

GUÍA BÁSICA DE CONCEPTOS DE

RADIOMETRÍA Y FOTOMETRÍA

v.1.0

Prof.Dr. Emilio Gómez González

Departamento de Física Aplicada III
E.S.Ingenieros – Universidad de Sevilla

Esta *Guía Básica de Conceptos de Radiometría y Fotometría* se fundamenta en una traducción, modificada y revisada, de los epígrafes correspondientes en las obras citadas en las **Referencias** incluidas y ha sido específicamente adaptada al *Curso de Óptica* que imparte el autor en la asignatura de *Campos Electromagnéticos* de Ingeniería de Telecomunicación de la E.S.Ingenieros de la Universidad de Sevilla.

GUÍA BÁSICA DE CONCEPTOS DE

RADIOMETRÍA Y FOTOMETRÍA

Prof.Dr. Emilio Gómez González

Departamento de Física Aplicada III
E.S.Ingenieros – Universidad de Sevilla

NOTAS:

1. Debido a su utilización generalizada en los ámbitos científico y tecnológico, al expresar las definiciones, y en su caso acrónimos, de los diferentes términos, se ha mantenido, entre paréntesis y en letra cursiva, la denominación en idioma inglés.
2. Se recomienda encarecidamente la consulta de los materiales originales, citados en la sección **Referencias**. En cada epígrafe se indica entre corchetes, [], la fuente correspondiente.
3. Esta *Guía Básica de Conceptos de Radiometría y Fotometría* ha sido específicamente adaptada al Curso de Óptica que imparte el autor en la asignatura *Campos Electromagnéticos* de Ingeniería de Telecomunicación de la E.S.Ingenieros de la Universidad de Sevilla. Se recomienda su utilización combinada con los demás materiales y referencias de la asignatura.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

Radiometría y Fotometría	4
Radiancia espectral	5
Magnitudes radiométricas estándar	6
Definiciones básicas en radiometría	6
Valores típicos de algunas magnitudes radiométricas	9
Emisores Lambertianos	9
Relaciones entre las magnitudes radiométricas fundamentales	11
Ejemplos de aplicación	12
Ejemplo 1: Ángulo sólido subtendido por una lente desde su foco	12
Ejemplo 2: Medidor de radiancia	12
Temperatura de color. Ley de Stefan-Boltzmann, Ley de Wien y	
Ley de la radiación del cuerpo negro de Planck	13
Resumen de conceptos de radiometría	16
Transferencia radiativa	18
 Fotometría. Respuestas fotópica y escotópica	19
Magnitudes básicas en fotometría	21
Magnitudes fotométricas estándar	22
Valores típicos de algunas magnitudes fotométricas	23
Eficacia luminosa de radiación, $K_r (=K_M)$, eficacia luminosa	
de un sistema de iluminación (K_s), y la función V-lambda $V(\lambda)$	24
Niveles de iluminación.....	26
Fuentes luminosas <i>patrón</i> y fuentes reales	26
Balance de blancos en los sistemas electrónicos de captación de imagen	30
Registro de una imagen. Valor de exposición.	32
Cálculo de la exposición	34
Ejemplo 1: Realización de una fotografía de paisaje en un día de otoño	34
Ejemplo 2: Realización de una fotografía en un evento deportivo	34
Uso de fotómetros para el cálculo de la exposición	35
Uso de fotómetros para la medida del brillo de una escena	35
Iluminancia de una imagen	35
Resumen de conceptos de fotometría	36
Expresiones dimensionales de las magnitudes radiométricas y fotométricas	38
Factores de conversión entre unidades radiométricas y fotométricas	39
Referencias	41

Radiometría y Fotometría [1]

La **radiometría** describe la transferencia de energía (o energía por unidad de tiempo, potencia) desde una fuente a un detector, admitiendo la validez del modelo geométrico de trayectorias y la conservación de la energía a lo largo de un *tubo de rayos*. En consecuencia, los posibles efectos de interferencia y/o difracción no se consideran significativos. Cuando esta transferencia de energía del emisor al detector se normaliza a la respuesta espectral del ojo de un observador humano, se denomina **fotometría**. Las magnitudes radiométricas y fotométricas suelen diferenciarse utilizando los subíndices “e” (energía) para las primeras y “v” (visual) para las segundas. Las magnitudes relacionadas con los fotones se caracterizan por el subíndice “q”.

Históricamente, los dispositivos ópticos y, en particular las cámaras, se han diseñado para operar en la región visible del espectro. Para estos sistemas resulta razonable especificar su respuesta en términos de las unidades fotométricas pero cuando se utilizan dispositivos sensores con una respuesta espectral más amplia (por ejemplo, fotodetectores de silicio) el uso de las magnitudes fotométricas puede resultar confuso e incluso inducir a errores.

Por otra parte, la relación entre la “luminosidad” de una escena visualizada y la “luminosidad” de la correspondiente imagen registrada es, obviamente, uno de los parámetros fundamentales de los sistemas ópticos de formación y/o registro de imagen. Esta relación incluye dos características diferentes pero interrelacionadas:

- la amplitud de la señal de salida, normalmente, caracterizada por el voltaje correspondiente a cada valor de la intensidad luminosa incidente en el sensor y
- la relación entre las curvas espectrales de respuesta del sensor y del ojo de un observador humano

Puesto que las escenas en el espectro visible y en el infrarrojo cercano están habitualmente iluminadas por fuente naturales (sol, luna, estrellas) o artificiales que afectan tanto al objeto de interés en la imagen como al fondo de la misma, los elementos de interés pueden ser detectados únicamente cuando poseen diferencias de reflectancia con su entorno.

La Comisión Internacional de Iluminación (**Commission Internationale de l’Eclairage, CIE**, *International Commission on Illumination*) define las siguiente franjas espectrales en el rango óptico:

Nombre	Rango de Longitudes de Onda
UV-C	100 nm – 280 nm
UV-B	280 nm – 315 nm
UV-A	315 nm – 400 nm
VIS (visible)	(360-400) nm hasta (760-800) nm
IR-A (infrarrojo cercano, <i>near IR, NIR</i>)	780 nm – 1400 nm
IR-B	1.4 μ m – 3.0 μ m
IR-C (infrarrojo lejano, <i>far IR</i>)	3.0 μ m – 1.0 mm

Radiancia espectral [1]

La magnitud básica a partir de la cual se derivan todas las otras magnitudes radiométricas es la **radiancia espectral** (*spectral radiance*, ó *sterance*, L_e), en la que “se incluyen” los conceptos básicos de “área” y “ángulo sólido” que son necesarios para calcular el flujo radiante que incide en un sistema.

La radiancia espectral L_e es así la cantidad de flujo radiante (Φ , energía por unidad de tiempo, vatios, W) por unidad de longitud de onda (micras, μm) radiada (emitida) en un cono por unidad de ángulo sólido (estereoradián, *steradians*, sr) por una fuente cuya área (A_s) se mide en metros.

$$L_e = \frac{\partial^2 \Phi(\lambda)}{\partial A_s \partial \Omega} \quad \frac{W}{m^2 \mu m \text{ sr}}$$

De manera análoga, se define la **radiancia espectral fotónica**, L_q , como la radiancia espectral expresada en [fotones/(s·m²·μm·sr)]. Las magnitudes L_e y L_q son invariantes en cualquier sistema óptico que no tenga absorción o reflexiones, permaneciendo constantes en la propagación de la energía por el sistema.

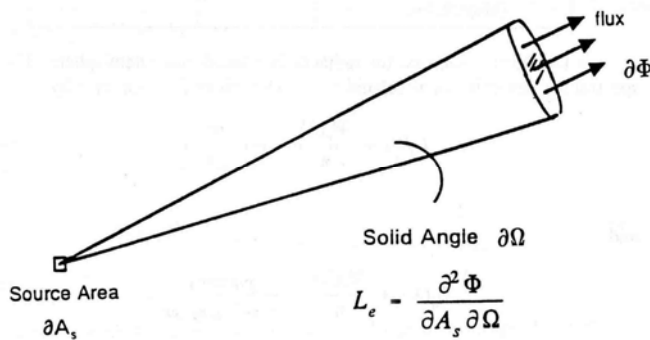


Figura 1. Radiancia espectral.

Magnitudes radiométricas estándar [1]

Las **magnitudes radiométricas estándar** son las siguientes:

Magnitud	Símbolo	Unidad	Magnitud correspondiente en Fotometría
Energía Radiante	Q_e	Julio (J)	
<u>Flujo Radiante*</u> ó potencia radiante	Φ_e	Vatio (W)	<u>Flujo luminoso</u>
<u>Intensidad Radiante*</u> Espectral	I_e	$W/(m^2 \mu m \text{ sr})$	<u>Intensidad luminosa</u>
Exitancia Radiante Espectral ó Emitancia Radiante (desde una fuente)	M_e	$W/(m^2 \mu m)$	
Incidencia Radiante Espectral ó Irradiancia* (sobre un detector)	E_e	$W/(m^2 \mu m)$	<u>Iluminancia</u>
Radiancia Espectral ó Radiancia* ó Esterancia Radiante Espectral	L_e	$W/(m^2 \mu m \text{ sr})$	<u>Luminancia</u>

Se subrayan las 4 magnitudes fundamentales en radiometría y fotometría.

Cuando se considera la variación de estas magnitudes en un cierto intervalo de longitudes de onda, $\Delta\lambda$, y se toma el límite de $\Delta\lambda \rightarrow 0$, se obtiene la magnitud “espectral” correspondiente (equivalente a considerar la magnitud correspondiente en un haz monocromático de radiación), mientras que cuando estas magnitudes (*) se integran en el rango óptico de longitudes de onda, pierden el carácter de magnitud “espectral”.

Definiciones básicas en radiometría [3]

Energía radiante, Q: es la cantidad de energía que / incide sobre / se propaga a través / es emitida desde / una superficie de área dada en un período de tiempo dado. En principio, se incluyen todas las longitudes de onda contenidas en la radiación. Si es preciso, debe indicarse explícitamente el rango de $\Delta\lambda$ considerado. Se mide en Julios ($[J] = kg \cdot m^2/s$). La energía radiante es interesante en las aplicaciones que usan pulsos de energía electromagnética en las que no sólo es necesario conocer el flujo instantáneo de radiación sino la cantidad total de energía aportada en un pulso de duración temporal especificada, como en las aplicaciones con láseres pulsados.

Energía radiante espectral, Q_λ : es la energía radiante por intervalo unitario de longitud de onda. Se mide en J/nm o J/ μ m.

$$Q_\lambda = \frac{dQ}{d\lambda}$$

Flujo (potencia) radiante, Φ : es el flujo de energía radiante por unidad de tiempo. Se mide en vatios (W, 1 W = 1 J/s).

$$\Phi = \frac{dQ}{dt}$$

No obstante, cuando la radiación incide en un dispositivo que produce una señal (voltaje u otra) proporcional a la radiación incidente, la magnitud importante es la “cantidad total de flujo” en vez del flujo por unidad de área, por lo que, en estos casos, resulta necesario especificar la extensión espacial del campo de radiación cuyo flujo se está considerando.

Flujo (potencia) radiante espectral, Φ_λ : es el flujo de energía radiante por unidad de tiempo y unidad de longitud de onda. Se mide en W/nm.

$$\Phi_\lambda = \Phi_\lambda(\lambda) = \frac{dQ_\lambda}{dt} = \frac{d\Phi}{d\lambda}$$

La distribución espectral del flujo radiante es, como veremos, muy importante para la mayoría de las aplicaciones, incluyendo la caracterización de la respuesta de un detector en función de la energía incidente.

