# B.0. Introducción y unidades de medida

# **B.0.1.** La era de la información

En la última década el mundo ha cambiado mucho y también sus necesidades. Estos cambios también se han producido en el área de la tecnología. Dado que el mercado se está expandiendo hasta cubrir la totalidad del globo la importancia de las comunicaciones es cada vez mayor. Las tecnologías que hacen factible estas mejoras de la comunicación se pueden subdividir entre otras en componentes electrónicos de estado sólido y componentes fotónicos. Nosotros vamos a estudiar ahora esta última parte.

La optoelectrónica es la técnica de procesar la información mediante la luz y ya lleva muchos años en desarrollo, pero ha sido en los últimos 15 años cuando ha adquirido un mayor auge. Así por ejemplo, las cámaras de vídeo, los lectores de discos ópticos ("compact disc"), los relojes digitales, los paneles solares y las impresoras láser han evolucionado gracias a esta nueva tecnología. Se espera que para el año 2010 la industria de la optoelectrónica ocupe una parcela del mercado similar a la industria de los circuitos integrados. Esto se traduce en un aumento de 20 veces del dinero manejado en 1995. Esto hace imprescindible estudiar esta familia de componentes que hasta ahora o no se veía o se veía de forma muy superficial.

La era de la información como ya hemos dicho necesita de medios muy eficaces de intercambio de información debido a que la economía mundial depende de esta información y de la velocidad con que se transmite. Los componentes fotónicos han contribuido activamente a este crecimiento de la velocidad de procesamiento y transmisión de la información. Aunque la televisión y la bombilla entre otros también se pueden contemplar como dispositivos fotónicos sólo estudiaremos aquí aquellos dispositivos aparecidos en los últimos 20 años. Además ha sido en esta última década cuando los componentes fotónicos han comenzado a jugar un importante papel junto a los componentes electrónicos en el procesado y transmisión de la información.

# **B.0.2.** Necesidades en la era de la información

Las funciones básicas a realizar en la era de la información son las siguientes:

Detección y recepción de la información:

Es una de las funciones más importantes. Nuestros sentidos, por ejemplo son imprescindibles para poder desarrollar una vida sin esfuerzos adicionales. De igual manera necesitamos dispositivos sensores / detectores con una respuesta a una entrada externa bien definida. Estos dispositivos sensores / detectores deben convertir la información y de forma que se pueda procesar por otros medios a continuación.

# Amplificación de la información:

Si la información recibida no dispone de suficiente señal deberemos amplificarla para poder trabajar con ella. Para ello el dispositivo debe poseer una determinada ganancia.

# Manipulación de la información:

Necesitamos manipular esa información para poder sacar de ella la información que realmente nos interesa y desechar la que no nos interesa. Para ello puede ser necesario realizar operaciones aritméticas con la información o cualquier otro tipo de operación.

# Memoria:

La memoria también es esencial ya que el proceso de aprender, comparar, seleccionar y volver a usar esta información, hace necesarios dispositivos de almacenamiento de la información.

# Transferencia de información:

Una función muy importante es ser capaz de transferir información o resultados obtenidos después de la manipulación de dicha información a un dispositivo de memoria. Será necesario en muchos casos codificar dicha información para simplificar la transferencia de la información.

# Generación de la información:

Es el paso imprescindible en la tecnología de la información. Sin ella la era de la información no existiría.

# Visualización de la información:

El dicho "Una imagen vale más que mil palabras" ya lo dice todo. La técnica de los visualizadores es una de las que más ha avanzado en los últimos años. De entre estas técnicas cabe destacar los visualizadores LCD y los ya veteranos LEDs.



# **B.0.3.** Dispositivos electrónicos frente a dispositivos fotónicos

Los dispositivos electrónicos y toda la electrónica que les acompaña y que tanto ha revolucionado la técnica en los últimos 40 años tienen algunas limitaciones.

Por una parte se tienen que interconectar mediante cables o conexiones metálicas. Esto limita la capacidad de interconexión de los dispositivos que requieren interconexión masiva. Los componentes fotónicos no sufren esta limitación ya que no se deberían conectar mediante interconexiones metálicas.

Otro problema aparece en la transmisión de la información. Si se utilizan cables, el sistema es caro, no es capaz de transmitir muchos canales y necesita repetidores cada cierta distancia. En este terreno la fibra óptica, los diodos láser y los fotodetectores han conseguido un gran avance.

Los equipos electrónicos también sufren de los problemas derivados de las interferencias electromagnéticas mientras que no existen problemas de EMI en sistemas ópticos.

Finalmente los electrones no se ven, por lo que necesariamente debemos utilizar visualizadores. Esta parcela ya está por necesidad copada por los componentes fotónicos.

# **B.0.4.** Las ventajas de un sistema de procesado de la información basado en la luz

- 1. Inmunidad frente a las interferencias electromagnéticas: Dado que las partículas luminosas no están cargadas no se ven afectadas por campos electromagnéticos de forma importante.
- 2. No-interferencia de dos señales luminosas que se cruzan: Dos rayos de luz se pueden cruzar sin que ninguno de ellos se vea afectado de forma significativa. Esto permite aumentar la densidad de información a tratar.
- 3. Posible alto paralelismo: El proceso de información óptica en paralelo para así tomar decisiones en tiempo real es actualmente una de los temas candentes en el área de la robótica.
- 4. Alta velocidad / alto ancho de banda: Se han llegado a generar pulsos ópticos de una duración de sólo unos femtosegundos ( $1 \text{fs} = 10^{-15} \text{s}$ ). Esto puede permitir una velocidad de proceso muy elevada.
- 5. Los haces de luz se pueden dirigir con relativa facilidad mediante lentes u hologramas: Esto puede llegar a permitir el reconfigurar un interconexionado de forma activa y dar una flexibilidad increíble a un sistema óptico.

- 6. Dispositivos de funciones especiales: Con lentes, por ejemplo, se pueden llegar a generar transformadas de Fourier de una imagen o hacer análisis espectrales utilizando las características de difracción de la luz.
- 7. Facilidad de acoplamiento con un sistema electrónico: Esta facilidad ha permitido una mayor integración en dispositivos optoelectrónicos y ha desarrollado en gran medida dispositivos como el láser, el detector o el modulador.

Por todo ello es necesario el conocer los componentes fotónicos. Empezando desde su composición y funcionamiento físico hasta su aplicación circuital o electrónica. Nosotros vamos a intentar dar una explicación de su funcionamiento físico y de su fabricación y composición.

# **B.0.5.** El comportamiento de la luz.

# B.0.5.1. Tipos de ondas

La luz puede ser considerada como una onda electromagnética viajando por el espacio a una gran velocidad. Existen dos tipos de ondas posibles: **longitudinales** y **transversales**. En las ondas longitudinales, hay un movimiento oscilatorio en la dirección de propagación (es el caso de las ondas sonoras); en las ondas transversales, el movimiento oscilatorio es en dirección perpendicular a la dirección de propagación (como el caso de las ondas formadas en la superficie del agua). Una **onda electromagnética** es una onda transversal en la que las componentes de los campos eléctrico y magnético son perpendiculares entre sí y perpendiculares a la dirección de propagación.





Fig. B.0.1: (a) Onda longitudinal. (b) Onda transversal. (c) Onda transversal electromagnética.

Para la mejor comprensión del fenómeno ondulatorio es útil recordar los términos más comúnmente utilizados para describirlo. El **periodo** (T) es el intervalo de tiempo necesario para completar un ciclo de la oscilación. La **frecuencia** (f) es el número de oscilaciones en un segundo. Una magnitud es la inversa de la otra:

$$f = \frac{1}{T} \tag{B.0.1}$$

donde T = periodo (s) y f = frecuencia (Hz).

La tercera característica de la oscilación es la **amplitud**, la cual es el valor absoluto máximo de una onda. La amplitud en el caso de una onda electromagnética es una combinación compleja de las componentes de los campos eléctrico y magnético que no puede ser determinada mediante una medida directa. En el caso de radiación electromagnética, la potencia propagada por la onda oscilatoria, es proporcional al cuadrado de dicha amplitud.

