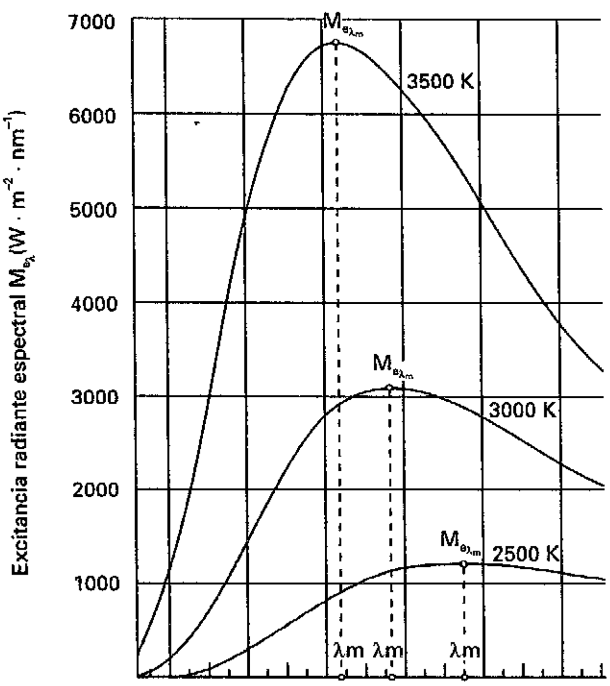

Figura 2-8. Exitancia radiante espectral del cuerpo negro para diferentes temperaturas. (Según Wyszecki G. & Stiles W. S. 1982).

La emisión del cuerpo negro fue explicada por Planck basándose en la hipótesis de los cuantos. Planck demostró que la exitancia radiante espectral del cuerpo negro obedece a la ley que lleva su nombre:

$$M_{e\lambda} = (2\pi c^2 h\lambda^{-5})/(e^{k/\lambda T} - 1) \tag{41}$$

donde T es la temperatura absoluta, c la velocidad de la luz en el vacío, h la constante de Planck y k una constante.

La fórmula de Planck se ajusta muy bien a los resultados experimentales. Además, la termodinámica demuestra que el cuerpo negro verifica la ley de Lambert. De acuerdo con (22) la radiancia espectral del cuerpo negro se puede expresar como:

$$L_{e\lambda} = M_{e\lambda}/\pi \tag{42}$$

La ley de Planck tiene además consecuencias importantes, siendo la más destacada la ley de Stefan-Boltzman y la ley de Wien.

Ley de Stefan-Boltzman. Establece que la exitancia radiante del cuerpo negro es proporcional a la cuarta potencia de la temperatura absoluta. Es decir

$$M_e = \sigma T^4 \tag{43}$$

Ley de Wien. Establece que la abscisa del máximo del reparto espectral del cuerpo negro varía en razón inversa a la temperatura absoluta. Es decir,

$$\lambda_m T = 2898 \tag{44}$$

Cuerpo no negro

Una fuente térmica que no sea un cuerpo negro tiene una radiancia $L'_{e\lambda}$ que es siempre inferior a la del cuerpo negro en las mismas condiciones, o sea,

$$L'_{e\lambda} = \alpha_\lambda L_{e\lambda} \tag{45}$$

donde la constante de proporcionalidad α_λ está en función de la longitud de onda y de la temperatura, y por supuesto es siempre inferior a la unidad (se denomina *emisividad direccional espectral*). Se especifica direccional porque si el cuerpo no obedeciera a la ley de Lambert, α_λ dependería de la dirección de observación. En el caso de una superficie perfectamente mate, α_λ es independiente de la dirección. De acuerdo con la ley de Kirchhoff, α_λ representaría el *factor espectral de absorción*.

Entonces el *factor espectral de reflexión* vendrá expresado por

$$\rho_\lambda = 1 - \alpha_\lambda \tag{46}$$

Evidentemente, en el caso de un cuerpo negro, $\rho_\lambda = 0$ y $\alpha_\lambda = 1$. Por el contrario, un difusor perfecto se caracterizaría por tener $\rho_\lambda = 1$ y $\alpha_\lambda = 0$.