Irradiancia, E : es la densidad de flujo radiante por unidad de superficie que / incidente sobre / atraviesa / emerge / de un punto en la superficie especificada. Deben incluirse todas las direcciones comprendidas en el ángulo sólido hemisférico por encima o por debajo del punto en la superficie. Se mide en W/m².

$$E = \frac{d\Phi}{ds_o}$$

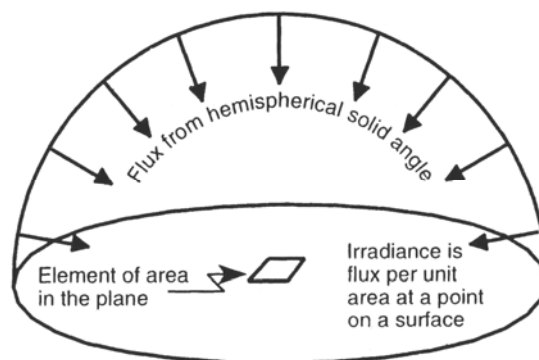


Figura 2. La irradiancia se refiere al flujo radiante por unidad de área incidente en un punto de una superficie procedente de un ángulo sólido hemisférico

La irradiancia saliente de una superficie se denomina “**exitancia**”, M , y tiene las mismas unidades y expresión para su definición. La exitancia también se ha denominado, en el pasado, **emitancia**, aunque este término se aplica en la actualidad como equivalente a la **emisividad**, propiedad de la superficie del elemento emisor.

La irradiancia es, por tanto, función de la posición específica del punto considerado sobre la superficie que, en general, debe indicarse. Cuando sea conocido o se pueda asumir que la irradiancia es constante en la zona considerada de la superficie, puede omitirse la especificación del punto considerado. La irradiancia es la magnitud más importante para caracterizar la incidencia o emisión de radiación por una superficie cuando no es necesario detallar la distribución angular o direccional de la radiación.

Intensidad radiante, I : es la densidad de flujo radiante por unidad de ángulo sólido / incidente en / atravesando / emitido por / un punto en el espacio propagándose en una dirección específica. Se mide en W/sr.

$$I = \frac{d\Phi}{d\omega}$$

La intensidad radiante es una función de la dirección hacia / desde el punto para el cual se define, siendo necesario indicar explícitamente el punto y la dirección considerados. Para la mayoría de las fuentes luminosas reales es una función fuertemente dependiente de la dirección y es una magnitud muy útil para caracterizar fuentes puntuales o muy pequeñas comparadas con la distancia desde la fuente al observador o al detector.

Intensidad radiante espectral, I_λ : es el flujo radiante por unidad de ángulo sólido y por unidad de longitud de onda / incidente en / atravesando / emitido por / un punto en el espacio propagándose en una dirección específica. Se mide en W/(sr·nm).

$$I_\lambda = \frac{dI}{d\lambda} = \frac{d^2Q_\lambda}{d\omega dt} = \frac{d^2\Phi}{d\omega d\lambda}$$

Radiancia, L : es la densidad de flujo radiante por unidad de área y de ángulo sólido / incidente en / atravesando / emitido por / un elemento de superficie centrado en un punto en el espacio propagándose en una dirección específica. Se mide en W/(m²·sr). Su ecuación de definición es

$$L = \frac{d^2\Phi}{d\omega ds} = \frac{d^2\Phi}{d\omega ds_0 \cos \theta}$$

donde $ds = ds_0 \cos \theta$ es una magnitud denominada “**área proyectada**” (**projected area**) que es el área de la proyección de la superficie elemental ds_0 (de la superficie que contiene al punto) sobre un plano perpendicular a la dirección de propagación

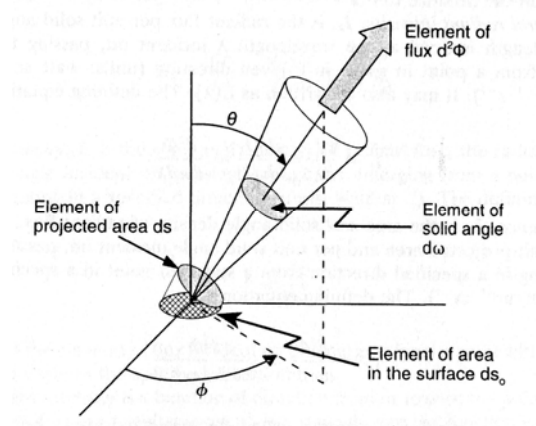


Figura 3. Radiancia

La radiancia se puede entender como la intensidad por unidad de área proyectada o como la irradiancia por unidad de ángulo sólido desde el área proyectada. La radiancia es una función de la posición y la dirección. Para la mayoría de las fuentes luminosas reales, esta función es fuertemente dependiente de la dirección, siendo la magnitud de uso más general para caracterizar la propagación de radiación por el espacio o a través de medios y materiales transparentes o semitransparentes. El flujo radiante y la irradiancia pueden obtenerse a partir de la radiancia mediante el proceso matemático de integración sobre una superficie de área finita y/o sobre un ángulo sólido finito. Al ser la radiancia una función tanto de la posición sobre una superficie definida como de la dirección considerada desde ella, es muy importante expresar con claridad la superficie considerada, el punto sobre la misma y la dirección desde ella.

Radiancia espectral, L_λ : es la densidad espectral de radiancia, definida como

$$L_\lambda = \frac{dL}{d\lambda} = \frac{d^3\Phi}{d\omega ds_o \cos\theta d\lambda}$$

y medida en $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr} \cdot \text{nm})$.

Valores típicos de algunas magnitudes radiométricas [3]

Magnitud	Valor
Flujo radiante total de una bombilla incandescente de tungsteno, de 100 W	82 W
Flujo radiante de salida de un láser de He-Ne de media potencia	5 mW
Flujo radiante de una lámpara fluorescente de 40 W	23.2 W
Irradiancia solar fuera de la atmósfera, en posición media de la órbita terrestre	1367 W/m^2
Irradiancia solar directa en la superficie de la tierra, a mediodía, en el sudeste de USA, en invierno, cielo claro	852 W/m^2
Radiancia del sol en su superficie	$2.3 \cdot 10^7 \text{ W m}^{-2} \text{ sr}^{-1}$
Radiancia aparente del sol desde la superficie de la tierra	$1.4 \cdot 10^7 \text{ W m}^{-2} \text{ sr}^{-1}$

Emisores Lambertianos [3]

Cualquier superficie, real o imaginaria, cuya radiancia sea independiente de la dirección considerada se denomina **emisor** (o **radiador**) **lambertiano** puesto que verifica la Ley de Lambert del Coseno: la irradiancia (o exitancia) desde un elemento cualquiera de área sobre la superficie varía como el coseno del ángulo θ entre la dirección considerada y la dirección de la normal a la superficie

$$E(\theta) = E(0) \cos\theta$$

y la radiancia es, por tanto, independiente de la dirección en que se evalúa. Esta “ley del coseno” se puede considerar en varios sentidos:

- un emisor lambertiano puede entenderse como una “ventana” en un flujo radiante isotrópico
- si consideramos un haz uniforme y colimado incidente sobre una superficie plana, la radiación se distribuye sobre la superficie (sobre la que incide) según el ángulo de incidencia: como se muestra en la figura, el rectángulo de longitud L y anchura W recibe el flujo radiante del haz de irradiancia E_0 cuya dirección de incidencia forma un ángulo θ

con la normal a la superficie. Si calculamos la irradiancia media sobre la superficie, teniendo en cuenta que el flujo incidente es el mismo

$$\Phi = \Phi_o \rightarrow E A = E_o A_o \rightarrow E = E_o \cos \theta$$

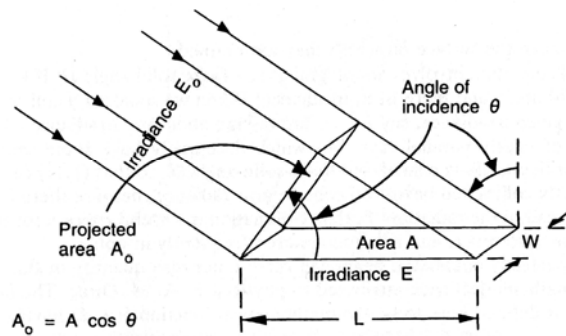


Figura 4. Geometría de un emisor lambertiano.

Así, al aumentar el ángulo que el haz incidente forma con la normal a la superficie sobre la que incide, la irradiancia medida sobre la superficie disminuye en el factor coseno.

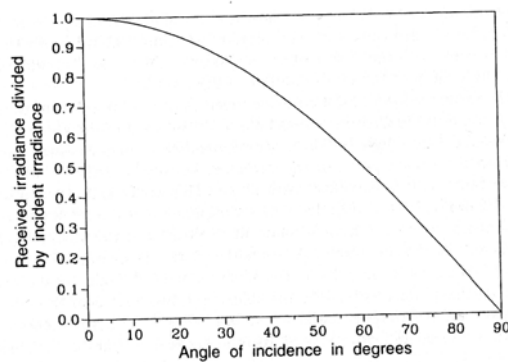


Figura 5. Fracción de irradiancia medida sobre una superficie en función del ángulo.

Relaciones entre las magnitudes radiométricas fundamentales

Es importante notar que mientras la radiancia (L) describe la distribución angular de la radiación, la irradiancia (E) suma todas las contribuciones angulares contenidas en el ángulo sólido considerado. Para un punto en la superficie considerada se tiene así que

$$E = \int_{\Omega} L(\theta, \phi) \cos \theta d\omega$$

o, en forma diferencial, la irradiancia elemental dE por unidad de ángulo sólido $d\omega$

$$dE = L \cos \theta d\omega$$

En la expresión anterior se aprecia claramente que si “no hay” ángulo sólido ($\Omega=0$) entonces no está definida la irradiancia. Así, cuando se considera un **haz colimado ideal**, no tiene irradiancia definida, pero cuando se considera un **haz colimado real** (por ejemplo, emitido por un láser) siempre existe un cierto grado de divergencia angular, aún cuando puede ser muy pequeño, que implica la existencia de un cierto ángulo sólido y, por tanto, la existencia y validez de la definición de irradiancia del mismo.

Por otra parte, la relación entre la radiancia, irradiancia y la intensidad radiante se obtiene sustituyendo la expresión diferencial

$$d^2\Phi/d\omega = dI$$

en la definición de radiancia L , de manera que

$$L = \frac{dI}{ds_o \cos \theta} \rightarrow I = \int_{s_o} L \cos \theta ds_o$$

No obstante, el concepto de **intensidad** se suele aplicar únicamente a fuentes puntuales, es decir, la superficie s_o tiene un valor mucho menor que la distancia desde la misma al punto donde se evalúa la intensidad. Así, teniendo en cuenta la definición

$$d\Phi = I d\omega$$

y tomando el ángulo sólido subtendido como

$$d\omega = da_o/R^2$$

podemos escribir la relación entre la irradiancia E_o a una distancia R de una fuente puntual de intensidad I , en una superficie perpendicular a la dirección desde la fuente puntual a la superficie en la que se mide como

$$E_o = \frac{I}{R^2}$$

Por último, la relación entre la radiancia L y el flujo Φ se escribe como

$$\Phi = \int_{s_o} \int_{\Omega} L(u, v, \theta, \phi) \cos \theta d\omega ds_o$$

siendo (u, v) unas coordenadas generalizadas en la superficie de interés y (θ, ϕ) las coordenadas que definen la dirección considerada.

Para las fuentes emisoras lambertianas, la radiancia es emitida en una semiesfera y, por tanto, la exitancia radiante espectral y la radiancia se relacionan por

$$L_e = \frac{M_e(\lambda)}{\pi} \quad \frac{W}{m^2 \mu m sr} \quad y$$

$$L_q = \frac{M_q(\lambda)}{\pi} \quad \frac{\text{fotones}}{s m^2 \mu m sr}$$

Ejemplos de aplicación:

Ejemplo 1: Ángulo sólido subtendido por una lente desde su foco.

Obtener la relación entre el ángulo sólido Ω subtendido por un círculo C de radio r situado a una distancia f de un punto P (en un plano perpendicular a la dirección que une el punto con el centro del círculo) y el semiángulo α del cono definido por P y C.

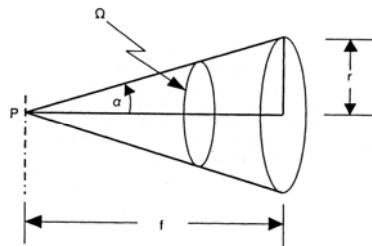


Figura 6. Geometría del ángulo sólido subtendido por el círculo C desde P.