#### **B.0.5.2.** Relaciones y ecuaciones.

Cuando una oscilación se propaga en un medio, forma una onda como la que se muestra esquemáticamente en la siguiente figura:



Fig. B.0.2: Amplitud y periodo.

La longitud de onda ( $\lambda$ ), es la distancia que la onda recorre en un periodo:

$$\lambda = v \cdot T = v / f \tag{B.0.2}$$

donde  $\lambda$  = longitud de onda (m) y v = velocidad de la luz en el medio (m/s).

La velocidad de la luz en el vacío:

$$c = 2,997924574 \times 10^8 \text{ (m/s)}$$
 (B.0.3)

es una de las constantes fundamentales de la naturaleza.

#### B.0.5.3. El espectro electromagnético

El espectro electromagnético mostrado en la siguiente figura va desde ondas de radio de muy baja frecuencia (VLF) hasta los rayos cósmicos. De todo este amplio espectro, la optoelectrónica únicamente se ocupa de la luz infrarroja, la luz visible (entre 400nm y 700nm) y la radiación ultravioleta.



#### B.0.5.4. Radiometría y fotometría

La optoelectrónica es la ciencia que estudia la radiación electromagnética y el campo energético electromagnético generado por las fuentes de radiación. La **radiometría** estudia las propiedades y características de la radiación electromagnética, describe el campo de radiación, cómo interactúa la radiación con dispositivos y receptores, y las características de las fuentes de radiación y receptores. Limitaremos nuestra discusión a frecuencias y longitudes de onda desde el infrarrojo hasta el ultravioleta, aunque la radiometría cubre un espectro frecuencial mucho mas ancho. En radiometría medimos radiación y los resultados de tales medidas los obtenemos en las unidades físicas que se emplean comúnmente para tal efecto (vatios, vatios por metro cuadrado, etc.). Esta ciencia es relativamente nueva pues se originó a inicios del siglo XX con el auge de la tecnología electrónica.

En el espectro de la radiometría están incluidas las longitudes de onda entre 400nm y 700nm correspondientes a la luz visible. Dentro de este rango existen gran cantidad de dispositivos optoelectrónicos cuyo principal propósito es la interacción y comunicación con los humanos. Por tanto, el principal receptor en el rango de la luz visible es el ojo humano. La ciencia que estudia la luz visible y su percepción por el ojo humano es llamada **fotometría**.

La fotometría, a diferencia de la radiometría, es una ciencia mucho más antigua, pues tiene su origen en el siglo XIX. Existen diferencias fundamentales entre la radiometría y la fotometría. Una diferencia significativa es el receptor o dispositivo de medida. En radiometría, las medidas se realizan con instrumentos electrónicos; en fotometría, la medida llega al ojo humano. Otra diferencia es que, en fotometría, se utilizan unidades diferentes para caracterizar la radiación.

# B.0.6. La naturaleza de la visión humana

Muchos consideran que la visión es uno de nuestros sentidos más importantes. Nos permite reconocer los peligros que afrontamos, realizar nuestras tareas diarias, y disfrutar del esplendor y la belleza de nuestro entorno. Todas estas tareas se consiguen por un sistema de reconocimiento muy complejo, del que el ojo humano es la conexión inicial con el mundo. En nuestros ojos se forma una imagen representativa usando la luz, con una radiación electromagnética entre 400nm y 700nm (luz visible) como medio de propagación de la imagen.

¿Por qué nuestra visión se restringe a un rango tan pequeño? La razón es que la radiación del sol tiene un máximo en estas longitudes de onda y nos proporciona una gran cantidad de energía dentro de este rango de longitudes de onda. Por lo que el diseño de un sistema complejo de visión para este particular rango de longitudes de onda es mucho más sencillo que para cualquier otro.

La visión humana es un fenómeno extremadamente complicado de tipo psico-físico, ya que combina procesos ópticos, biológicos, químicos, neurológicos y fisiológicos. Aquí describiremos algunas características de la visión humana en un lenguaje para ingenieros electrónicos, fijándonos sólo en algunas propiedades que pueden aplicarse a los dispositivos fotónicos.

# B.0.6.1. El ojo humano

El ojo humano puede asimilarse a una cámara CCD (charge coupled device). Una cámara CCD es parecida a una cámara normal, excepto por el medio de grabación. La cámara que solemos usar graba sobre una cinta; una cámara CCD graba sobre una matriz de celdas fotosensibles que generan y almacenan carga eléctrica, que es proporcional a la iluminación de la imagen. La matriz de la CCD se lee periódicamente y la información se envía a un dispositivo de almacenamiento y evaluación. El ojo humano trabaja de la misma manera. En la siguiente figura se describe el ojo humano junto con algunos datos importantes.



Fig. B.0.4: El ojo humano.

# B.0.6.1.1. Formación de la imagen

La formación de la imagen en el ojo humano se consigue a través de dos tipos de lentes: una de longitud focal fija, la cornea, y la lente de longitud focal variable, el cristalino. El ojo enfoca una imagen ajustando la longitud focal del cristalino. La curvatura del cristalino puede cambiar por la acción del músculo ciliar y la zónula. El ojo puede compararse con una cámara auto-focus donde el enfoque se consigue con cambios en la longitud focal de las lentes, para compensar el cambio de la distancia de la imagen a la lente, que es lo que ocurre en cualquier cámara. En el ojo, situado entre la córnea y el cristalino, hay un diafragma automático llamado iris, que se cierra o se abre dependiendo del nivel de la iluminación del objeto observado. El iris regula la cantidad de energía luminosa que pasa a través de las lentes.

La imagen se forma en la retina, que es la parte posterior del ojo. En la retina hay alrededor de unos 130 millones de células fotodetectoras que convierten la imagen en señales eléctricas proporcionales, que son conducidas a través de los nervios ópticos al cerebro. Allí las señales eléctricas son analizadas y se genera nuestra percepción de la imagen.

En la fóvea es donde se concentra la mayor cantidad de fotodetectores, y la separación de uno a otro es poco mayor que una longitud de onda. Además la potencia de definición o agudeza del ojo es muy grande. De hecho, de media, el ojo humano puede distinguir una línea de una anchura de 0,1mm a la distancia de lectura habitual de 250mm. Lo que corresponde a un ángulo de un minuto.

# B.0.6.1.2. Bastones y conos

La mayoría de las características de nuestra visión como agudeza, respuesta al color, amplitud del campo de sensibilidad y respuesta temporal, están determinadas por la compleja estructura de la retina. La superficie de la retina está cubierta por dos tipos de células fotodetectoras llamadas conos y bastones. Estas dos estructuras difieren en tres niveles básicos: sensibilidad, respuesta al color y localización.

Los bastones tienen una sensibilidad unas 1.000 veces superior a la de los conos. Los bastones nos proporcionan una visión a niveles muy bajos de luz (visión nocturna). Durante el día, los bastones están tan saturados con la luz diurna que no contribuyen a la percepción de la imagen. El amplio campo de sensibilidad de nuestra visión se debe a nuestros receptores de alta sensibilidad y de baja sensibilidad, junto con la actuación del iris.

La respuesta al color de los bastones es monocromática y máxima a 505nm que corresponde al color azul. Por lo que, de noche, todos los objetos parecen azules y los objetos rojos parecen casi negros. En contraste, los conos responden a tres colores: rojo, verde y azul. La sensibilidad relativa de las curvas de los tres tipos de conos se ve en la siguiente figura.



Fig. B.0.5: Sensibilidad al color de los conos.

El funcionamiento de los conos explica por qué las técnicas modernas de películas y televisión usan el rojo, el verde y el azul como colores primarios en vez del rojo, el amarillo y el azul usados por los artistas. Un increíblemente sofisticado proceso bioquímico determina como los conos responden al color. Este proceso es relativamente lento y afecta a la respuesta temporal del ojo (se verá en el apartado siguiente).