Si el factor de absorción no depende de λ, entonces el cuerpo es gris. Este radia igual que un cuerpo negro, pero con una reducción de la energía emitida en todo el espectro de acuerdo con el valor del factor de absorción.

Temperatura de color (T_c). Si para una fuente α_λ varía lentamente en el visible con la longitud de onda, su reparto de energía es muy similar al del cuerpo negro a una cierta temperatura, que se denomina temperatura de color de la fuente. Su especificación constituye una forma usual de caracterizar tanto su color como su reparto de energía, bien entendido que salvo para el cuerpo gris la temperatura de color difiere de la temperatura real T.

Fuentes naturales

La principal fuente natural es el sol. La visión es un fenómeno que tiene lugar sobre todo bajo iluminación solar. Caracterizar una fuente luminosa, como ocurre con cualquier fuente de radiación, es conocer su distribución espectral de energía. Conocer con precisión el espectro del sol es complicado, ya que las medidas suelen hacerse a nivel del suelo, por lo que el espectro medido viene modificado por la absorción atmosférica. Esta absorción es difícil de cuantificar, ya que no resulta fácil evaluar el espesor de la atmósfera. Por otro lado, hay que especificar también la posición del sol antes de medir su espectro.

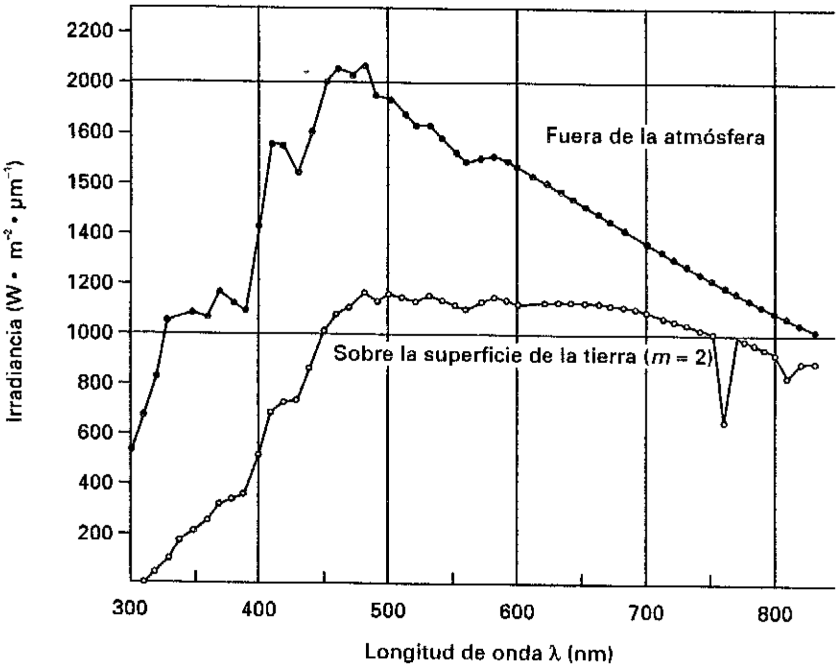

Figura 2-9. Datos estándares de la NASA de la irradiancia espectral del disco solar fuera de la atmósfera y sobre la superficie de la Tierra, para una masa de aire igual a 2 (según Wyszecki G. & Stiles W. S. 1982).

De cualquier forma se han puesto a punto métodos aproximados que han permitido caracterizar con bastante precisión al sol como fuente de energía radiante.

Fuera de la atmósfera, la radiación solar posee una temperatura de color que disminuye del centro a los bordes. En el centro la T_c = 6700 °K y para el disco en general es de 6200 °K. Ahora bien, como hemos mencionado, la atmósfera modifica mucho la distribución de energía. La figura 2-9 muestra el espectro solar antes y después de atravesar la atmósfera. En dicha figura, la irradiancia en la superficie de la Tierra se da para $m = 2$, donde m representa la *masa de aire*, y se define como la relación entre la longitud del camino recorrido por los rayos de luz en la atmósfera desde el sol al punto de observación terrestre y la longitud del camino recorrido para una hipotética posición del sol en el cenit. Luego $m = 2$ significa una altitud del sol de 30° sobre el horizonte. La figura 2-10 muestra diferentes distribuciones espectrales de la radiación solar en distintas situaciones.