La solución es $\Omega = 2 \pi (1 - \cos \alpha)$

Este resultado es muy importante porque corresponde a una situación equivalente a una lente radialmente simétrica con una apertura circular centrada (en el eje) cuyo radio subtende el ángulo α respecto al eje de la lente en su punto focal.

Ejemplo 2: Medidor de radiancia

El flujo radiante recibido en un detector D de área A_d , situado en un extremo de un tubo negro (de paredes perfectamente absorbentes) de longitud X y sección A_a , apuntado hacia un emisor plano situado a una distancia R del tubo, es Φ_d . Suponiendo que $A_d \ll X^2$, $A_a \ll X^2$, $A_a \ll R^2$, obtener la radiancia media del emisor. Este esquema corresponde a los **medidores de radiancia** usados habitualmente.

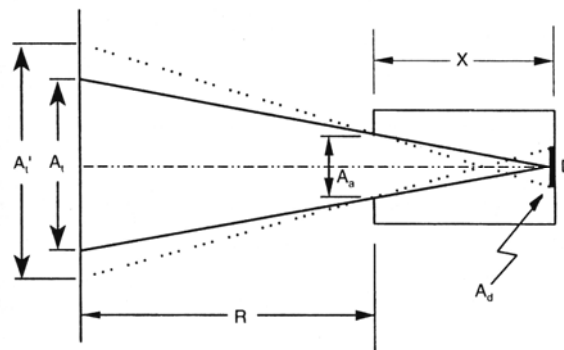


Figura 7. Geometría de un medidor de radiancia.

Dividiendo el flujo Φ_d entre el área A_d del detector y el ángulo sólido del área de la apertura de entrada A_a en el centro del detector, tenemos la radiancia media en la apertura, estando calculado este valor medio sobre el ángulo sólido subtendido por el centro del detector, denominado **campo de visión** (*field of view*) desde el centro del detector:

$$L = \frac{\Phi_d}{A_d \frac{A_a}{X^2}} = \frac{\Phi_d X^2}{A_d A_a}$$

donde se ha utilizado que el área de la esfera de radio X limitada por la apertura circular de detector es, en la aproximación de ángulo pequeño considerada, igual al área plana de la apertura A_a .

Es interesante señalar que el área del campo de visión desde el centro del detector, denominado **área objetivo** (*target area*) es el A_t indicado en la figura. Sin embargo, el **área total “vista por el detector”** es $A'_t > A_t$. El concepto de *área objetivo* es especialmente importante porque es el área “vista” por cada punto del detector (en las condiciones enunciadas de “detector pequeño”) y, por tanto, es la que debe tenerse en cuenta en los procesos de calibración, mientras que al considerar las medidas dadas por el detector debe tenerse en cuenta el *área total* subtendida por el mismo.

Temperatura de color. Ley de Stefan-Boltzmann, Ley de Wien y Ley de la radiación del cuerpo negro de Planck [1, 3]

Todos los cuerpos que se encuentran a temperatura superior a la del cero absoluto emiten radiación, siendo su emisión mayor mientras más calientes se encuentran. La agitación constante de átomos y moléculas implica el movimiento –y aceleración– de las cargas eléctricas constitutivas de los mismos y, en consecuencia, la emisión de radiación electromagnética en determinadas franjas del espectro.

El flujo radiante total emitido por la superficie de un objeto que se encuentra a temperatura T está dado por la **ley de Stefan-Boltzmann**:

$$M_{cn} = \sigma T^4$$

donde M_{cn} es la exitancia (o irradiancia) “que surge” de la superficie del cuerpo en el vacío, σ es la constante de Stefan-Boltzmann y T es la temperatura absoluta del cuerpo emisor. Si expresamos σ en el SI

$$\sigma = 5.67032 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$$

entonces las unidades para M_{cn} son W/m^2 .

La relación entre la energía emitida (por radiación) por la superficie de los cuerpos y la temperatura a la que éstos se encuentran fue estudiada, principalmente, por Max Planck. Esta relación se caracteriza por una representación gráfica de la potencia (energía por unidad de tiempo) radiada (W_λ) por unidad de superficie del emisor y por unidad de longitud de onda en función de la longitud de onda. Esta curva, denominada “**curva de radiación**” cambia según la temperatura a que se encuentre el cuerpo emisor y, en general, tiene un máximo que indica la longitud de onda en la que el emisor emite la máxima energía por unidad de tiempo. Un cuerpo emisor es un “radiador ideal” si tiene una curva de radiación suave, para todas las longitudes de onda como la que se muestra en la Figura 2. Un emisor de este tipo se denomina también “**cuerpo negro (cn)**” para enfatizar que, cuando están fríos, tienen color negro. Así, son también absorbentes perfectos.

Aplicando la expresión anterior, vemos cómo un cuerpo negro a 27°C ($T=300\text{K}$) emite 460 W/m^2 mientras que a 100°C su emisión aumenta a 1097 W/m^2 .

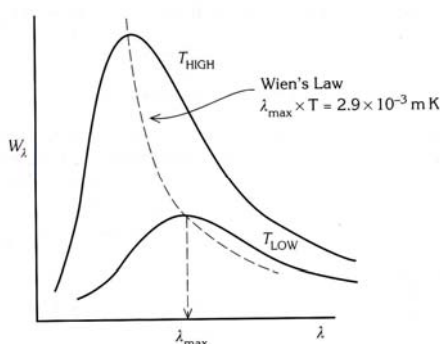


Figura 8. Curva de emisión de radiación de un cuerpo negro

Mientras mayor es la temperatura a la que se encuentra la superficie emisora, mayor es la energía radiada a cada longitud de onda, siendo esta diferencia más apreciable en las longitudes de onda cortas. La **ley de Wien** indica que la longitud de onda a la que tiene lugar la máxima emisión de radiación (λ_{max}) es proporcional a $1/T$, disminuyendo cuando la temperatura del cuerpo aumenta.

El área comprendida bajo la curva correspondiente a una temperatura dada es el valor de la potencia total radiada por unidad de área del cuerpo emisor, para todas las longitudes de onda. La **ley de Stefan-Boltzmann** anteriormente enunciada nos indica que esta área aumenta en proporción a T^4 .

Por otra parte, se puede demostrar que la distribución angular de la radiancia emitida por un cuerpo negro es constante, es decir, la radiancia es independiente de la dirección, siendo, por tanto, una superficie lambertiana. En consecuencia, la relación entre la radiancia espectral de un cuerpo negro $L_{\text{cn},\lambda}$ y su exitancia espectral $M_{\text{cn},\lambda}$ está dada por

$$M_{\text{cn},\lambda} = \pi L_{\text{cn},\lambda}$$

Cuando un cuerpo emite luz, se denomina **temperatura de color del emisor** a la temperatura T de un cuerpo negro que emitiera radiación con una curva espectral (curva de radiación) similar a

la emitida por el cuerpo. Es importante destacar que, aún estando obviamente relacionadas, la **temperatura de color de un emisor no es la temperatura de funcionamiento** del mismo. El conocimiento de la temperatura de color de un emisor de luz es importante porque, en general, para registrar una imagen interesa utilizar sistemas sensibles a la luz, tanto películas fotográficas con un producto químico sensible como sensores electrónicos con un semiconductor fotosensible, cuya curva de respuesta espectral se adapte lo mejor posible al iluminante utilizado.

De una forma más exacta, la exitancia radiante espectral de una fuente “cuerpo negro” ideal cuya temperatura absoluta es T (Kelvin) se describe por la ley de la radiación del cuerpo negro de Planck

$$M_e(\lambda, T) = \frac{c_1}{\lambda^5} \left(\frac{1}{e^{(c_2/\lambda T)} - 1} \right) \quad \frac{W}{m^2 \mu m}$$

donde las constantes radiativas son

$$c_1 = 3.7418 \cdot 10^8 \text{ (W } \mu m^4 / m^2)$$

$$c_2 = 1.4388 \cdot 10^4 \text{ (} \mu m \text{ K)}$$

λ es la longitud de onda expresada en μm y el valor de T es la **temperatura de color**. Las correspondientes magnitudes fotónicas se obtienen dividiendo M_e por la energía de un fotón ($E_f = hc/\lambda$).

Las Figuras 2 y 3 muestran la dependencia de la exitancia radiante espectral en ejes logarítmico y lineal. Este último resulta de interpretación más fácil porque las respuestas de los fotodetectores suelen ser lineales con la energía incidente. Como se puede apreciar, cada curva tiene un máximo en un valor de la longitud de onda (λ_{peak}).

La **ley de desplazamiento de Wien** nos dice que

$$\lambda_{peak} T = 2898 \mu m \text{ K} = 2.9 \cdot 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{K}$$

y, por tanto, una fuente de energía debe tener una temperatura absoluta de, al menos, 700 K para poder ser percibida por el ojo humano.

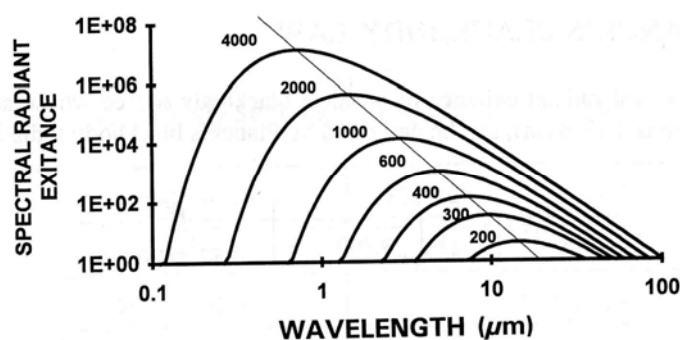


Figura 9. Exitancia Radiante Espectral (ó Emitancia Radiante) de Planck (en $W/(m^2 \mu m)$) en ejes logarítmicos. La línea indicada corresponde a la *ley de desplazamiento de Wien*.

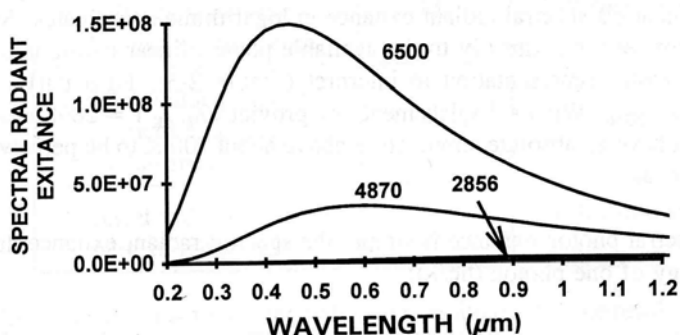


Figura 10. Exitancia Radiante Espectral (ó Emitancia Radiante) de Planck (en $W/(m^2 \mu m)$) en ejes lineales para algunas de las fuentes emisoras habitualmente utilizadas para caracterizar los CCD. Las longitudes de onda de los máximos para cada temperatura de color son los siguientes: 1.01 μm para 2856 K, 0.60 μm para 4870 K, 0.45 μm para 6500 K.