La tercera diferencia entre los conos y los bastones es su situación en la retina. Los conos se encuentran principalmente localizados en la fóvea, una superficie del tamaño aproximado de una cabeza de alfiler situado en el eje óptico del ojo. El eje óptico es una línea imaginaria a través del centro de la superficie de las dos lentes. Nuestra visión consigue su máxima resolución y la mejor respuesta al color en la fóvea. La concentración de conos es considerablemente menor en el resto del ojo, lo que explica por qué nuestra visión periférica es limitada. Los bastones están repartidos en una concentración mucho menor alrededor de la retina.

Los bastones y los conos convierten su respuesta luminosa en señales eléctricas en forma de un complejo código de tren de pulsos modulados, en vez de señales analógicas con una amplitud proporcional al estímulo luminoso. Los pulsos de los nervios son de amplitud constante de 0,1V y una duración de 1ms. La velocidad de repetición cambia y es proporcional al logaritmo del estímulo.

# B.0.6.2. Características de la visión humana

Una descripción completa de la visión humana involucraría la descripción de docenas de características. Aquí, sólo vamos a centrarnos en las características que son más importantes para el diseñador de dispositivos fotónicos: la amplitud de respuesta, la frecuencia de respuesta y el tiempo de respuesta de la visión humana. Tal y como dijimos en los apartados anteriores usaremos un lenguaje más habitual para electrónicos que para ópticos.

#### B.0.6.2.1. <u>Respuesta en amplitud</u>

En primer lugar, con respecto a la respuesta en amplitud, debemos decir que el ojo humano es un instrumento asombroso. Los bastones tienen una sensibilidad suficiente para responder a un solo fotón y el ojo es capaz de trabajar a niveles de densidad de radiación superiores a unos pocos kilovatios por metro cuadrado. Describiéndolo en términos de iluminación, el ojo puede operar a niveles desde la luz de las estrellas con 0,002lx hasta la luz brillante del sol de 100.000lx, lo que engloba un rango de amplitud de 1 a 50.000.000. El ojo no cubre sólo un rango tan increíblemente amplio, si no que es un instrumento que se autoajusta al nivel adecuado en cada situación.

Es fácil de entender que, para cubrir un rango tan amplio, una respuesta lineal es imposible. Por eso el ojo tiene una respuesta logarítmica. La consecuencia de ello es que el ojo no es un buen instrumento para juzgar niveles absolutos de iluminación, lo que explica por qué incluso los más experimentados fotógrafos no confían en sus ojos para corregir la exposición y siempre usan un fotómetro.

La situación es diferente cuando el ojo se usa para comparar niveles de iluminación que son parecidos unos a otros. Bajo esas condiciones, el ojo puede detectar diferencias de unas cuántas centésimas de lux. De hecho, las primeras medidas fotométricas realizadas con instrumentación usaron el ojo humano para contrastar la fiabilidad de las medidas tomadas por los aparatos. Esta condición también es importante en los visualizadores optoelectrónicos donde hay luces muy parecidas unas al lado de otras. Una diferencia de intensidad del 10% puede ser detectada fácilmente por el ojo humano.

# B.0.6.2.2. <u>Respuesta en frecuencia</u>

En lo que se refiere a la respuesta en frecuencia de la visión humana también es única Nuestros ojos no sólo responden a la amplitud de la radiación que reciben, si no que también lo hacen a la frecuencia de la señal interpretando las diferentes longitudes de onda como colores diferentes. El ojo es también un analizador de espectros de la radiación electromagnética en un rango de 400nm a 700nm.

La respuesta del ojo sobre estas longitudes de onda no es exactamente uniforme. Los conos responden a tres colores como ya se ha visto en la figura anterior.





Fig. B.0.6: C.I.E. Curvas de sensibilidad relativa estándar (Standard observer relative sensitivity curves).

De modo que la respuesta en frecuencia de nuestros ojos depende del nivel de iluminación, y lo definen dos curvas, una durante el día o visión fotópica y otra por la noche o visión escotópica. Estas curvas describen la sensibilidad relativa del ojo para diferentes longitudes de onda, normalizadas a la unidad para las longitudes de onda de máxima sensibilidad. Por ejemplo a 500nm la curva fotópica tiene un valor de 0,4, lo que significa que la respuesta visual (fotométrica) para el mismo estímulo radiómetrico o sea la misma potencia (W) es el 40% de la respuesta a 555nm.

La curva fotópica es extremadamente importante porque es la clave de la conversión de unidades radiométricas a fotométricas. Por este motivo la curva fotópica, que se ha estandarizado por la International Standards Organization (C.I.E.), tiene un nombre especial: C.I.E. Standard Observer Curve.

# B.0.6.2.3. <u>Respuesta temporal</u>

La tercera característica en la que nos fijamos es la respuesta temporal. Precisamente porque en la transmisión óptica de imágenes al cerebro intervienen reacciones químicas, la respuesta temporal del ojo humano es relativamente lenta. Hay dos tipos de respuesta que son interesantes para un diseñador optoelectrónico. Una es la capacidad del ojo de adaptarse de un nivel de iluminación alto a otro bajo, un proceso que se llama adaptación del ojo. El otro es la habilidad del ojo de responder a cambios rápidos en la iluminación, lo que llamamos respuesta al parpadeo.

La adaptación del ojo a la variación de los niveles de iluminación involucra un proceso que es lento y de naturaleza exponencial, con una constante de tiempo de 2 minutos para los conos y 6 minutos para los bastones. Este efecto es menor en los equipos optoelectrónicos. El efecto más importante es el parpadeo, que está definido por la frecuencia crítica de fusión (critical fusion frequency), definida como la menor frecuencia posible de una señal luminosa cuyo 50% del ciclo de trabajo hace que el ojo vea una luz estable. El ojo notará una variación de la luz que determinará el parpadeo de la luz a cualquier frecuencia inferior a la frecuencia crítica de fusión. En otras palabras, la detección del parpadeo es una medida de la inercia del ojo. La frecuencia crítica de fusión para la visión diurna es de 40Hz (40 destellos por segundo) y para los bastones está alrededor de 16Hz.

El parpadeo tiene un papel importante en muchos dispositivos ópticos. Por ejemplo, nuestra visión de una película o de la televisión como una fotografía en movimiento estable es posible gracias al parpadeo. En una película no advertimos el parpadeo, porque la película se mueve a una velocidad de 48 fotogramas por segundo aunque cada fotograma se proyecta dos veces y por lo que está por encima de la frecuencia de parpadeo.

Como muchos dispositivos optoelectrónicos usan el multiplexado y técnicas estroboscópicas, es muy importante que los diseñadores optoelectrónicos entiendan este efecto.

# **B.0.7.** Unidades radiométricas y fotométricas y sus relaciones

Una fuente radiante emite energía electromagnética en el espacio, generando un campo de energía. Las disciplinas de radiometría y fotometría exploran y estudian este campo de energía definiendo las unidades y cantidades que lo describen, desarrollando las relaciones que existen entre estas unidades e introduciendo métodos e instrumentos para las medidas radiométricas y fotométricas.

Antes de introducir las unidades radiométricas vamos a repasar el concepto de ángulo sólido, también llamado campo angular.

# **B.0.7.1.** El ángulo sólido

La fotometría y la radiometría trabajan con la distribución de la energía electromagnética en el espacio. Por eso necesitamos medir la distribución. El ángulo sólido es una cantidad geométrica que nos permite hacerlo.

En una superficie de dos dimensiones, un ángulo se suele medir en grados, donde un grado es igual a una parte entre 360 de un círculo. En la actualidad se usa una unidad más sencilla de definir que es el radian. La definición de radián se observa en la siguiente figura junto a la definición de ángulo sólido. Un círculo completo de 360 grados corresponde a  $2\pi$  radianes y un radian es igual a 57,29578°.



Fig. B.0.7: Definición de radián y estereorradián.

El mismo principio puede usarse para medir la distribución en el espacio. La unidad de medida del ángulo sólido  $\omega$  es el estereorradián. El ángulo sólido se define como:

$$\omega = \frac{A}{r^2} \tag{B.0.4}$$

donde  $\omega$ : ángulo sólido en estereorradianes o sr, A: área de la superficie de la esfera, r: radio de la esfera.