Fuentes artificiales

Las fuentes artificiales pueden clasificarse en dos grandes grupos: fuentes térmicas y fuentes por descarga eléctrica.

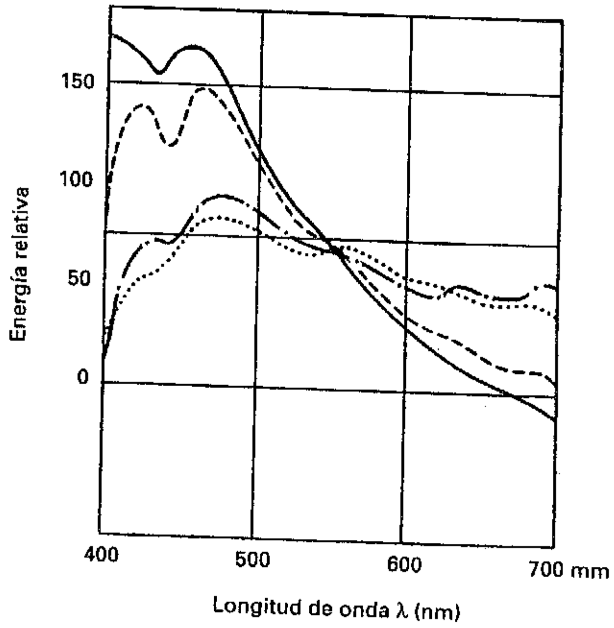

Figura 2-10. Diferentes distribuciones espectrales de la radiación solar para distintas situaciones (——— cielo del norte; ---- cielo cubierto; -.-.-. luz media solar; .... luz media solar más cielo).

Fuentes térmicas

Son cuerpos calientes los que emiten energía radiante con una distribución espectral continua, que depende del cuerpo en cuestión y de la temperatura. El cuerpo negro que hemos descrito anteriormente es una fuente térmica.

Las lámparas de incandescencia son fuentes térmicas basadas en el calentamiento de un filamento que normalmente es de tungsteno, debido a su elevado punto de fusión. Conforme la temperatura aumenta, mayor es la fracción de energía radiante que emite dentro del espectro visible y por consiguiente mayor es su rendimiento luminoso. Sin embargo, este hecho está limitado por la evaporación del filamento, que disminuye la vida de la lámpara. Se consigue reducir esta evaporación introduciendo un gas inerte en la ampolla de una lámpara en lugar de hacer el vacío, o bien añadiendo un compuesto halógeno. En la figura 2-11, puede verse un ejemplo de la irradiancia espectral de una lámpara de tungsteno, comparada con la del cuerpo negro.

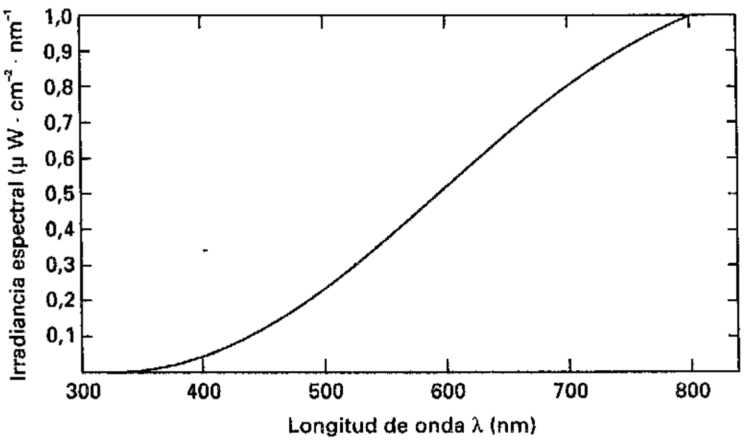

Figura 2-11. Irradiancia espectral de una típica lámpara de filamento de tungsteno (Tc = 2850 °K).