Resumen de conceptos de Radiometría [4]

- La Radiometría
 - o caracteriza la propagación de la energía radiante a través de un sistema óptico
 - o “tiene en cuenta” la luz de cualquier longitud de onda
 - o utiliza como unidad básica el vatio (W)
 - o debe tener en cuenta las características espectrales del sistema óptico y, específicamente,
 - el espectro de emisión de la fuente
 - las características de transmisión
 - la respuesta del detector
- Las magnitudes radiométricas más importantes son

Magnitud	Símbolo	Unidad	Significado
Energía	Q	J	
Flujo	Φ	W	Potencia
Intensidad	I	W/sr	Potencia por unidad de ángulo sólido
Irradiancia	E	W/m^2	Potencia por unidad de área (incidente)
Exitancia	M	W/m^2	Potencia por unidad de área (emitida)
Radiancia	L	$W/(m^2 sr)$	Potencia por unidad de área proyectada por unidad de ángulo sólido

- En una formulación simplificada, se consideran objetos e imágenes en el eje óptico del sistema, con orientación perpendicular al mismo. Con estas condiciones, el área proyectada tiene el mismo valor del área.
- El ángulo sólido de un cono recto circular es

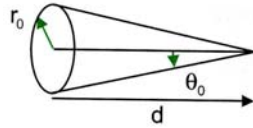


Figura 11. Geometría del ángulo sólido de un cono recto circular.

$$\Omega = 2\pi (1 - \cos \theta_0) \approx \frac{\pi r_0^2}{d^2} \approx \pi \theta_0^2$$

- La exitancia y la irradiancia se relacionan por la reflectancia ρ de la superficie. Según investigaciones en el campo de la fotografía, para una escena típica (promedio), $\rho \approx 18 \%$,
 $M = \rho E$

- Un emisor lambertiano es una superficie perfectamente difusora cuya
 - o radiancia es constante
 $L = \text{cte}$
 - o intensidad disminuye con el tamaño aparente (área proyectada) de la fuente (Ley de Lambert)
 $I = I_0 \cos \theta$

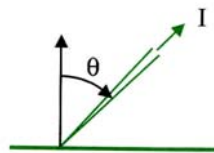


Figura 12. Intensidad emitida por un emisor lambertiano.

- o exitancia se relaciona con su radiancia por un factor π

$$M = \pi L$$

$$\pi L = \rho E$$

En la actualidad, se reserva el término **actinometría** para la caracterización energética de los haces luminosos en función del número total de fotones o el flujo de fotones (fotones por segundo) relacionados con el proceso analizado: como el cuanto de energía (fotón) de un haz de frecuencia f está dado por $\Delta Q = hf$, si se considera un haz monocromático propagándose en el vacío, cuyo flujo radiante es Φ vatios, el número de fotones por segundo N_λ asociado a este haz será, expresando la longitud de onda λ en nanómetros:

$$N_\lambda = \frac{\Phi}{\Delta Q} = \frac{\lambda \Phi}{hc} = 5.034 \cdot 10^{15} \lambda \Phi$$

Transferencia Radiativa

- La transferencia radiativa determina la cantidad de luz de un objeto que llega a la imagen

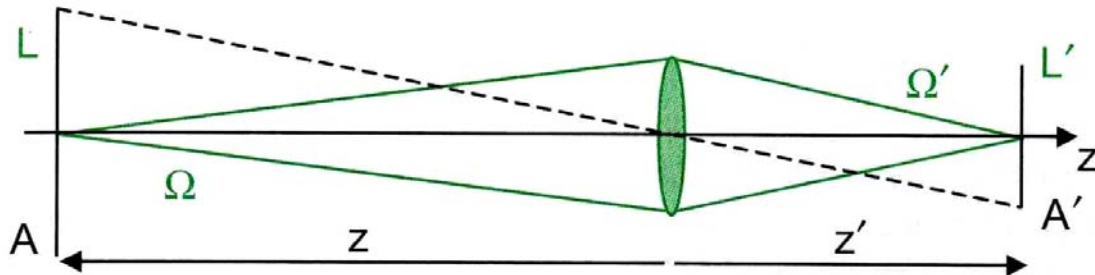


Figura 13. Geometría de la transferencia radiativa.

- En el aire, la radiancia y el producto $A\Omega$ o **throughput** se conservan, y el flujo incidente en la lente, Φ , es transferido a la superficie de la lente (área imagen) A' :

$$\begin{aligned} L &= L' \\ A \Omega &= A' \Omega' \\ \Phi &= L A \Omega = L' A' \Omega' \end{aligned} \qquad m^2 = A'/A = (z'/z)^2$$

- La irradiancia en el plano imagen E' es

$$E' = \frac{\pi L}{4(1-m^2)(f/\#)^2} = \frac{\pi L}{4(f/\#_w)^2} = \pi L (AN)^2$$

Esta ecuación se denomina **ecuación de la cámara** y se obtiene admitiendo

- un objeto lambertiano en el eje
- ángulos pequeños respecto al eje del sistema
- planos objeto e imagen perpendiculares al eje óptico. Si se incluyen los factores de oblicuidad asociados con objetos fuera del eje se obtiene la “ley del coseno a la cuarta”, que establece que la irradiancia decae como el la cuarta potencia del coseno del ángulo del campo.
- la dependencia espectral también se puede incorporar a estos resultados
- el producto de la irradiancia en el plano imagen E' por el tiempo de exposición (Δt) se denomina **exposición**, H , y se mide en (J/m^2)

$$H = E' \Delta t$$

- La **constante media solar** es, aproximadamente,
 - o 1386 W/m² fuera de la atmósfera
 - o 1000 W/m² (irradiancia sobre la superficie)
- En el caso genérico de un medio con índice de refracción $n > 1$, los invariante son el **throughput básico**, $n^2 A \Omega$, y la **radiancia básica** L/n^2 . Como el *throughput* se basa en áreas, el *throughput* básico es proporcional al cuadrado del **invariante de Lagrange**, $\mathcal{K}$,

$$n^2 A \Omega = \pi^2 \mathcal{K}^2$$

Fotometría. Respuestas fotópica y escotópica [1]

La fotometría describe la transferencia radiativa de una fuente a un detector cuando las unidades de radiación han sido normalizadas a la respuesta (sensibilidad) espectral del ojo humano. Esta sensibilidad espectral se caracteriza por una magnitud denominada **respuesta relativa**, $V(\lambda)$, cuya dependencia espectral (con de la longitud de onda) cambia según las condiciones de luminosidad:

- en condiciones de **alta luminosidad (luz de día)**, niveles superiores a $5 \cdot 10^{-2}$ lux), se denomina **curva de respuesta fotópica (photopic response)**. Está determinada por la respuesta de las células tipo conos de la retina y es una curva cuyo máximo se encuentra en $\lambda \approx 0.55 \mu\text{m} \approx 550 \text{ nm}$ (correspondiente, aproximadamente, al pico de emisión del sol)
- en condiciones de **baja luminosidad (nocturna)**, niveles inferiores a $5 \cdot 10^{-3}$ lux), se denomina **curva de respuesta escotópica (scotopic response)**. Está determinada por la respuesta de las células tipo bastones de la retina y es una curva cuyo máximo se encuentra en $\lambda \approx 0.505 \mu\text{m} \approx 505 \text{ nm}$ (desplazado hacia longitudes de onda menores)
- en un amplio rango de condiciones intermedias, ambos receptores (conos y bastones) responden a la luz incidente, denominándose **respuesta mesópica (mesopic response)**

En general, salvo que se especifiquen otras condiciones, las prestaciones de los dispositivos ópticos se evalúan en condiciones de visión fotópica.

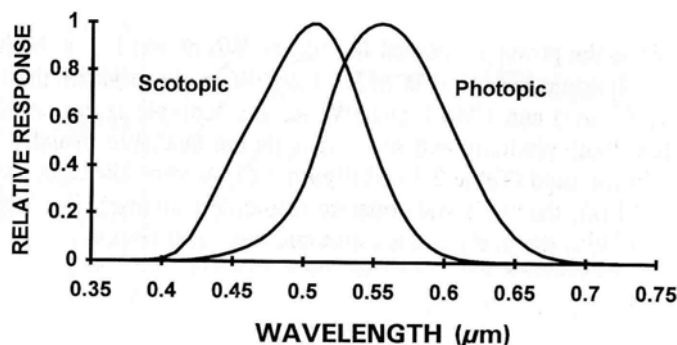


Figura 14. Curvas de respuesta relativas fotópica y escotópica del ojo humano.

PHOTOPIC and SCOTOPIC EYE RESPONSE

Wavelength nm	Photopic $V(\lambda)$	Scotopic $V'(\lambda)$	Wavelength nm	Photopic $V(\lambda)$	Scotopic $V'(\lambda)$
380		0.00059	570	0.952	0.2076
390	0.00012	0.00221	580	0.870	0.1212
400	0.0004	0.00929	590	0.757	0.0655
410	0.0012	0.03484	600	0.631	0.03315
420	0.0040	0.0966	610	0.503	0.01593
430	0.0116	0.1998	620	0.381	0.00737
440	0.023	0.3281	630	0.265	0.00335
450	0.038	0.455	640	0.175	0.00150
460	0.060	0.567	650	0.107	0.00067
470	0.091	0.676	660	0.061	0.00031
480	0.139	0.793	670	0.032	
490	0.208	0.904	680	0.017	
500	0.323	0.982	690	0.0082	
510	0.503	0.997	700	0.0041	
520	0.710	0.935	710	0.0021	
530	0.862	0.811	720	0.00105	
540	0.954	0.650	730	0.00052	
550	0.995	0.481	740	0.00025	
560	0.995	0.3288	750	0.00012	

Los colores del espectro visible se definen según su percepción como:

Púrpura: 360 nm – 450 nm

Azul: 450 nm – 500 nm

Verde: 500 nm – 570 nm

Amarillo: 570 nm – 591 nm

Naranja: 591 nm – 610 nm

Rojo: 610 nm – 830 nm

aún cuando cualquier percepción de color puede obtenerse mediante diferentes distribuciones espectrales. Este fenómeno se denomina “**metamerismo**”.

Magnitudes básicas en fotometría

La fotometría se aplica en todos los sistemas sensibles a la radiación visible. La magnitud básica es el flujo luminoso emitido por una fuente, medido en el Sistema Internacional en lumens, expresado como

$$\Phi_v = K_M \int_{0.38 \mu m}^{0.75 \mu m} V(\lambda) M_p(\lambda) d\lambda \quad \text{lumens}$$

donde $M_p(\lambda)$ es la potencia expresada en W/ μm y K_M es la **eficacia luminosa para visión fotópica** que tiene valores de 683 lumen/W en la longitud de onda pico de la curva fotópica ($\lambda \approx 0.55 \mu m \approx 550 \text{ nm}$) y 1746 lumen/W en la longitud de onda pico de la curva escotópica ($\lambda \approx 0.505 \mu m \approx 505 \text{ nm}$).

Las equivalencia entre las magnitudes básicas en radiometría y fotometría puede sintetizarse como sigue:

Magnitud Radiométrica	Símbolo	Unidad	Magnitud Fotométrica	Símbolo	Unidad
Flujo Radiante	Φ_e	W	Flujo Luminoso	Φ_v	lumen (lm)
Intensidad Radiante	I_e	W/sr	Intensidad Luminosa	I_v	lm/sr = candela (cd)
Irradiancia	E_e	W/m ²	Iluminancia	E_v	lm/m ² = lux (lx)
Radiancia	L_e	W m ⁻² sr ⁻¹	Luminancia	L_v	lm m ⁻² sr ⁻¹ = cd/m ²

Magnitudes fotométricas estándar[1]

Históricamente se han utilizado numerosas definiciones de magnitudes fotométricas en diferentes sistemas de unidades (sistemas SI, CGS e Inglés), originándose un complejo conjunto de conceptos que suele causar confusiones.