El estereorradián es adimensional y el campo máximo alrededor de un punto o el máximo valor del ángulo sólido es:

$$\omega_{\text{max}} = \frac{A_{\text{esfera}}}{r^2} = 4\pi \tag{B.0.5}$$

El ángulo sólido se usa normalmente para calcular el acoplamiento entre fuente y receptor. Un ejemplo típico, que se muestra en la siguiente figura, podría ser encontrar la potencia emitida por una fuente puntual S a un receptor de área A.



Fig. B.0.8: Acoplamiento fuente-receptor.

El acoplamiento depende del ángulo sólido de la fuente S en el área A. Para calcular el ángulo sólido, necesitamos conocer el área esférica en la superficie del receptor ( $A_S$ ). En la mayoría de los casos conocemos el área plana en la superficie del receptor ( $A_P$ ). Obviamente se introduce un pequeño error cuando usamos una superficie o área plana, en lugar de una superficie esférica pero simplifica los cálculos.





$$\omega = \frac{A_s}{r^2} = 2 \cdot \pi \cdot (1 - \cos \theta)$$
(B.0.6)

Este es el valor correcto del campo angular. Cuando usamos un área plana  $A_P$  para el cálculo, el ángulo sólido aproximado  $\omega$ ' vale:

 $\omega' = \pi \tan^2 \theta$ 

(B.0.7)

que es mayor que el valor correcto. Calculando el valor máximo de  $\theta$  para un error de 1% y del 10%, encontramos que el método simplificado nos da un error inferior al 1% cuando  $\theta < 6,59^{\circ}$  o 0,0415rad y es menor del 10% cuando  $\theta < 20,15^{\circ}$  o 0,385rad. Para un rango de ángulos de conos mayor debemos usar el valor correcto de la ecuación exacta.

# B.0.7.2. Flujo radiométrico y fotométrico

Una fuente radiante emite energía electromagnética en el espacio, generando un campo energético. Las disciplinas de la radiometría y la fotometría exploran y estudian este campo de energía definiendo unidades y cantidades que lo describen, desarrollando las relaciones entre estas unidades e introduciendo métodos e instrumentación para la medida de cantidades radiométricas y fotométricas.

En física el término flujo a menudo se usa para describir un fenómeno de flujo o una condición de un campo que ocurre en el espacio. El flujo se muestra con líneas de campo alrededor del origen mostrando la dirección y amplitud de un campo con ellas. La dirección en cualquier punto del espacio está indicada por la dirección de la línea de fuerza; la magnitud o intensidad está indicada por la densidad de las líneas. El flujo radiométrico representa el número de fotones emitido por la fuente por segundo. Como cada fotón es un cuanto de energía, esto equivale a un flujo energético por unidad de tiempo. Por tanto representa la potencia emitida por la fuente.

El símbolo para el flujo es  $\phi$ ; el símbolo para el flujo radiométrico es  $\phi_R$  y para el flujo fotométrico es  $\phi_P$ . En algunas ecuaciones de este texto veremos que los subíndices de  $\phi_R$  y  $\phi_P$  se omiten, esto significa que la ecuación será aplicable tanto en expresiones de radiometría como de fotometría.

La unidad de medida para el flujo radiométrico es el vatio (W), para el flujo fotométrico la unidad de medida es el lumen (lm).

La potencia o el flujo medido en vatios no necesitan explicación. El lumen, sin embargo, necesita una pequeña aclaración. Las unidades fotométricas describen el efecto psico-físico de la radiación en el ojo humano, es decir miden cómo vemos la luz. La respuesta del ojo depende de la longitud de onda que estamos viendo. Por tanto, para formular una única definición de lumen, no sólo tenemos que establecer una relación entre potencia radiométrica y respuesta fotométrica, si no que también tendremos que determinar la longitud de onda en la que se hizo la observación. Considerando estos factores, el lumen, de acuerdo con el estándar C.I.E. se define como: a 555nm, en el pico de respuesta de la sensibilidad fotópica, 1 vatio de flujo radiométrico produce 683 lumens de flujo fotométrico, o:

$$1 \text{ lumen} = 1/683 \text{ W}$$
 a 555nm (B.0.8)

También se puede definir el lumen a través de la mecánica cuántica; esto es, en términos de flujo de fotones y energía del fotón. La energía del fotón (E) a 555nm es:

$$E = hf = hc/\lambda = 3,582 \text{ x } 10^{-19} \text{J} \equiv \text{Energia de un fotón a 555nm}$$
(B.0.9)

donde h: cte. de Planck  $(6,626 \cdot 10^{-34} \text{J} \cdot \text{s})$ , f: frecuencia de la radiación, c: velocidad de la luz  $(3 \cdot 10^8 \text{m/s})$  y  $\lambda$ : longitud de onda de la radiación (m).

Por tanto para un flujo de 1 lumen, el flujo de fotones equivalente para una longitud de onda de 555nm es:

n = 
$$\frac{\frac{1}{683}W}{3,582 \cdot 10^{-19}J}$$
 = 4,087 x 10<sup>15</sup> fotones/s (B.0.10)

Esta definición junto con al C.I.E. Standard Observer Curve, nos permite convertir cualquier flujo radiométrico en flujo fotométrico o luminosidad usando un factor de conversión llamado eficiencia.

# B.0.7.3. Eficiencia y conversión de flujo radiométrico en flujo fotométrico

Eficiencia se define como la relación entre el flujo fotométrico o luminosidad respecto al flujo total radiométrico emitido por la fuente:

$$K = \frac{\phi_{\rm P}}{\phi_{\rm R}} \tag{B.0.11}$$

donde K: eficiencia (lm/W),  $\phi_P$ : flujo fotométrico (lm),  $\phi_R$ : flujo radiométrico (W)

*Conversión.* Se puede convertir radiación monocromática en flujo fotométrico usando el C.E.I. Standard Observer Curve. Eficiencia en este caso se designa por  $K_{\lambda}$  y, en dicho caso,  $\phi_P = \phi_R K_{\lambda}$ .  $K_{\lambda}$  se calcula de la siguiente manera:

$$\mathbf{K}_{\lambda} = \mathbf{V}_{\lambda} \cdot 683 \tag{B.0.12}$$

donde  $K_{\lambda}$ : eficiencia a la longitud de onda  $\lambda$  en lm/W,  $V_{\lambda}$ : sensibilidad relativa del ojo a la longitud de onda  $\lambda$  (obtenida del C.E.I. Standard Observer Curve).

Por ejemplo, la sensibilidad relativa del ojo para la luz verde a 520nm es  $V_{\lambda} = 0,71$ . Por tanto, la eficiencia para esta longitud de onda es  $K_{\lambda} = V_{\lambda} \cdot 683 = 0,71 \cdot 683 = 484,9 \text{ lm/W}.$ 

#### B.0.7.3.1. Eficiencia de los radiadores térmicos

Las fuentes calientes de luz más comunes son los radiadores térmicos. También conocidos en física como los cuerpos negros radiantes. Prácticamente todo metal caliente, incluyendo el filamento de tungsteno, produce un espectro de radiación continuo de cuerpo negro. Su patrón de radiación espectral depende de la temperatura del radiador. Algunos patrones de radiación de cuerpo negro los podemos ver en la siguiente figura. Aquí podemos ver que los radiadores de baja temperatura emiten más rojo, y a altas temperaturas los radiadores emiten más en longitudes de onda azules. Así, la luz radiada depende de la temperatura del cuerpo negro. Por este motivo, el término temperatura de color, que se expresa en Kelvin, se usa para identificar a los radiadores térmicos. Para una determinada temperatura de color, el patrón de radiación de la fuente está bien definido y su correspondiente eficiencia puede calcularse.



Fig. B.0.10: Espectro de radiación de un cuerpo negro.

En la siguiente figura se observa que para la temperatura de color de 6.000K, la eficiencia alcanza un máximo ya que a esa temperatura el máximo del patrón de radiación se encuentra en el rango visible. Para otras temperaturas este máximo está por debajo o por encima de este rango.



Fig. B.0.11: Eficiencia de cuerpo negro radiante (black body radiator).