Fuentes por descarga eléctrica

a) *Tubos fluorescentes.* Estas fuentes consisten en un tubo que contiene un gas que se ioniza cuando la diferencia de potencial entre los electrodos colocados en los extremos del tubo alcanza un valor determinado. Los electrones liberados en la ionización excitan los átomos de mercurio dosificado en las paredes del tubo, y se emite una radiación ultravioleta que a su vez produce una emisión visible (fluorescencia) al actuar sobre diferentes sustancias adosadas también a las paredes del tubo. Según el tipo de sustancia se puede variar el espectro de la luz emitida (además se pueden hacer mezclas con ellas). En general, el espectro de emisión consiste en un espectro continuo (fluorescencia) sobre el que se destaca un espectro discontinuo (rayas visibles del mercurio).

b) *Lámparas espectrales.* De una manera general, una lámpara espectral consiste en un gas encerrado en una ampolla de vidrio. Los átomos de este gas son bombardeados por los electrones producidos en un cátodo incandescente y acelerados por una diferencia de potencial. Los átomos del gas excitados emiten una radiación característica cuando vuelven a su estado normal. El espectro de la radiación emitida dependerá obviamente del gas utilizado.

FILTROS OPTICOS

Hemos recordado hasta ahora las fuentes principales de iluminación, que se caracterizan normalmente por su espectro de emisión. Sin embargo, este espectro puede ser modificado mediante filtros. Así pues, un filtro óptico puede ser definido en general como un dispositivo que cambia selectivamente o no la distribución espectral de una fuente. Especificamos selectivamente o no porque puede ocurrir que el filtro no modifique la distribución espectral, pero sí absorba toda la radiación con independencia de λ (estos son los denominados filtros grises).

En general, los filtros ópticos pueden agruparse por su modo de actuar en filtros de absorción y filtros interferenciales.

Filtros de absorción

Un filtro de este tipo suele consistir en un vidrio tintado en su masa, un plástico coloreado o un líquido coloreado colocado en una cubeta transparente de caras paralelas. Estos filtros actúan como su propio nombre indica, absorbiendo parte del flujo radiante que incide sobre ellos. Si un flujo radiante P_e monocromático incide sobre un filtro de este tipo, parte de la energía será absorbida y transformada en calor, otra parte será reflejada y reenviada en la misma dirección incidente, y finalmente, la energía restante será transmitida por el filtro. Cada una de estas fracciones viene definida, respectivamente, por los factores de absorción (α_λ), reflexión (ρ_λ) y transmisión (τ_λ) espectral, que indican la cantidad de energía absorbida, reflejada y transmitida. Lógicamente estos factores, siempre tienen valores inferiores a la unidad y su suma es la unidad. Sin embargo, a un filtro se le suele caracterizar simplemente por lo que transmite, es decir, por el *factor de transmisión espectral* (τ_λ) y a menudo se sustituye este factor por el logaritmo decimal de su inversa, que se denomina *densidad óptica espectral* (D_λ):

$$D_\lambda = -\log \cdot \tau_\lambda \tag{47}$$

Es decir, un filtro de densidad 1 deja pasar la décima parte de la energía incidente.

Esta definición tiene la ventaja de que la densidad óptica total de varios filtros superpuestos es simplemente la suma de sus densidades ópticas respectivas.

Filtros interferenciales

Los filtros interferenciales suelen tener el mismo fundamento que los interferómetros Fabry-Perot. Recordemos que éstos consisten en dos láminas paralelas de plata o cualquier otro metal con un elevado factor de reflexión, separadas por un dieléctrico. Según el espesor efectivo del filtro, de una luz blanca incidente sólo transmitirá unas longitudes de onda muy determinadas. El espectro que surgirá será pues discontinuo y compuesto por una serie de bandas estrechas correspondientes a las longitudes de onda dadas por:

$$\lambda = 2d/m \tag{48}$$

donde d es la anchura efectiva del filtro (longitud del camino óptico en el dieléctrico más el camino equivalente al cambio de fase producido en la reflexión dieléctrico-plata) y m el orden de interferencia.