El **conjunto estándar de magnitudes fotométricas** es el siguiente:

Definición	Símbolo	Unidades SI y MKS	Unidades CGS	Unidades S. Inglés
Energía Luminosa	Q_v	Talbot (T)	Talbot (T)	Talbot (T)
Flujo Luminoso	Φ_v	Lumen (lm)	Lumen (lm)	Lumen (lm)
Intensidad Luminosa	I_v	Candela (cd) lumen/sr	Candela (cd) lumen/sr	Candela (cd) lumen/sr
Exitancia Luminosa (desde una fuente) También: emitancia luminosa	M_v	Lux (lx) = lumen/m ²	Phot (ph) lumen/cm ²	Footcandle (fc) lumen/ft ²
Incidencia Luminosa (sobre un objetivo) También: iluminancia	E_v	Lux (lx) = lumen/m ²	Phot (ph) lumen/cm ²	Footcandle (fc) lumen/ft ²
Esterancia luminosa También: brillo, luminancia	L_v	Nit = lumen/(m ² · sr) = cd/m ²	Stilb (sb) cd/cm ²	Candela/ft ²

Factores de conversión entre los Sistemas Internacional, CGS e Inglés:

	Phot	Footcandle	Lux
1 Phot =	1	929	1·10 ⁴
1 Footcandle =	1.076·10 ⁻³	1	10.764
1 Lux =	1 ·10 ⁻⁴	0.0929	1

Se recomienda el uso del Sistema Internacional teniendo en cuenta los siguientes aspectos:

- la expresiones “**emitancia de luminancia**” (*luminance emittance*) e **iluminancia** pueden usarse como alternativas a “**exitancia luminosa**” e “**incidencia luminosa**” (*luminous incidence*)
- las expresiones “**brillo**” y “**luminancia**” pueden usarse en vez de “**esterancia luminosa**” (*luminous sterance*). Esta magnitud se define también como **intensidad normalizada** (*normalized intensity, nit*)

- para las fuentes lambertianas
 - la luminancia es emitida en una semiesfera (hemiesfera) de ángulo sólido igual a 2π
 - la exitancia luminosa (*luminous exitance*) es la exitancia de luminancia (luminance exitance) dividida por π
 - la exitancia de luminancia se mide en “apostilb” (abs) en el SI, en Lambert (L) en el Sistema CGS y en foot-Lambert (fL) en Sistema Inglés.

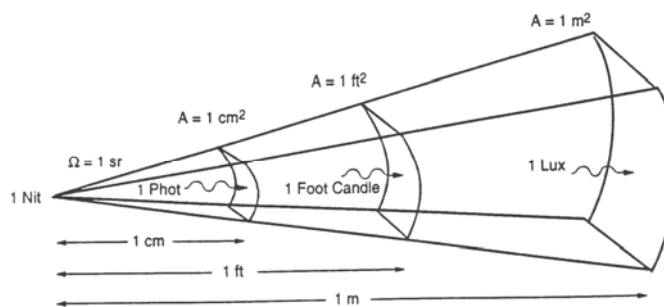


Figura 15. Relaciones entre las definiciones de las magnitudes del SI, CGS e Inglés.

Valores típicos de algunas magnitudes fotométricas [3]

Magnitud	Valor
Flujo luminoso total de una bombilla incandescente de tungsteno, de 100 W de potencia, con 82 W de flujo radiante total	1740 lm
Flujo luminoso de salida de un láser de He-Ne de media potencia, de 5 mW de flujo radiante, a 632.8 nm, con $K_r = 159 \text{ lm/W}$	796 lm
Flujo radiante de una lámpara fluorescente de 40 W, con 23.2 W de flujo radiante, con $K_r=122 \text{ lm/W}$, $K_s=71 \text{ lm/W}$	2830 lm
Lámpara de iluminación en aeropuerto de 1200 W	27500 lm
Illuminancia solar fuera de la atmósfera, en posición media de la órbita terrestre, con irradiancia de 1367 W/m^2 , $K_r=99.3 \text{ lm/W}$	133 klx
Illuminancia solar directa en la superficie de la tierra, a mediodía, en el sudeste de USA, en invierno, cielo claro, con irradiancia de 852 W/m^2 , $K_r=115 \text{ lm/W}$	78.9 klx
Luminancia media del sol en su superficie, con radiancia= $2.3 \cdot 10^7 \text{ W m}^{-2} \text{ sr}^{-1}$	$2.3 \cdot 10^9 \text{ cd/m}^2$
Luminancia aparente media del sol desde la superficie de la tierra, con radiancia= $1.4 \cdot 10^7 \text{ W m}^{-2} \text{ sr}^{-1}$	$1.6 \cdot 10^9 \text{ cd/m}^2$
Luminancia lunar, desde la superficie de la tierra, en un punto brillante	$2.5 \cdot 10^3 \text{ cd/m}^2$
Luminancia de un cielo claro	8000 cd/m^2
Luminancia de un cielo nublado	2000 cd/m^2
Luminancia de una vela/llama	10000 cd/m^2
Luminancia de un cuerpo negro a 6500 K	$3 \cdot 10^9 \text{ cd/m}^2$
Luminancia de filamento de tungsteno dentro de una bombilla de 100 W	$1.2 \cdot 10^7 \text{ cd/m}^2$
Luminancia de una lámpara fluorescente	$1.2 \cdot 10^7 \text{ cd/m}^2$
Luminancia de una superficie lambertiana, con reflectancia 0.7, iluminada con 500 lx	111 cd/m^2

Eficacia luminosa de radiación K_r (ó K_M), eficacia luminosa de un sistema de iluminación (K_s), y la función V-lambda $V(\lambda)$

En la definición de flujo luminoso hemos utilizado el factor K_M como **eficacia (o eficiencia) luminosa** para visión fotópica (también denominado “**factor de visibilidad**”. Este concepto es fundamental para establecer la equivalencia entre las magnitudes radiométricas y las fotométricas y relaciona el flujo luminoso (en lumens) con el flujo radiante total (en vatios) de un haz de radiación. Representado por K_M (ó K_r), debe tenerse en cuenta que es una medida de la efectividad de un haz de radiación para estimular el sistema visual humano y no es un “factor de eficacia” puesto que no relaciona una “energía a la salida” con una “energía a la entrada” de ningún sistema.

Si representamos por Q_v cualquiera de las magnitudes fotométricas fundamentales y como Q_e su magnitud radiométrica correspondiente, se tiene que K_M (también denominada K_r),

$$K_r \equiv K_M = \frac{Q_v}{Q_e} \quad (\text{lm/W})$$

siendo Q_e una integral sobre todas las longitudes de onda en las que Q_λ no es nula mientras que Q_v es una integral únicamente en la franja visible del espectro, en la que no es nula. Las eficacias luminosas de un haz infrarrojo o ultravioleta son, por tanto, nulas.

Los valores característicos de K_M son, como indicamos anteriormente, 683 lumen/W en la longitud de onda pico de la curva fotópica ($\lambda \approx 0.55 \mu\text{m} \approx 550 \text{ nm}$) y 1746 lumen/W en la longitud de onda pico de la curva escotópica ($\lambda \approx 0.505 \mu\text{m} \approx 505 \text{ nm}$).

λ (nm)	400	420	440	460	480	500	520	540	560	580	600	620	640	660	680	700	720
lm/W	0.3	2.7	15.7	41.0	95.0	221	485	652	680	594	425	260	120	41.7	11.6	2.8	0.7

Por otra parte, la **eficacia (o eficiencia) luminosa de un sistema de iluminación**, K_s , es la relación entre la energía luminosa Φ_v (en lumens) emitida por un sistema de iluminación y la potencia total P_e (en vatios) que se le debe suministrar al sistema para que emita la luz. También se mide en lm/W y, como vemos, representa una eficiencia completamente diferente a la indicada por K_M , siendo una magnitud muy utilizada en la “ingeniería de iluminación:

$$K_s = \frac{\Phi_v}{P_e} \quad (\text{lm/W})$$

Valores típicos de la eficacia luminosa de radiación K_M

Fuente	Eficacia Luminosa K_M (lm/W)
Luz monocromática (555 nm)	683
Luz blanca (constante en el visible)	220
Luz azul del cielo	125-140
Luz solar directa (mediodía)	90-120
Luz solar directa (fuera de la atmósfera)	99.3
Luz solar directa (amanecer/atardecer)	50-90
Luz de cielo nublado	103-115
Filamento de tungsteno en el punto de fusión	53
Bombilla de filamento de tungsteno (típica)	15
Tubo fluorescente blanco-azulado	348

Valores típicos de la eficacia luminosa de un sistema de iluminación, K_s

Sistema de Iluminación	Eficacia Luminosa K_s (lm/W)
Bombilla de filamento de tungsteno (típica)	12-17
Tubo fluorescente blanco-azulado (<i>hot-cathode</i>)	30-70
Tubo fluorescente blanco-azulado (<i>cold-cathode</i>)	38-52
Lámpara de vapor de Na, alta presión	60-140
Lámpara de haluro metálico	75-125

Ejemplos de aplicación [5]:

- Un haz luminoso está constituido por 100 W de luz monocromática de longitud de onda $\lambda_1=500$ nm y 50 W de luz monocromática de $\lambda_2=600$ nm . Calcular el flujo radiante y el flujo luminoso del haz (considerando visión fotópica).

El flujo radiante será la suma de los flujos radiantes de cada fuente:

$$\Phi = \Phi_1 + \Phi_2 = 100 + 50 = 150 \text{ W}$$

mientras que el flujo luminoso de cada fuente dependerá de su eficiencia luminosa (de radiación):

$$V_1 \approx 0.323 \rightarrow \Phi_{L1} = 100 \text{ W} \times V_1 \times 683 = 22.061 \text{ lm}$$

$$V_2 \approx 0.631 \rightarrow \Phi_{L2} = 50 \text{ W} \times V_2 \times 683 = 21.548 \text{ lm}$$

por lo que el flujo luminoso total será

$$\Phi_L = \Phi_{L1} + \Phi_{L2} = 43.609 \text{ lm}$$

- Bombilla de 100W de uso corriente: flujo luminoso $\Phi_L \approx 1000$ lm
- Faro de coche, en dirección frontal: intensidad luminosa $I_L \approx 20.000$ cd
- Superficie terrestre, día claro: iluminancia $E \approx 50.000$ lux
- Luminancia del Sol (supuesto lambertiano) $L \approx 2 \cdot 10^9$ nt, Luna: 2.000 nt

Niveles de iluminación [1]

Los niveles típicos de iluminación en condiciones naturales varían en un rango de unos 9-11 órdenes de magnitud, desde la iluminación estelar nocturna (*night glow*), inferior a $5 \cdot 10^{-3}$ lux, hasta la luz solar a mediodía. El sistema visual humano se adapta para optimizar la imagen formada, funcionando principalmente las células bastones de la retina en niveles bajos de luminosidad (respuesta escotópica) y los conos en condiciones de alta luminosidad, superiores a $5 \cdot 10^{-2}$ lux, (respuesta fotópica).

La capacidad del ojo para discernir diferencias de intensidad se denomina **adaptación** (*adaptation*) y depende de la iluminancia del entorno. El principal mecanismo fisiológico que lo regula es la variación del diámetro de la pupila, desde unos 2 mm hasta unos 8 mm (nótese que esto implica una variación de factor 16 en el área). El **contraste de luminancia** (ó, simplemente, **contraste**, *luminance contrast*), se puede definir de varias maneras, -según la aplicación considerada- dependientes de la luminancia del detalle a discernir (L_d) y de la del fondo (background, L_b)

$$C = \frac{L_d - L_b}{L_b}$$

o de las luminancias mayor (L_g) y menor (L_l)

$$C = \frac{L_g - L_l}{L_g} \quad C = \frac{L_g - L_l}{L_l}$$

A 0.01 lux, un objeto debe proporcionar 10 veces más flujo luminoso que el entorno para ser distinguido por el ojo. Así, si el entorno está a 700 K, entonces el objeto debe tener una temperatura de color de 750 K para ser perceptible. A 1000 lux, el objeto debe emitir 1000 veces más flujo que el entorno: si la temperatura de color del entorno es 1000 K, entonces el objeto debe tener una temperatura de 1350 K para ser perceptible. Debe tenerse en cuenta que las unidades fotométricas no están linealmente relacionadas con la temperatura de color.