Cuando se conoce el patrón de radiación de una fuente, su flujo fotométrico (luminosidad de salida) y eficiencia pueden calcularse con la Standard Observer Curve. Esto se simplifica en gran medida si la fuente de luz no tiene un espectro continuo si no un espectro discreto, va que permite calcular la conversión de flujo radiométrico a fotométrico para cada línea del espectro y sumar el flujo total. Si el espectro es continuo el cálculo es mucho más complicado.

Así por ejemplo una lámpara de mercurio no emite un espectro continuo sino que radia únicamente en determinadas direcciones de onda discretas (ver tabla). Se puede calcular el flujo fotométrico a partir del radiométrico utilizando la siguiente expresión:

$$\phi_{\rm P} = \phi_{\rm R} \, K_{\lambda} \tag{B.0.13}$$

*Tema B.0*: Introducción

En la siguiente tabla se muestra el cálculo realizado para cada una de las líneas del espectro de una lámpara de vapor de mercurio de 1.000W.

λ [nm]	Flujo radiante	Sensibilidad del ojo	Eficiencia espectral	Flujo luminoso
	<b>φ</b> <sub>R</sub> [ <b>W</b> ]	V <sub>λ</sub>	$K_{\lambda} = V_{\lambda} 683 \text{ [lm/W]}$	$\phi_{\rm P} = \phi_{\rm R}  \mathbf{K}_{\lambda}  [\mathrm{lm}]$
365	78	0,000	0,00	0
408	45	0,001	0,68	31
436	70	0,019	13,00	908
546	85	0,978	668,00	56.778
578	96	0,886	605,10	58.090

La mayor parte de la radiación de esta lámpara está fuera del espectro visible. Considerando que la bombilla radia sobre el 90% de la potencia que se le suministra (900W), podemos calcular la eficiencia total de la fuente, sabiendo que el flujo fotométrico es la suma de los flujos fotométricos de cada una de las líneas:

$$K = \frac{\phi_{P}}{\phi_{R}} = \frac{115.807}{900} = 128,7 \frac{\text{lm}}{\text{W}}$$
(B.0.14)

La bombilla de mercurio tiene una eficiencia mayor que las fuentes de luz fluorescentes e incandescentes y por esta razón se usa para iluminar las vías públicas a pesar de su desagradable color característico.

#### **B.0.7.4.** Energía radiométrica y fotométrica

Energía es el producto de la potencia por el tiempo. De modo que, la energía radiométrica es:

$$N_R = \phi_R t [W \cdot h] \tag{B.0.15}$$

donde N<sub>R</sub>: energía radiométrica, t: tiempo.

De igual manera la energía fotométrica es:

$$N_P = \phi_P t [lm \cdot h] \tag{B.0.16}$$

donde N<sub>P</sub>: energía fotométrica, t: tiempo.

Una gran parte de nuestra factura de la luz se usa para pagar la energía fotométrica. Una generación eficiente de esta energía puede proporcionarnos un considerable ahorro. Esta es una de las razones por las que se utilizan tubos fluorescentes en vez de bombillas en locales públicos.

# B.0.7.5. Intensidad radiométrica y fotométrica

#### B.0.7.5.1. Definición de términos

Las intensidades radiométrica y fotométrica describen la distribución del flujo en el espacio y se definen de la siguiente manera:

Intensidad radiométrica  $(I_R)$  es la densidad de flujo radiométrico por estereorradián, expresado en vatios por estereorradián (W/sr):

$$I_{R} = \frac{\phi_{R}}{\omega} [W/sr]$$
(B.0.17)

Intensidad luminosa o fotométrica  $(I_P)$  es la densidad de flujo luminoso por estereorradián, expresado en candelas (cd):

$$I_{\rm P} = \frac{\phi_{\rm P}}{\omega} \,[\rm cd] \tag{B.0.18}$$

Una candela es igual a la densidad de flujo luminoso de un lumen por estereorradián. Realmente, la definición correcta de intensidad radiante/lumínica es I=d $\phi$ /d $\omega$ . Por lo tanto, las

ecuaciones simplificadas se aplican sólo cuando la distribución de flujo sobre el campo angular es uniforme. Esta suposición de uniformidad es cierta principalmente cuando el campo angular es pequeño.

Veamos una pequeña introducción histórica sobre la candela. Candela es una palabra italiana que literalmente significa candela = vela para alumbrar. No hace mucho, la intensidad luminosa era la unidad fotométrica primaria de la que se derivaban todas las demás unidades afines. Durante el siglo diecinueve, una candela actual (vela) era el estándar, pero debido a su escasa repetibilidad, el estándar se basó en la llama de un candil (una lámpara) de aceite, llamado **lámpara de Heffner**, que, a su vez, fue remplazada por una bombilla eléctrica, y más recientemente se remplazó por un horno de platino incandescente a temperatura controlada. El problema con todos estos estándares era que cada uno tenía una mezcla diferente de longitudes de onda (ver información sobre la temperatura de color) lo que las hacía difíciles de comparar. Por lo que cuando los avances en electrónica hicieron posible la medida precisa de flujos, el estándar fotométrico se redefinió a partir de la candela como el flujo a 555nm y el C.I.E. Standard Observer Curve, que explica el por qué de ese factor de conversión tan extraño -683 lúmenes por vatio-.

# B.0.7.5.2. Intensidad radiométrica

La unidad de medida de intensidad radiométrica se usa para caracterizar fuentes de radiación, especialmente la distribución del flujo desde la fuente. Es apropiada para fuentes de radiación con un área (fuente puntual) relativamente pequeña. Para fuentes con un área grande, como un tubo fluorescente, el cálculo es algo más complejo.

Como el término implica, esta unidad define la densidad de flujo emitido por la fuente. En el rango visual, describe la luminosidad (el brillo) de la fuente. Una bombilla de 100W para iluminación y una bombilla de 100W de faro delantero de automóvil, proporcionan el mismo flujo radiométrico. Sin embargo, la bombilla de faro tiene una intensidad deslumbrante porque su flujo está concentrado en un ángulo sólido mucho más pequeño.



Fig. B.0.12: (a) Angulo sólido de radiación de una bombilla de iluminación. (b) Patrón de radiación de una bombilla de faro de automóvil.

#### B.0.7.5.3. Intensidad luminosa

Definitivamente nuestro ojo nota la diferencia de intensidad luminosa, lo que nosotros conocemos como brillo. Una fuente que tiene el doble de intensidad luminosa que otra, sin embargo, no se ve el doble de brillante debido a la respuesta logarítmica de nuestros ojos ante una excitación luminosa.

En la siguiente tabla se muestran las intensidades luminosas típicas de algunas de las fuentes más usuales.

Intensidades luminosas típicas de algunas de las fuentes más usuales.

Fuente	Intensidad Luminosa
LED normal	2mcd
LED súper luminiscente	120mcd
Bombilla incandescente de 100W	150cd
Luz larga de automóvil	100.000cd
Faro	300.000cd

Para describir la intensidad radiante se utiliza una gráfica que la representa. La intensidad radiante es una herramienta muy útil para caracterizar una fuente y si se mide la intensidad de la fuente en todas direcciones se podrá describir con bastante precisión el patrón de radiación de esa fuente. Como la mayoría de las fuentes tienen una simetría rotacional alrededor de su eje central, podemos hacer las medidas y dibujarlas en un plano, generando así la gráfica de radiación. Se suelen utilizar los perfiles de radiación polar y de radiación lineal. En las siguientes figuras se muestran algunos perfiles de radiación.



Fig. B.0.13: Flujo y perfiles de intensidad de una vela.

El perfil indica la intensidad radiante en la dirección del ángulo  $\theta$  medido desde el eje de simetría. La escala de la intensidad puede estar en candelas, pero es más habitual expresarla en una escala relativa, donde la intensidad máxima está normalizada a la unidad (o 100%), y las intensidades en todas direcciones están referidas a ella. Este último es con mucho el método más práctico, ya que el perfil correspondiente a menudo depende del tipo de reflector o lámpara en el que está montada la fuente y no depende de los valores absolutos de intensidad de la fuente. En la siguiente figura se muestra esta dependencia con los montajes de los perfiles de radiación.



Fig. B.0.14: Perfiles de intensidad para algunos soportes de bombillas.