La anchura de banda viene dada por

$$\Delta\lambda = \lambda(1 - \rho)/\pi m\sqrt{\rho}$$

donde r es la reflectancia de la plata para la longitud de onda λ.

Dadas sus características, apenas se usan estos filtros en la iluminación corriente, pero en cambio se emplean mucho en laboratorios y como componentes en multitud de aparatos, sobre todo en los monocromadores.

FUENTES NORMALIZADAS CIE

Hemos mencionado que con un filtro o con combinaciones de filtros se puede modificar el espectro de emisión de una fuente. Asimismo se puede obtener un espectro concreto eligiendo cuidadosamente el gas que llena la ampolla en una lámpara de incandescencia o el tubo en una lámpara fluorescente. Es decir, es posible fabricar una fuente con unas características de emisión determinadas.

Debido a la necesidad de contar con fuentes patrones, fundamentales en colorimetría para la definición del observador colorimétrico de referencia, la CIE fijó las características de diversos tipos de fuentes que pueden ser obtenidas por los métodos indicados anteriormente. Las tres fuentes más utilizadas son conocidas como iluminantes A, C y D65. El A intenta imitar el espectro de una lámpara de incandescencia. El C y D65 son dos formas de caracterizar la luz del día. En un principio se empleó más el iluminante C, pero actualmente el más usado es el D65. Como en los cálculos colorimétricos no es necesario disponer físicamente de la fuente, se definen los iluminantes con los valores numéricos correspondientes a la distribución espectral de las fuentes patrón.

TABLA 2-3

Valores numéricos del reparto espectral relativo de energía, correspondientes a los iluminantes A, B, C y D_{65}

λ (nm)	A $S(\lambda)$	B $S(\lambda)$	C $S(\lambda)$	D_{65} $S(\lambda)$	λ (nm)	A $S(\lambda)$	B $S(\lambda)$	C $S(\lambda)$	D_{65} $S(\lambda)$
300	0,93			0,03	575	110,80	101,90	100,15	96,1
305	1,13			1,7	580	114,44	101,00	97,80	95,8
310	1,36			3,3	585	118,08	100,07	95,43	92,2
315	1,62			11,8	590	121,73	99,20	93,20	88,7
320	1,93	0,02	0,01	20,2	595	125,39	98,44	91,22	89,3
325	2,27	0,26	0,20	28,6	600	129,04	98,00	89,70	90,0
330	2,66	0,50	0,40	37,1	605	132,70	98,08	88,83	89,8
335	3,10	1,45	1,55	38,5	610	136,35	98,50	88,40	89,6
340	3,59	2,40	2,70	39,9	615	139,99	99,06	88,19	88,6
345	4,14	4,00	4,85	42,4	620	143,62	99,70	88,10	87,7
350	4,74	5,60	7,00	44,9	625	147,24	100,36	88,06	85,5
355	5,41	7,60	9,95	45,8	630	150,84	101,00	88,00	83,3
360	6,14	9,60	12,90	46,6	635	154,42	101,56	87,86	83,5
365	6,95	12,40	17,20	49,4	640	157,98	102,20	87,80	83,7
370	7,82	15,20	21,40	52,1	645	161,52	103,05	87,99	81,9
375	8,77	18,80	27,50	51,0	650	165,03	103,90	88,20	80,0
380	9,80	22,40	33,00	50,0	655	168,51	104,59	88,20	80,1
385	10,90	26,85	39,92	52,3	660	171,96	105,00	87,90	80,2
390	12,09	31,30	47,40	54,6	665	175,38	105,08	87,22	81,2
395	13,35	36,18	55,17	68,7	670	178,77	104,90	86,30	82,3
400	14,71	41,30	63,30	82,8	675	182,12	104,55	85,30	80,3
405	16,15	46,62	71,81	87,1	680	185,43	103,90	84,00	78,3
410	17,68	52,10	80,60	91,5	685	188,70	102,84	82,21	74,0
415	19,29	57,70	89,53	92,5	690	191,93	101,60	80,20	69,7
420	20,99	63,20	98,10	93,4	695	195,12	100,38	78,24	70,7
425	22,79	68,37	105,80	90,1	700	198,26	99,10	76,30	71,6
430	24,67	73,10	112,40	86,7	705	201,36	97,70	74,36	73,0
435	26,64	71,31	117,75	95,8	710	204,41	96,20	72,40	74,3
440	28,70	80,80	121,50	104,9	715	207,41	94,60	70,40	68,0
445	30,85	83,44	123,45	110,9	720	210,36	92,90	68,30	61,6
450	33,09	85,40	124,00	117,0	725	213,27	91,10	66,30	65,7
455	35,41	86,88	123,60	117,4	730	216,12	89,40	64,40	69,9
460	37,81	88,30	123,10	117,8	735	218,92	88,00	62,80	72,5
465	40,30	90,08	123,30	116,3	740	221,67	86,90	61,50	75,1
470	42,87	92,00	123,80	114,9	745	224,36	85,90	60,20	69,3
475	45,52	93,75	124,09	115,4	750	227,00	85,20	59,20	63,6
480	48,24	95,20	123,90	115,9	755	229,59	84,80	58,50	55,0
485	51,04	96,23	122,92	112,4	760	232,12	84,70	58,10	46,4
490	53,91	96,50	120,70	108,8	765	234,59	84,90	58,00	56,6
495	56,85	95,71	116,90	109,1	770	237,01	85,40	58,20	66,8
500	59,86	94,20	112,10	109,4	775	239,37			65,1
505	62,93	92,37	106,98	108,6	780	241,68			63,4
510	66,06	90,70	102,30	107,8	785	243,92			63,8
515	69,25	89,65	98,81	106,3	790	246,12		64,3	
520	72,50	89,50	96,90	104,8	795	248,25		61,9	
525	75,79	90,43	96,78	106,2	800	250,33			59,5
530	79,13	92,20	98,00	107,7	805	252,35			55,7
535	82,52	94,46	99,94	106,0	810	254,31			52,0
540	85,95	96,90	102,10	104,4	815	256,22			54,7
545	89,41	99,16	103,95	104,2	820	258,07			57,4
550	92,91	101,00	105,20	104,0	825	259,86			58,9
555	96,44	102,20	105,67	102,0	830	261,60			60,3
560	100,00	102,80	105,30	100,0					
565	103,58	102,92	104,11	98,2					
570	107,18	102,60	102,30	96,3					