Otra medida del contraste es la modulación M , definida como

$$M = \frac{L_{\max} - L_{\min}}{L_{\max} + L_{\min}}$$

Usando la definición del contraste detalle-fondo se tienen los siguientes umbrales típicos:

Contraste	Luminancia del fondo (cd/m ²)
0.08	1000
0.2	10
2	0.1
10	0.001

Iluminación en condiciones naturales

Condición del cielo	Respuesta visual	Incidencia luminosa media (lux)
Sol directo	Fotópica	10^5
Luz diurna	Fotópica	10^4
Día nublado	Fotópica	10^3
Día oscuro	Fotópica	10^2
Atardecer	Fotópica	10
Atardecer tardío	Fotópica	1.0
Luna llena	Fotópica	10^{-1}
Cuarto lunar	Mesópica	10^{-2}
Noche clara, sin luna (iluminación estelar)	Escotópica	10^{-3}
Noche nublada, sin luna (<i>night glow</i>)	Escotópica	10^{-4}

Iluminación en condiciones artificiales

Situación	Incidencia luminosa media (lux)
Quirófano	10^5
Estudio de TV	10^3
Escaparate	10^3
Oficina luminosa	500
Oficina	250 (200-1000)
Calle bien iluminada	20
Calle mal iluminada	10^{-1}

Fuentes luminosas *patrón* y fuentes reales [1]

Como se ha indicado al analizar la emisión radiante, la longitud de onda pico de los cuerpos emisores se desplaza hacia el extremo azul del espectro al aumentar la temperatura de color, aumentando la cantidad de energía que el emisor emite en el rango visible: una lámpara funcionando a 3200 K proporciona aproximadamente un 70% más de flujo luminoso que la misma lámpara operando a 3000 K. Esta es la razón de que se prefiera utilizar lámparas de alta temperatura de color (por ejemplo, lámparas halógenas de tungsteno) cuando es necesario alcanzar mayores valores de iluminación. El inconveniente es la menor vida útil de las lámparas mientras mayor es su temperatura de color (y, por tanto, de funcionamiento). En general, para aumentar el flujo luminoso resulta más eficiente combinar (haciendo funcionar simultáneamente) varias lámparas de menor temperatura de color que utilizar una única lámpara de temperatura de color muy alta.

Fuentes de calibración. *Iluminantes patrón o de referencia CIE.*

La Comisión Internacional de Iluminación (*Commission Internationale de l'Eclairage, CIE, International Commission on Illumination*) recomienda cuatro **iluminantes patrón o iluminantes de referencia CIE** que pueden utilizarse para la calibración de cámaras que sean sensibles en la región visible del espectro (desde 0.38 μm hasta 0.75 μm). Estos patrones se definen especificando su temperatura de color, no su intensidad. Así, las fuentes luminosas disponibles comercialmente intentan reproducir las curvas espectrales de estos iluminantes de referencia.

Los iluminantes de referencia recomendados por la CIE son:

Iluminante CIE	Temperatura de Color efectiva	Descripción
A	2856 K	Luz de una fuente (filamento) incandescente
B	4870 K	Luz solar a mediodía (promedio)
C	6770 K	Luz diurna (sol + cielo)
D ₆₅ ó D ₆₅₀₀	6500 K	Luz de día con temperatura de color corregida

El iluminante A es un filamento de tungsteno cuya emisión sigue la ley de radiación del cuerpo negro de Planck. Los otros tres iluminantes se obtienen situando filtros específicos en un iluminante A. En general, los iluminantes A y D₆₅ son utilizados habitualmente, mientras que los iluminantes B y C se mantienen por interés histórico.

Sus emisiones relativas se muestran en la Figura 1.

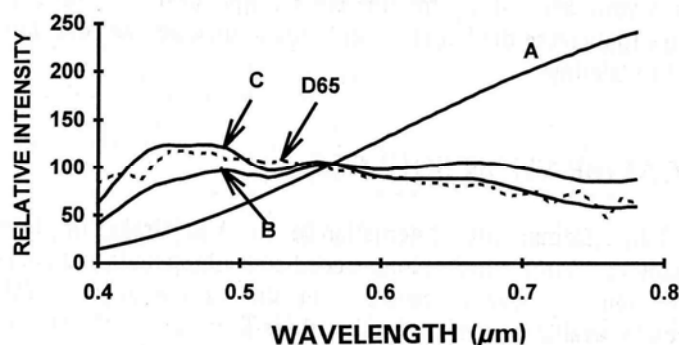


Figura 16. Emisión relativa de los iluminantes patrón (o de referencia CIE).

Emisión de fuentes reales

Aunque una bombilla de filamento de tungsteno sí emite luz con una curva de emisión espectral que reproduce fielmente la emisión de cuerpo negro ideal, otras fuentes luminosas de uso habitual, como las lámparas de descarga de gas (por ejemplo, tubos fluorescentes) no pueden reproducirla. Para analizar la luz emitida por este tipo de fuentes se ajusta una curva de emisión de tipo cuerpo negro a su curva de emisión real (de exitancia radiante espectral). Es importante notar que este ajuste no es válido para realizar cálculos precisos y, para este tipo de fuentes no ideales, es necesario realizar una medida precisa de la esterancia fotónica espectral real. Aún cuando muchas de estas fuentes (especialmente las lámparas de descarga) proporcionan una emisión de luz con apariencia blanquecina uniforme, suelen tener picos discretos muy marcados en su espectro de emisión, dependientes, entre otros factores, de la presión y temperatura a que se encuentra el gas emisor de luz, como se muestra en la Figura 2. Por otra parte, la temperatura de color aparente de la luz solar depende de la latitud, la hora del día, y otras condiciones ambientales (aerosoles, contaminantes, cubierta nubosa, ...), por lo que la estandarización del iluminante C a 6770 K es, en cierto modo, arbitraria y debe considerarse únicamente como representativa de un valor promedio.

Las temperaturas de color aproximadas de algunas fuentes reales son las siguientes:

Fuentes reales	Temperatura de Color aproximada
Luz del cielo (norte)	7500 K
Luz de día (promedio)	6500 K
Xenon (lámpara de arco o flash) / Luz solar	6000 K
Lámpara fluorescente fría	4300 K
Lámpara de tungsteno (de estudio) / Halógeno	3200 K
Lámpara fluorescente cálida	3000 K
Focos	3000 K
Lámpara de tungsteno (doméstica)	2800 K – 2900 K
Luz solar al atardecer	2000 K
Luz de una vela	1800 K
Temperatura de una Habitación	300 K

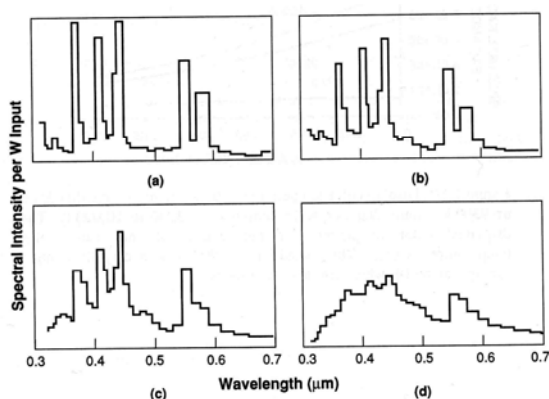


Figura 17. Emisión relativa de una lámpara de arco de mercurio en función de la presión: a) 21 atm, b) 75 atm, c) 165 atm y d) 285 atm.

Balance de blancos en los sistemas electrónicos de captación de imagen [1]

Usualmente no hay relación entre la temperatura de color y el contraste de una escena y la imagen que se muestra en un dispositivo (pantalla) de visualización (*display*), puesto que el usuario ajusta el *display* para conseguir la máxima visibilidad y, en su caso, el efecto estético deseado.

Puesto que la **señal de imagen** (*video signal*) proporcionada por los dispositivos electrónicos de captación de imagen es, simplemente, el valor de voltaje medido en cada punto de una matriz semiconductor fotosensible (por ejemplo, en un CCD) no hay, en principio, ninguna temperatura de color asociada con la medida de la citada señal de imagen. Es necesario, por tanto, establecer una equivalencia entre los valores de señal medidos (voltaje) y las condiciones de iluminación de la escena. Este proceso se denomina, genéricamente, **ajuste de blancos** ó **balance de blancos** (**white balance**) y consiste en ajustar la ganancia (*gain*) y el valor umbral (*offset*) del *display* de manera que un objeto blanco se visualizara como tal si fuera iluminado con una fuente de temperatura de color comprendida entre 3200 K y 10,000 K. La mayoría de los *displays* vienen pre-ajustados a 6300 K o a 9300 K. Al aumentar la temperatura de color, los objetos blancos cambian de un tono amarillento hacia un tono azulado. Como el color percibido de los objetos depende de la adaptación a la iluminación, el ajuste de la temperatura de color a los valores de señal medida proporciona resultados estéticamente adecuados aún cuando no exista relación alguna entre el ajuste seleccionado y la temperatura de color real de la escena registrada.

Los diferentes sistemas electrónicos de registro y visualización de imagen tienen, en general, diferentes respuestas espectrales, propias del material fotosensible seleccionado y del proceso de fabricación seguido. Por otra parte, la composición espectral del iluminante depende de cuál se trate. Como se muestra en la Figura 4, la incidencia luminosa nocturna es mayor en el rango del infrarrojo cercano ($0.7\ \mu\text{m} - 1.1\ \mu\text{m}$), por lo que la mayoría de los dispositivos de visión nocturna (intensificadores de imagen, amplificadores de luz residual, visores nocturnos, ...) son sensibles en esta región del espectro.

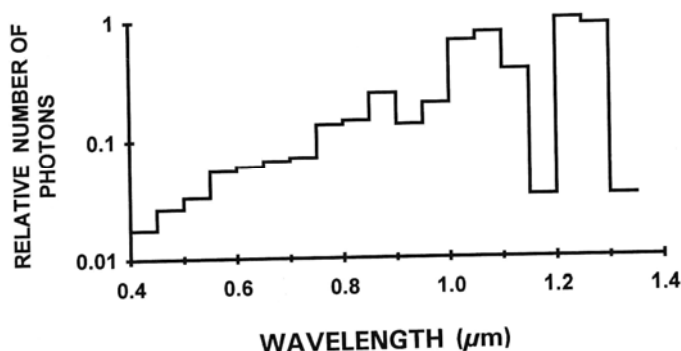


Figura 18. Incidencia luminosa nocturna.

Diferentes sistemas pueden hacerse equivalentes o proporcionar mejores prestaciones simplemente seleccionando una curva de iluminación adecuada. Por ejemplo, como se muestra en

la Figura 5, la respuesta del sistema será mayor cuando se visualice la fuente de 6500 K en vez de la de 4870 K.

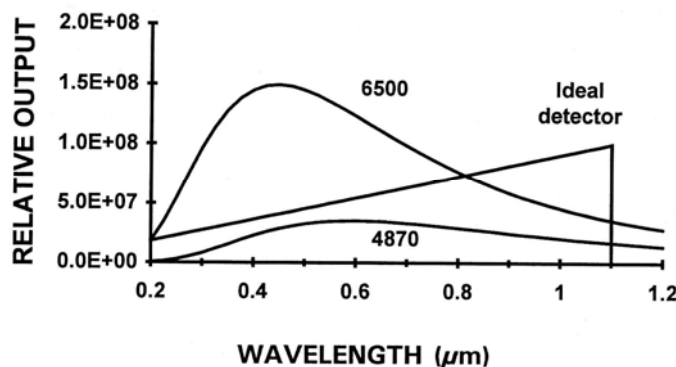


Figura 19. Respuesta espectral de un detector ideal y curvas espectrales de fuentes a temperaturas de color de 4870 K y 6500 K.

La señal de salida de una cámara depende, por tanto, de la respuesta espectral del sistema y la temperatura de color de la fuente iluminante. Cuando la respuesta espectral de la cámara se encuentra dentro del rango de respuesta del ojo, el uso de unidades fotométricas es adecuado. Como la respuesta espectral de los detectores de silicio se extiende a la zona infrarroja más allá del rango visible, su respuesta relativa se caracteriza considerándolos con y sin un filtro infrarrojo ideal (con transmitancia unidad en el rango 0.38 μm - 0.70 μm y cero fuera), normalizados al iluminante A de la CIE. Como se muestra en la Tabla siguiente, al aumentar la temperatura de color de la fuente (supuesta cuerpo negro ideal), la respuesta de un sensor ideal de silicio aumenta, aunque no linealmente.