La forma polar es la más descriptiva de los patrones de radiación, pero la forma lineal es la más ampliamente usada porque el flujo total de la fuente es más fácil de calcular a partir de una gráfica lineal.

#### B.0.7.6. Perfiles habituales de radiación en optoelectrónica

En la siguiente figura tenemos tres perfiles especiales que merecen una mayor atención porque tienen múltiples aplicaciones en optoelectrónica.



Fig. B.0.15: Perfiles de intensidad de las fuentes típicas en optoelectrónica.

B.0-22

Además siendo habituales en aplicaciones optoelectrónicas, estas fuentes también tienen una ventaja importante: La forma de su perfil de radiación puede describirse en términos matemáticos y analizarse matemáticamente. Tener un buen modelo matemático para el patrón de radiación es importante porque permite calcular el flujo total de la fuente a partir del patrón de radiación.

#### B.0.7.6.1. Fuente puntual

La fuente puntual, como hemos visto en la figura anterior, es la fuente más habitual: un pequeño filamento en un envoltorio transparente es un ejemplo típico. Esta fuente radia con igual intensidad en todas direcciones:

$$I_{\theta} = I_0 = \text{constante}$$
(B.0.19)

donde  $I_{\theta}$ : intensidad en la dirección del ángulo  $\theta$ ,  $I_0$ : intensidad en la dirección de los ejes de simetría.

#### B.0.7.6.2. Fuente lambertiana

La segunda fuente, dibujada en la figura anterior, se llama fuente lambertiana, llamada así por el científico francés Johann Lambert. Este tipo de perfil se genera cuando la luz atraviesa un material transparente que la difunde, o es reflejada desde una superficie rugosa. La luz en este caso se difunde de acuerdo con la ley del coseno de Lambert:

$$I_{\theta} = I_0 \cos\theta \tag{B.0.20}$$

El perfil de radiación de acuerdo con esta ecuación es un círculo. Comparando este perfil con el de la fuente puntual, podemos ver que el campo de radiación es más estrecho. Toda la radiación está dirigida sólo para ángulos entre  $\theta=0^{\circ}$  a  $\theta=90^{\circ}$  (en realidad la radiación va dirigida entre  $-180^{\circ}$  y 180°, pero la simetría respecto al eje central -debida a la simetría de la función coseno- permite restringir su estudio entre 0° y 90°). La direccionalidad del patrón de radiación es la clave característica de este patrón. Para medir la anchura del campo, se ha desarrollado un término especial: el ángulo  $\theta_{1/2}$ . Éste es el ángulo  $\theta$  para el que la intensidad ha disminuido a la mitad. Cuanto menor es el ángulo medio, más estrecho y más puntual es el patrón de radiación.

En el caso del patrón lambertiano, el ángulo  $\theta_{1/2}$  es:

$$I_{\theta} = 0.5 I_0 = I_0 \cos\theta \tag{B.0.21}$$

de aquí

VNIVERSITAT (Or Escola Tècnica Superior d'Enginyeria

Tema B.0: Introducción

$$\theta_{1/2} = \arccos 0.5 = 60^{\circ}$$
 (B.0.22)

#### B.0.7.6.3. Fuente de intensidad exponencial

La fuente de intensidad exponencial, cuyo patrón de radiación se aproxima al haz de un LED, tiene un perfil definido por la siguiente expresión matemática:

$$I_{\theta} = I_0 \cos^n \theta \tag{B.0.23}$$

donde n: exponente del patrón de radiación.

Aquí el ángulo medio es,

$$\theta_{1/2} = \arccos 0.5^{1/n}$$
 (B.0.24)

Usando el valor adecuado para el exponente n, se pueden obtener con bastante exactitud los perfiles más usuales de los LED. El exponente n puede calcularse fácilmente a partir del conocimiento de  $\theta_{1/2}$ ,

$$n = \left| \frac{0,301}{\log(\cos \theta_{1/2})} \right|$$
(B.0.25)

#### B.0.7.7. Relaciones entre intensidad radiante y flujo

Un ingeniero optoelectrónico debe poder controlar y manipular el flujo radiante. Desgraciadamente la medida del flujo, especialmente sobre un espacio amplio, es bastante difícil. Por el contrario la medida de la intensidad es sencilla. Por este motivo muchas fuentes optoelectrónicas se especifican por su intensidad en vez de por su flujo, que es lo más importante. El derivar el flujo a partir de un cierto perfil de intensidad es algo habitual. Como veremos a continuación, esta transformación es sencilla para una fuente que tiene un patrón de radiación que tenga una simetría rotacional, es decir, la fuente tiene un eje central alrededor del cual el perfil de radiación permanece invariante cuando se rota. Afortunadamente la mayoría de las fuentes cumplen esta característica.

#### B.0.7.7.1. Determinación del flujo en un caso sencillo

Encontrar el flujo total o parcial para un cono es cuestión de hacer una integral, como vemos en la siguiente figura.



Fig. B.0.16: Cálculo del flujo a partir de un perfil de intensidad.

El flujo en una porción de cono d $\theta$  es:

$$d\phi = I_{\theta} d\omega \tag{B.0.26}$$

donde,

$$d\omega = \frac{dA}{I_{\theta}^2} = 2\pi r \ d\theta \frac{I_{\theta}}{I_{\theta}^2}$$
(B.0.27)

Como r=I<sub> $\theta$ </sub> sin $\theta$ , el flujo en la porción de cono es:

$$d\phi = I_{\theta} d\omega = I_{\theta} 2 \pi \sin\theta d\theta \qquad (B.0.28)$$

Así el flujo total en un ángulo  $\theta$  es:

$$\phi_{\theta} = \int_{0}^{\theta} d\phi = \int_{0}^{\theta} I_{\theta} 2\pi \sin \theta d\theta = 2\pi \int_{0}^{\theta} I_{\theta} \sin \theta d\theta$$
(B.0.29)

Sólo podremos resolver la integral si conocemos la expresión matemática de  $I_{\theta}$ .

Se han realizado cálculos similares para fuentes puntuales o para fuentes con perfiles de intensidad exponencial. Los resultados están recopilados en la siguiente tabla. Además del flujo total, se han calculado el flujo con un ángulo límite  $\theta$  y el flujo para el ángulo medio  $\theta_{1/2}$ .

Esta tabla contiene toda la información necesaria para trabajar con las fuentes más usuales y sirve para resolver la mayoría de los problemas de flujo.

Ecuaciones de flujo para fuentes comunes					
Fuente	Perfil de intensidad	Ángulo mitad	Flujo dependiendo del ángulo θ	Flujo total	
Puntual	$I_{\theta} = I_0$	-	$2\pi I_0(1-\cos\theta)$	$4\pi I_0$	
Lambertiana	$I_{\theta} = I_0 \cos \theta$	60°	$\pi I_0 \sin^2 \theta$	$\pi \mathrm{I}_{\mathrm{0}}$	
Exponente n	$I_{\theta} = I_0 \cos^n \theta$	arccos $0,5^{1/n}$	$\frac{2\pi I_0(1-\cos^{n+1}\theta)}{1-\cos^{n+1}\theta}$	$\frac{2\pi I_0}{n+1}$	
			n+1	11 + 1	

#### B.0.7.7.2. Determinación del flujo en un caso complejo

El problema se complica cuando el perfil de intensidad tiene una forma que no puede describirse con una simple ecuación matemática. En este caso, es necesario utilizar un método numérico para realizar la integración y encontrar el flujo total o parcial. En la integración numérica, el flujo en una porción cónica d $\theta$  que vale d $\phi = I_{\theta} 2 \pi \sin\theta d\theta$  se reemplaza por la expresión  $\Delta \phi = I_{\theta} 2 \pi \sin\theta \Delta \theta$ , donde  $\Delta \phi$  representa el flujo emitido en la porción con una anchura  $\Delta \theta$  en el ángulo  $\theta$ . Usando el perfil de intensidad lineal, dividimos el ángulo  $\theta$  en porcións de anchura  $\Delta \theta$ . I<sub> $\theta$ </sub> para cada porción puede leerse sobre el perfil, y el flujo en la porción  $\Delta \phi$  calcularse y sumarlo al flujo total. El procedimiento está descrito gráficamente en la siguiente figura, que nos muestra el cálculo del flujo total mediante integración numérica, de un LED HP HLMP-135 con un perfil de intensidad I<sub> $\theta$ </sub> = I<sub>0</sub> cos<sup>6</sup> $\theta$  (aunque en este caso no haría falta utilizar integración numérica pues tiene una ecuación matemática descriptora).