En la figura 2-12 se representa el reparto espectral relativo de energía de estos tres iluminantes y en la tabla 2-3 se indican los valores numéricos de este reparto (incluido el iluminante B, que ya no se suele usar), necesarios, como veremos más adelante, en los cálculos colorimétricos.

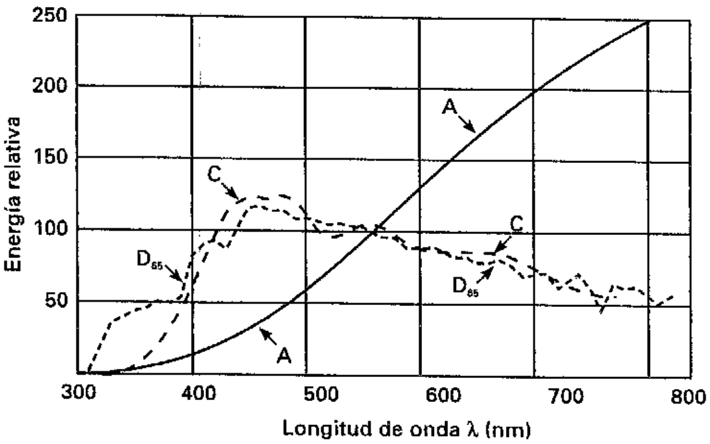

Figura 2-12. Distribución espectral relativa de energía de los iluminantes A, C y D65.

Fuente equienergética

En fotometría y colorimetría, además de las fuentes normalizadas CIE, se define la fuente equienergética como aquella que emite uniformemente a lo largo de todo el espectro (P_λ = *cte*). En la figura 2-13 se muestra un espectro equienergético correspondiente al hipotético caso de $P_\lambda = 1$.