Temperatura de color de la fuente	Respuesta relativa sin filtro IR (0.38 μm – 1.10 μm)	Respuesta relativa con filtro IR (0.38 μm – 0.70 μm)
2856 K	1.00	0.196
3200 K	1.96	0.482
4870 K	15.7	6.95
6500 K	48.9	27.4
6770 K	56.5	32.4

Únicamente los fotones en el rango visible afectan al cómputo del número de lumens disponibles. Para el sistema sin el filtro IR, el detector es sensible a los fotones de longitud de onda mayor de 0.70 μm aunque el número de lumens no está afectado por ellos. Al aumentar la temperatura de color, el flujo de fotones “disponibles” para el observador aumenta más rápidamente que el voltaje de salida. Como resultado, la respuesta, expresada en A/lumen, disminuye con el aumento en la temperatura de color. Esta disminución afecta al conjunto de la respuesta espectral. Especificar la respuesta del sistema en lumens es, por tanto, poco útil cuando la respuesta espectral del sistema se extiende más allá del rango visible. En estos casos se aconseja el uso de magnitudes radiométricas.

La Figura 20 permite comparar las dependencias espectrales de distintas fuentes, un detector semiconductor ideal y un observador fotópico. Al aumentar la temperatura de color de la fuente, la energía disponible para el observador aumenta rápidamente y, por tanto, el número de lumens. No obstante, una fuente de 3200 K (cuyo pico está en $0.90\ \mu\text{m}$) no está bien ajustada a la respuesta del ojo humano (cuyo máximo de respuesta se encuentra en $0.55\ \mu\text{m}$). Los detectores de silicio, por otra parte, muestran una buena respuesta en condiciones normales de luz ambiente.

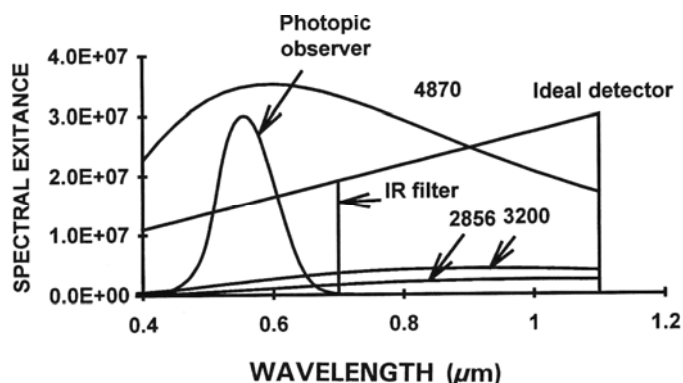


Figura 20. Comparación de las curvas de respuesta espectral de diversas fuentes, un detector ideal y un observador fotópico.

Ejemplo de aplicación: Una cámara proporciona una relación señal-ruido demasiado baja. ¿Cuál sería la diferencia entre cambiar la fuente de luz a una con mayor temperatura de color y añadir más lámparas?

Con un emisor cuerpo negro ideal, la temperatura de color especifica completamente la exitancia luminosa. Al aumentar la temperatura de color, aumentando el voltaje de la bombilla, aumentará el flujo luminoso. Para las fuentes reales, la temperatura de color se usa únicamente para indicar el contenido espectral relativo. Una bombilla de 50 W cuya emisión de salida se aproxima a una fuente de 3200 K tendrá una menor respuesta fotométrica que una bombilla de 1000 W funcionando a 2856 K. Añadir más lámparas no cambia el contenido espectral relativo pero aumenta el flujo luminoso.

Registro de una imagen. Valor de exposición (*exposure value*, E_v) [2]

El objeto de la **fotometría** incluye las magnitudes de la luz visible que intervienen en la escena visualizada o registrada y los correspondientes niveles de luz en el sistema detector. El concepto fundamental en el registro de una imagen es el **valor de exposición** (*exposure value*, E_v) del sistema. Comenzaremos estableciendo las ideas básicas con un sistema analógico, es decir, considerando un sistema de registro en película y, posteriormente, analizaremos los matices diferentes requeridos cuando se trata de un sistema digital.

Factores básicos que afectan al valor de exposición (*exposure value*, E_v)

Se consigue una exposición correcta cuando la cantidad de luz que llega al plano imagen es la adecuada al nivel de luz requerido por el sensor para producir una imagen final óptima. Para lograr un balance adecuado, es necesario tener en cuenta cuatro factores principales:

- el **brillo** de la escena ($\leftrightarrow$ *scene brightness*, B_v)
- la **sensibilidad** de la película ($\leftrightarrow$ **valor ISO ó ASA**, *ISO/ASA rating*, S_v)
- el **número-f** de la óptica del sistema ($\leftrightarrow$ **apertura**, *aperture*, A_v)
- la **duración temporal de la exposición** ($\leftrightarrow$ **velocidad de obturación**, *shutter speed*, T_v)

La interrelación entre estos factores se pone de manifiesto en que, por ejemplo, una escena más brillante o una película más sensible pueden ser compensadas por un tiempo de exposición más corto o fijando una apertura más pequeña (mayor número-f). El sistema de cuantificación del **valor de exposición** (*exposure value*, E_v) fue desarrollado sobre 1950 por grupos de trabajo en estandarización norteamericanos y alemanes. En la la tabla siguiente se sintetizan los efectos y valores de los diferentes parámetros considerados. En ella se puede apreciar cómo se asigna, a cada uno de los factores que intervienen en la exposición (número-f (A_v), velocidad de obturación (T_v), valor ISO/ASA de la sensibilidad (S_v) y brillo de la escena (B_v)), un valor numérico en el rango de -3 a +11. Cada escalón incremental en ese valor supone duplicar el valor absoluto del factor. La fórmula básica de la exposición E_v es

$$E_v = A_v + T_v = S_v + B_v$$

donde vemos que para obtener una exposición correcta, la suma del número-f del sistema y de la velocidad de obturación debe ser igual a la suma de la sensibilidad ISO del sistema sensible y el valor del brillo de la escena.

A _v	f / #	T _v	Shutter Speed (Seconds)	S _v	ISO Rating	B _v	Scene			Typical Exterior	Typical Interior
						Brightness (Ft L)	Illuminance (Lux)	(Ft C)			
11	44	11	1 / 2000	11	6400	11	2000	120 K	11 K	Sunny Day	Well Lit Arena
10	32	10	1 / 1000	10	3200	10	1000	60 K	5600		
9	22	9	1 / 500	9	1600	9	512	30 K	2800		
8	16	8	1/ 250	8	800	8	256	15 K	1400	Open Shade	
7	11	7	1 / 125	7	400	7	128	8 K	740		
6	8	6	1 / 60	6	200	6	64	4 K	360		
5	5.6	5	1 / 30	5	100	5	32	2 K	180	Overcast Day	
4	4	4	1 / 16	4	50	4	16	1 K	90		
3	2.8	3	1 / 8	3	25	3	8	480	45		
2	2	2	1 / 4	2	12	2	4	240	22	Sunrise Sunset	
1	1.4	1	1 / 2	1	6	1	2	120	11		
0	1	0	1	0	3	0	1	60	5.6		
-1	.7	-1	2	-1	--	-1	.5	30	2.8	Twilight	
-2	.5	-2	4	-2	--	-2	.25	15	1.4		
-3	--	-3	8	-3	--	-3	.12	7	0.6		

Tabla. El valor de exposición E_v y los factores que lo determinan.

Cálculo de la exposición [2]

Ejemplo 1: Realización de una fotografía de paisaje en un día de otoño

Si hemos de realizar la fotografía sujetando la cámara a mano (es decir, sin trípode ni otro apoyo), hemos de elegir una velocidad de obturación suficientemente rápida como para que el posible temblor transmitido por nuestro brazo o mano no afecte. Para eso, la velocidad debe ser, al menos, de 1/60 s (o más rápida). Una velocidad de 1/60 s implica $T_v = 6$. Para conseguir una adecuada reproducción de los tonos de color y una alta resolución debemos usar una película con un tamaño de grano muy pequeño como, por ejemplo, una película de 25 ASA, que equivale a $S_v = 3$. Si el brillo de la escena cambia porque el sol ilumina directamente en algunos momentos y en otros es tapado por nubes, tendremos una variación de $B_v = 8 \pm 2$. Sustituyendo en la ecuación de E_v tenemos

$$E_v = A_v + T_v = S_v + B_v \rightarrow A_v + 6 = 3 + 8 (\pm 2) \rightarrow A_v = 5(\pm 2)$$

y, consultando en la citada Tabla, vemos cómo el valor medio de la apertura que debemos poner en la óptica del sistema corresponde a f/5.6 con un máximo de f/11 (para los momentos de máximo brillo) y un mínimo de f/2.8 (para los momentos en que el sol esté oscurecido por las nubes). Por otra parte, sabemos que, para grandes aperturas, como f/2.8, la profundidad de campo será muy reducida y, previsiblemente, la imagen obtenida no será satisfactoria puesto que al ser un paisaje nos interesa que el rango de distancias enfocadas (que salgan nítidas) desde la posición de la cámara sea grande. Este inconveniente puede solventarse utilizando una película más sensible: por ejemplo, de 100 ASA ($\rightarrow S_v = 5$) que aumentaría el valor de la exposición en un factor 2 y nos permitiría, con el mismo sistema óptico, utilizar aperturas desde f/5.6 hasta f/22.

Ejemplo 2: Realización de una fotografía en un evento deportivo

La realización de una fotografía en un evento deportivo suele implicar la captación de sujetos en movimiento, de manera que es necesario utilizar tiempos rápidos de exposición con valores de la velocidad de disparo más rápidos de 1/250 s ($\rightarrow T_v = 8$). Por otra parte, suele ser necesario, asimismo, utilizar lentes de gran distancia focal (teleobjetivos y lentes zoom) para poder aislar el motivo objeto de la fotografía de su entorno. Como sabemos, este tipo de lentes se caracterizan por aperturas máximas limitadas, por ejemplo, a un valor f/4 ($\rightarrow A_v = 4$). En los recintos deportivos, la iluminación suele proporcionar un valor de brillo uniforme y relativamente alto a la escena ($\rightarrow B_v = 4$). Sustituyendo estos factores en la expresión de E_v tenemos

$$E_v = A_v + T_v = S_v + B_v \rightarrow 4 + 8 = S_v + 4 \rightarrow S_v = 8$$

y vemos que, para este tipo de fotografías, hemos de utilizar una película rápida de sensibilidad 800 ASA. Estas películas de alta sensibilidad (a partir de 400 ASA) sabemos, por otra parte, que poseen un grano de mayor tamaño y, en consecuencia, si realizamos ampliaciones de las fotografías mayores, aproximadamente, de un tamaño A-4, el efecto de “**granulado**” será relativamente apreciable.

Uso de fotómetros para el cálculo de la exposición [2]

El cálculo de los valores de exposición E_v adecuados para la captación de una imagen puede realizarse utilizando un fotómetro de mano o una cámara (analógica o digital) que disponga de un sistema de medida incorporado y nos permita cuantificar el valor del brillo (o iluminancia) de la escena. Conocido el valor B_v y habiendo elegido una película (o sensibilidad del sistema de captación) de valor S_v , la persona que realiza la fotografía únicamente debe considerar las combinaciones entre velocidad de obturación y apertura correspondientes. Como hemos visto en los ejemplos precedentes, estas combinaciones dependerán de la velocidad de disparo requerida para la captación del sujeto de interés y de la luminosidad (máximo número-f) de la lente utilizada.

Las cámaras más modernas (analógicas o digitales) disponen de sistemas de medida y cálculo de la exposición controlados por microprocesadores que permiten evaluar

- el plano imagen completo (medida promedio de la exposición),
- varias zonas independientes del plano imagen (medición múltiple) o
- un único punto del plano imagen (medición puntual)

De esta manera, en escenas con fuertes contrastes de iluminación es posible realizar el cálculo de los parámetros de exposición (velocidad de obturación y apertura) adecuados para conseguir una imagen óptima de la zona de interés de la escena visualizada.