Fig. B.0.17: Cálculo del flujo a través de la integración numérica.

#### B.0.7.8. Función de la transferencia óptica y apertura numérica

En un diseño se debe controlar el flujo radiante para dirigirlo de una fuente a un receptor de la manera más eficiente posible. En muchos casos, lo que se pretende es acoplar tanto flujo como se pueda de una fuente a un receptor. La función de transferencia óptica (OTF, Optical Transfer Function) es un término que expresa la eficiencia del acoplamiento; la apertura numérica (NA, Numerical Aperture) es un término que se usa para calcular el OTF. Estrictamente hablando, ninguno de estos conceptos pertenece a la discusión de unidades y relaciones radiométricas y fotométricas pero se utilizan en la distribución de flujo.

OTF se define como:

$$OTF = \frac{\phi_r}{\phi_s}$$
(B.0.30)

donde  $\phi_s$ : flujo total de una fuente,  $\phi_r$ : flujo asociado al receptor (no confundir con  $\phi_P$  y  $\phi_R$ ).

El OTF es una cantidad adimensional con un rango de 0 a 1. Cero significa que no hay flujo procedente de la fuente en el receptor; 1 significa que todo el flujo de la fuente se acopla al receptor.

# B.0.7.8.1. <u>Cálculo del OTF</u>

En casos donde el perfil de intensidad polar del emisor es conocido, OTF puede calcularse rápidamente usando las ecuaciones que hemos dado anteriormente.

Para una fuente con un perfil  $I_{\theta}=I_0\cos^n\theta$ , el OTF puede calcularse fácilmente a partir del ángulo de acoplo  $\theta$ :

$$OTF = 1 - \cos^{n+1}\theta \tag{B.0.31}$$

El cálculo del OTF es uno de los más frecuentes en el diseño optoelectrónico. Para simplificar los cálculos, se usa la apertura numérica (Numerical Aperture)

$$NA = \sin\theta \tag{B.0.32}$$

donde  $\theta$  es la mitad del ángulo del cono del receptor (grados o radianes).

La apertura numérica también es una cantidad adimensional que puede tomar valores entre 0 y 1. Como para ángulos pequeños el seno y el ángulo en radianes son prácticamente iguales, el valor aproximado de la apertura numérica puede calcularse a través de la ecuación simplificada:

$$NA \approx \frac{D}{2 \cdot d}$$
(B.0.33)

donde D es el diámetro de un receptor circular, d: Distancia de la fuente al receptor.

Cuando el ángulo es menor de 8°, el error en el cálculo es inferior al 1%, lo que representa una aproximación bastante aceptable. También hay casos en que la apertura numérica tiene que calcularse para un área circular del receptor como:

$$NA = \frac{\sqrt{\frac{A}{\pi}}}{d} \tag{B.0.34}$$

donde A es el área circular del receptor (m<sup>2</sup>).



Fig. B.0.18: Acoplamiento fuente-receptor.

La principal aplicación para la apertura numérica es la simplificación del cálculo de la función de transferencia óptica. Es especialmente útil en el caso de una fuente con un perfil Lambertiano en cuyo caso vale,

$$OTF = \frac{\phi_{\theta}}{\phi_{TOT}} = \frac{I_0 \cdot \pi \cdot \sin^2 \theta}{I_0 \cdot \pi} = \sin^2 \theta = (NA)^2$$
(B.0.35)

Para una fuente puntual,

$$OTF = \frac{\phi_{\theta}}{\phi_{TOT}} = \frac{I_0 \cdot 2 \cdot \pi \cdot (1 - \cos \theta)}{4 \cdot I_0 \cdot \pi} = \frac{(1 - \cos \theta)}{2} = \sin^2 \left(\frac{\theta}{2}\right)$$
(B.0.36)

Para un ángulo pequeño,

$$\sin\!\left(\frac{\theta}{2}\right) \approx \frac{\sin(\theta)}{2}$$

por lo que

$$OTF = \frac{(NA)^2}{4} \tag{B.0.37}$$

Las fuentes con un perfil  $I_{\theta} = I_0 \cos^n \theta$  no permiten la simplificación del cálculo usando la apertura numérica.

Como regla en la mayoría de las aplicaciones optoelectrónicas se pretende conseguir el uso más eficiente del flujo radiante. De modo que obtener el máximo OTF es el objetivo a

conseguir por el diseñador. El conseguir el mayor OTF posible implica aumentar la NA, que está determinada por las dimensiones del área del receptor y la distancia entre la fuente y el receptor. A menudo hay limitaciones físicas que limitan sus valores. No obstante, usando las lentes adecuadas entre el receptor y el emisor, se puede aumentar el OTF.

# B.0.7.9. Incidencia radiante e iluminación

#### B.0.7.9.1. Definición de términos

La intensidad radiante define la distribución de flujo en el espacio, su distribución en una superficie es la incidencia radiante ( $E_R$ , radiant incidance):

$$E_{R} = \frac{\phi_{R}}{A} \tag{B.0.38}$$

donde  $E_R$ : incidencia radiante (W/m<sup>2</sup>),  $\phi_R$ : flujo radiante (W), A: área de la distribución de flujo (m<sup>2</sup>).

Esta definición asume que el flujo está uniformemente distribuido sobre el área.

En el caso del flujo luminoso la cantidad se llama iluminación ( $E_P$ , illuminance) y se le aplica la misma definición, excepto que la iluminación tiene asignada una unidad especial, el lux (lx). Así,

$$E_{p} = \frac{\phi_{p}}{A} \tag{B.0.39}$$

donde E<sub>P</sub>: iluminación [lm/m<sup>2</sup>  $\circ$  lux],  $\phi_P$ : flujo luminoso.

El lux es una iluminación en la que un lumen de flujo luminoso es distribuido uniformemente sobre un área de un metro cuadrado.

Además de lux, el pie-candela (fc, foot-candle) se usa habitualmente como unidad para la iluminación, especialmente entre ingenieros de iluminación. El pie-candela es una antigua unidad inglesa y es la iluminación de un lumen de flujo luminoso distribuido uniformemente en un área de un pie cuadrado.

1 lux=0,0929 pie-candelas

# B.0.7.9.2. <u>Medida de la iluminación</u>

La iluminación indica la distribución de flujo sobre un área. Es el término que define la visibilidad de los objetos: un cirujano necesita más iluminación que la que se necesita en un parking. Su función es hacer visibles los objetos y crear impresiones visuales. La siguiente tabla muestra las iluminaciones típicas de algunos lugares y condiciones usuales.

Esta tabla no sólo muestra la diversidad de la iluminación, también muestra la adaptación de la visión humana, ya que somos capaces de responder a todas las situaciones que se muestran en ella.

Condición	Iluminación [lx]
Luz solar	100.000
Día nublado	1.000
Visualizador publicitario	1.000
Zona de lectura	500
Aparcamiento	50
Luz de luna	0,4
Luz de las estrellas	0,002

Niveles de iluminación típicos

La iluminación es una de las cantidades fotométricas más sencillas de medir. Para medir este parámetro se necesita un luxómetro. El luxómetro se sitúa en la superficie a medir con el área sensora del luxómetro encarada a la fuente luminosa y la iluminación se lee en el indicador analógico o digital del luxómetro. Un luxómetro es fácil de diseñar: en el caso más simple sólo se necesita un fotodiodo y un microamperímetro.

La medida de la iluminación es una de las funciones optométricas más habituales y fácil de realizar, y a partir de ella se pueden obtener otras cantidades radiométricas y optométricas, por ejemplo el flujo que incide sobre un área,

$$\phi = E A \tag{B.0.40}$$

# B.0.7.9.3. <u>Relaciones entre medidas</u>

Las relaciones entre incidencia o iluminación e intensidad radiante para una fuente puntual las vemos en la siguiente figura.