Como hemos visto hasta ahora, la distribución espectral de una cantidad radiométrica se ha expresado siempre en términos de cantidades por unidad de *intervalos de longitud de onda*. Sin embargo, en algunos casos resulta ventajoso considerar las cantidades radiométricas por unidad de *intervalos de frecuencia*, ya que como sabemos es precisamente la frecuencia el parámetro fundamental de la energía radiante. Para convertir una distribución de energía radiante espectral basada en la longitud de onda en otra basada en la frecuencia, recuérdese que

$$\lambda = c\nu^{-1} \tag{49}$$

luego

$$d\lambda = -c\nu^{-2}\, d\nu \tag{50}$$

Sobre una región espectral $d\lambda$, la energía radiante puede expresarse como $P_\lambda\, d\lambda$, lo que en términos de frecuencias sería $-P_\nu\, d\nu$. El signo menos expresa la disminución de la frecuencia conforme aumenta la longitud de onda. Teniendo en cuenta (49) y (50), se deduce:

$$P_\nu = P_\lambda c \nu^{-2} = (1/c)\, P_\lambda \lambda^2 \tag{51}$$

expresión que muestra la relación entre P_λ y P_ν. En la figura 2-13 puede verse la representación de P_ν según (51), para el caso de $P_\lambda = 1$.

Finalmente, en algunos casos resulta útil conocer también el número de fotones (cuantos), N_ν, emitidos en la unidad de tiempo por intervalo de unidad de frecuencia. Entonces, ya que la energía de un fotón es $h\nu$,

$$N_\nu = P_\nu/h\nu$$

es decir,

$$N_\nu = (1/hc^2) P_\lambda \lambda^3 \tag{52}$$

En la figura 2-13 se representa N_ν, igualmente para el hipotético caso en que $P_\lambda = 1$.

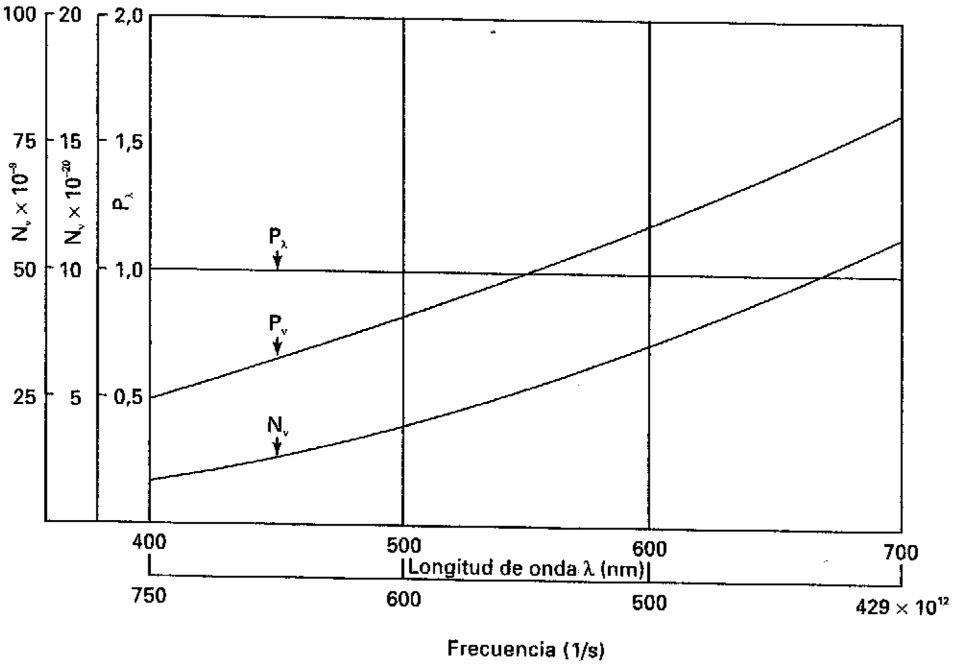

Figura 2-13. Número de fotones N_λ emitidos en la unidad de tiempo por intervalo de unidad de frecuencia ($P_\lambda = 1$) (según Wyszecki G. & Stiles W. S. 1982).