Uso de fotómetros para la medida del brillo de una escena

Los fotómetros de mano o incorporados en cámaras pueden también utilizarse para medir el brillo de una escena. Para ello fijamos una sensibilidad estándar ASA de, por ejemplo, 100 ASA ($\rightarrow S_v = 5$) y apuntamos el dispositivo (fotómetro o cámara) a la escena. Si el sistema de medida nos indica que debemos utilizar, por ejemplo, una apertura de $f/4$ ($\rightarrow A_v = 4$) y una velocidad de obturación de $1/30$ s ($\rightarrow T_v = 5$) podemos calcular el brillo de la escena como

$$B_v = A_v + T_v - S_v = 4 + 5 - 5 = 4$$

y, consultando en la Tabla 1, un valor de $B_v = 4$ corresponde a un brillo de 16 foot-lamberts y, asumiendo una reflectancia estándar de un 18%, a una iluminancia de 960 lux.

Iluminancia de la imagen [2]

Los sistemas electrónicos de captación y registro de imagen suelen caracterizar las prestaciones del sistema sensible en función del nivel de iluminación presente en el detector. Utilizando la notación indicada en la Figura 1, y denominando

B_{im} = iluminancia de la imagen

B_{sc} = iluminancia de la escena

R = reflectancia de la escena

t = transmisividad del sistema

$f/\#$ = número-f del sistema

se tiene la siguiente relación entre la iluminancia de la escena y la iluminancia en el plano de la imagen (=plano del detector).

$$B_{im} = \frac{B_{sc} R t}{4 (f/\#)^2}$$

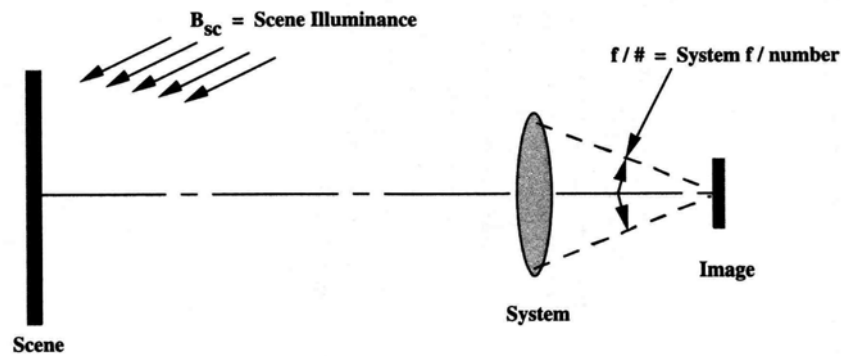


Figura 21. Relación entre la iluminancia de la escena y la de su imagen.

Utilizando esta expresión se puede determinar el rango de velocidades de obturación que debe permitir el sistema para poder registrar un rango determinado de escenas (=rango de brillos de escenas) con un detector dado. Si el rango de brillos de escenas que debemos registrar es superior al rango que permite el número-f del sistema, podemos modificar la transmisividad del mismo incorporando un filtro de densidad neutra.

Resumen de conceptos de Fotometría [4]

- La fotometría es la parte de la radiometría que estudia las magnitudes relacionadas con la percepción visual
- La potencia luminosa se mide en lumens (lm). El lumen representa una potencia de un vatio (W) “ponderado” por la respuesta del sistema visual humano:
 - en las condiciones de visión fotópica, el pico máximo de respuesta sucede a una longitud de onda de ~555 nm, siendo el factor de conversión ~683 lm/W
 - en las condiciones de visión escotópica, el pico máximo de respuesta sucede a una longitud de onda de ~507 nm, siendo el factor de conversión ~1700 lm/W
- Todos los resultados y reglas de la radiometría y la transferencia radiativa son válidas
- Las magnitudes fotométricas más importantes son

Magnitud	Símbolo	Unidad
Potencia luminosa	Φ_v	lm
Intensidad luminosa	I_v	lm/sr
Iluminancia	E_v	lm/m ²
Exitancia luminosa	M_v	lm/m ²
Luminancia	L_v	lm/(m ² sr)
Exposición	H_v	lm s /m ²

- Otras unidades fotométricas comunes y factores de conversión son

Magnitud	Unidad	Equivalencia
I_v	candela (cd) =	lm/sr
E_v	lux (lx) =	lm/m ²
	foot-candle (fc) =	lm/ft ²
	1 fc =	10.76 lx
L_v	foot-Lambert (fL) =	(1/π) cd/ft ²
	nit (nt) =	cd/m ²
	1 fL =	3.426 nt
H_v	lux-second (lx s) =	lm s/m ²

- Los niveles de iluminancia típica son

Día soleado	10 ⁵ lx
Día nublado	10 ³ lx
Interior	10 ² lx
Luz de luna	10 ⁻¹ lx
Noche estrellada	10 ⁻³ lx
Iluminación de mesa	10 ³ lx

Expresiones dimensionales de las magnitudes radiométricas y fotométricas [3]

SI Units for Radiometry and Photometry				
Quantity	Name	Symbol	Expression in Terms of Other Units	Expression in SI Base Units
Radiant energy	joule	J	$N \cdot m$	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2}$
Radiant flux	watt	W	J/s	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3}$
Plane angle	radian	rad		$m \cdot m^{-1}$
Solid angle	steradian	sr		$m^2 \cdot m^{-2}$
Radiant intensity	$watt \cdot sr^{-1}$	W/sr		$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot sr^{-1}$
Irradiance, Exitance	$watt \cdot m^{-2}$	W/m ²		$kg \cdot s^{-3}$
Radiant exposure	$joule \cdot m^{-2}$	J/m ²	$W \cdot s \cdot m^{-2}$	$kg \cdot s^{-2}$
Radiance	$watt \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1}$	$W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1}$		$kg \cdot s^{-3} \cdot sr^{-1}$
Luminous intensity	candela	cd		cd
Luminous flux	lumen	lm		cd · sr
Quantity of light	$lumen \cdot sec$	lm · s		cd · sr · s
Illuminance	lux	lx	lm/m ²	cd · sr · m ⁻²
Luminous exposure	$lux \cdot sec$	lx · s	$lumen \cdot sec \cdot m^{-2}$	cd · sr · s · m ⁻²
Luminance	candela per square meter	cd/m ²	$lm \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1}$	cd/m ²
Photon flux	number per second	s ⁻¹	quanta/s	s ⁻¹
Photon intensity	number per second per steradian	s ⁻¹ · sr ⁻¹		s ⁻¹ · sr ⁻¹
Photon irradiance	number per second per square meter	s ⁻¹ · m ⁻²		s ⁻¹ · m ⁻²
Photon radiance	number per second per square meter and per steradian	s ⁻¹ · m ⁻² · sr ⁻¹		s ⁻¹ · m ⁻² · sr ⁻¹

Note: *N* is the symbol for the Newton, the metric unit for force.

Factores de conversión entre unidades radiométricas y fotométricas [3]

SI to IP Conversion Factors for Radiometry and Photometry

Quantity	Units	Symbol	Conversion Equation
Radiant flux	British thermal unit per hour	Btu/h	1 Btu/h = 0.2928W
	Watt	W	1W = 1 J/s
	Erg per sec	erg/s	1 erg/s = 10^{-7} J/s = 10^{-7} W
Radiant intensity	Btu per hour and per steradian	$\text{Btu} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$	1 $\text{Btu} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$ = 0.2928 $\text{W} \cdot \text{sr}^{-1}$
	Watt per steradian	W/sr	1 W/sr = $1 \text{ J} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$
Irradiance	Btu per hour and per square foot	$\text{Btu} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{ft}^{-2}$	1 $\text{Btu} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{ft}^{-2}$ = 3.1503 W/m^2
	Watt per square foot	W/ft^2	1 W/ft^2 = 10.76 W/m^2
Radiance	Btu per hour and per square foot and per steradian	$\text{Btu} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{ft}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$	1 $\text{Btu} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{ft}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$ = 3.1503 $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$
	Watt per square foot and per steradian	$\text{W} \cdot \text{ft}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$	1 $\text{W} \cdot \text{ft}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$ = 10.76 $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$
	Lumen	lm	1 lm = 1 cd · sr
Luminous flux	candela	cd	1 cd = 1 cd
Luminous intensity			
Illuminance	Lumen per square foot	lm/ft^2	1 lm/ft^2 = 10.76 lm/m^2 = 10.76 lx
	Foot candle	$\text{fc} = \text{lm/ft}^2$	1 fc = 10.76 lux
Luminance	candela per sq. foot	cd/ft^2	1 cd/ft^2 = 10.76 cd/m^2
	Foot Lambert*	$\text{fl} = \text{fc}/(\pi \text{ sr})$	1 fl = $10.76 \text{ lx}/(\pi \text{ sr}) = 1/\pi \text{ lm/ft}^2$ = 3.425 cd/m^2

*The foot Lambert is the unit of luminance from a Lambertian surface in terms of the exitance of the surface divided by π . This is a very inappropriate term that invites misuse and is to be deprecated. Unfortunately, it is still used in some fields.

Conversion Factors for Deprecated Units

Quantity	Units	Symbol	Conversion Equation
Radiant flux	Calorie/second	cal/s	1 cal/sec = 4.184 J/sec 1 cal/sec = 4.184W
	Calorie/min	cal/min	1 cal/min = 251W
Irradiance	$\text{Cal} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$	$\text{cal}/(\text{s} \cdot \text{m}^2)$	1 $\text{cal} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ = 4.184 W/m ²
	Langleys/s = $\text{g-cal} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$	Ly/s	1 Ly/s = 4.1868 W/cm ² 1 Ly/s = 4.1868 $\times 10^4$ W/m ² 1 Ly/s = 41.868 kW/m ²
	Talbot		1 Talbot = 1 $\text{lm} \cdot \text{s}$
	Lumen-hour	$\text{lm} \cdot \text{hr}$	1 $\text{lm} \cdot \text{hr}$ = 3600 $\text{lm} \cdot \text{s}$
Luminous energy Also called "quantity of light"			
Luminous intensity	candle, unit of luminous intensity in the U.S., France, and G.B. from 1948 to 1979		1 candle = 1 candela
	candle-power	cp	1 candle power = 1 cd
Illuminance	Foot candle = lm/ft^2	fc or ft cd	10.764 lux = 1 FC
	Phot = $\text{cm-candle} = \text{lm}/\text{cm}^2$	Phot	1 Phot = 1 lm/cm^2 = 10^{-4} lx 0.1 milliphot = 1 lx 1 phot = 929 FC 1 millphot = 0.929 FC.
	Nox = millilux	Nox	1 Nox = 10^{-3} lux = mlx
	m-candle = lux	m-cd	1 m-cd = 1 lm/m^2 = 1 lx
Luminance	nit	nit	1 nit = 1 cd/m^2 = 1 $\text{lm} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$
	stilb	stilb	1 stilb = 1 cd/cm^2 = 929 cd/ft^2 = π Lamberts
	Lambert	Lambert	1 Lambert = $1/\pi$ cd/cm^2 = 3.18 stilb = 929 ft lambert
	ft-Lambert	fL	$1/\pi$ cd/ft^2 = 10.76/ π cd/m^2
	International apostilb = 10^{-4} Lambert, also called blondel	apostilb	1 apostilb = $1/\pi$ cd/m^2 = 0.1 millilambert = $1/\pi \times 10^{-4}$ stilb
	German Hefner apostilb = 0.9×10^{-4} Lambert	apostilb	1 apostilb = 0.09 millilambert
	skot	skot	1 skot = $1/\pi 10^{-3}$ cd/m^2 = 1 milliapistilb
	glim	glim	1 glim = 10^{-3} ft-Lambert
	cd/ft^2		10.764 cd/ft^2 = 1 cd/m^2

Referencias

Esta *Guía Básica de Conceptos de Radiometría y Fotometría* se fundamenta en una traducción, modificada y revisada, de los epígrafes correspondientes en

- [1] **Holst G.C.** *CCD arrays, cameras and displays*. SPIE, The Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers, 1998.
- [2] **Walker B.H.** *Optical Engineering Fundamentals*. SPIE, The Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers, 1998.
- [3] **McCluney W.R.** *Introduction to radiometry and photometry*. Artech House Inc., 1994.
- [4] **J. Greivenkamp.** *Field Guide to Geometrical Optics*. SPIE, The Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers, 2004.
- [5] **P.M. Mejías Arias, R. Martínez Herrero.** *100 Problemas de Óptica*. Alianza Editorial, 1996.