Fig. B.0.19: Iluminación desde una fuente puntual.

La iluminación de una superficie A es:

$$E = \frac{\phi_s}{A} \tag{B.0.41}$$

donde  $\phi_s$ : flujo desde la fuente, A: área de la superficie.

El flujo  $\phi_s$  para un ángulo sólido  $\omega$  dado que  $I_0 = (\phi_s/\omega)$  viene dado por la expresión:

$$\phi_{s} = I_{0} \cdot \omega = I_{0} \cdot \frac{A'}{d^{2}} = I_{0} \cdot \frac{A \cdot \cos\alpha}{d^{2}}$$
(B.0.42)

Así,

$$E = \frac{I_0 \cdot \cos\alpha}{d^2}$$
(B.0.43)

donde d: distancia de fuente a superficie (m),  $\alpha$ : ángulo entre el rayo de luz y la superficie normal, I<sub>0</sub>: intensidad de la fuente puntual (W/sr ó cd).

En el caso de que el flujo de la fuente sea perpendicular a la superficie  $\cos\alpha=1$  y se tiene que:

$$E = \frac{I_0}{d^2}$$
 (B.0.44)

Donde E: incidencia o iluminación (W/m<sup>2</sup> ó lx).

La incidencia o iluminación es proporcional a la fuente de intensidad e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia entre la fuente y la superficie. La ecuación es especialmente importante porque nos da una relación simple entre la intensidad y la incidencia o iluminación. Lo que nos permite obtener el valor de la intensidad a partir de la medida de la incidencia o iluminación y la distancia. La ecuación se aplica a condiciones donde el área de la fuente es pequeña comparada con la distancia d, que es la distancia en la que la fuente se comporta como una fuente puntual. El hecho de que la iluminación decrezca proporcionalmente con el cuadrado de la distancia es bastante importante. Nos indica que desde el punto de vista de un acoplamiento eficiente, la fuente y el receptor deberían estar lo más cerca posible.

#### **B.0.7.10.** Esterancia radiante y luminancia.

El aspecto más importante de la radiación, especialmente en la radiación en el espectro visible, es el hecho de que nos permite ver los objetos. En realidad, lo que vemos no es el flujo luminoso de la fuente, no es la iluminación o la intensidad del flujo sobre la superficie, si no el flujo que se refleja o radia desde la fuente y es captado por nuestro ojo. En este sentido llamaremos "fuente extendida" cuando se de el primero de los casos y lo que veamos sea el flujo reflejado en dicha fuente. Esta reflexión o radiación nos permite identificar los objetos por su brillo, color y estructura de la superficie. Esta reflexión o radiación se llama esterancia radiante (L<sub>R</sub>, radiant sterance) o, en el caso de la luz visible la luminancia (L<sub>p</sub>, luminance). De hecho la mayoría de los dispositivos ópticos que usan lentes incluyendo el ojo humano, responden a la luminancia o esterancia. Cuando fotografiamos una escena con una cámara cargada con una película en blanco y negro, grabamos la luminancia de los objetos de la escena. A menudo este término es intercambiable con el término brillo. Los términos son bastante similares, la diferencia está en que el brillo se refiere a la respuesta psico-física de nuestro ojo y nuestro cerebro a la luminosidad, que es logarítmica en vez de lineal.

# B.0.7.10.1. Medidas de esterancia radiante y luminancia

Las unidades de medida para la esterancia radiante y la luminancia son:

esterancia radiante, (L<sub>R</sub>): W/sr/m<sup>2</sup>

luminancia, (L<sub>P</sub>): cd/m<sup>2</sup> o lm/sr/m<sup>2</sup>

Las unidades son parecidas a la intensidad, que se mide en W/sr o lm/sr y que se describe también como el "brillo" de una fuente puntual. El término luminancia o esterancia radiante lleva esta idea a una superficie emisora o reflectante más amplia, o "fuente extendida" como se ha comentado anteriormente. Por eso se definen como "brillo por área".

#### B.0.7.10.2. Luminancia de una superficie.

La pregunta de cuánto "brilla" o cuánta luminancia tiene una superficie iluminada A para un observador situado en O se contestaría de la siguiente manera. Primero, consideremos el caso en el que la superficie es una fuente emisora activa.



Fig. B.0.20: Luminancia de una superficie con un patrón Lambertiano.

La luminancia o esterancia se define como:

$$L = \frac{I_{\theta}}{A'} = \frac{I_{\theta}}{A \cdot \cos\theta}$$
(B.0.45)

donde L: luminancia (cd/m<sup>2</sup> o lm/sr/m<sup>2</sup>) o esterancia (W/sr/m<sup>2</sup>) de la superficie A, A: área radiante (m<sup>2</sup>), A': área percibida por el observador O (m<sup>2</sup>), I<sub> $\theta$ </sub>: intensidad en la dirección del observador (cd o W/m<sup>2</sup>).

#### B.0.7.10.3. Fuente lambertiana

En el caso de que la fuente de radiación tenga un perfil lambertiano,  $I_{\theta} = I_0 \cos\theta$ , la ecuación de la luminancia puede reescribirse como:

$$L = \frac{I_0 \cdot \cos\theta}{A \cdot \cos\theta} = \frac{I_0}{A}$$
(B.0.46)

Cómo la intensidad de una fuente lambertiana y también el área de la superficie percibida decrecen proporcionalmente con  $\cos\theta$ , su proporción o la esterancia o la luminancia es la misma en todas direcciones. Esta ecuación explica porqué la superficie del sol o la superficie de una bombilla mate o la luz de un tubo fluorescente tienen el mismo brillo en toda su superficie: el perfil de distribución de la luz para cada una de estas fuentes es lambertiano. Esto es lo normal para la mayoría de las fuentes radiantes. La siguiente tabla nos muestra los valores de luminancia para alguno de los objetos más habituales.

Valores de luminancia de objetos comunes

Fuente	Luminancia [cd/m2]
Sol	1,6 10 <sup>9</sup>
Bombilla incandescente transparente (500W)	$11 \ 10^{6}$
Bombilla incandescente mate (500W)	$300\ 10^3$
Tubo fluorescente	$10 \ 10^3$
Llama de una vela	5 10 <sup>3</sup>

El término luminancia también se aplica a fuentes pasivas que son iluminadas, lo que se conoce con el nombre de fuentes extendidas. La luminancia de estas fuentes o superficies se debe a la reflexión del flujo incidente. Las propiedades de reflexión de las superficies también dependen de su color. En una superficie azul, todas las longitudes de onda excepto la azul serán absorbidas y sólo las longitudes representativas del azul se reflejarán.

La luminancia de una fuente extendida además depende de dos factores: la iluminación y el coeficiente de reflexión de la superficie. Las relaciones entre la iluminación y la luminancia son fáciles de deducir para superficies que tienen un patrón de reflexión lambertiano. El coeficiente de reflexión se define como:

$$R = \frac{\phi_{REF}}{\phi_{INC}}$$
(B.0.47)

donde R: coeficiente de reflexión,  $\phi_{REF}$ : flujo reflejado (W o lm),  $\phi_{INC}$ : flujo incidente (W o lm).

El flujo incidente puede calcularse a partir de la iluminación de la superficie:

$$\phi_{\rm INC} = \mathbf{A} \cdot \mathbf{E} \tag{B.0.48}$$

donde A: área de la superficie  $(m^2)$  y E: iluminación  $(W/m^2 \text{ o } lm/m^2)$ .

Así el flujo reflejado es,

$$\phi_{\text{REF}} = \mathbf{R} \cdot \phi_{\text{INC}} = \mathbf{R} \cdot \mathbf{A} \cdot \mathbf{E} \tag{B.0.49}$$

Usando la ecuación del flujo total irradiado por una fuente lambertiana (patrón de reflexión lambertiano), podemos calcular la intensidad a partir de dicho flujo total,

$$I_{REF} = \frac{\phi_{REF}}{\pi} = \frac{R \cdot A \cdot E}{\pi}$$
(B.0.50)

y usando la ecuación, podemos calcular la luminancia perpendicular a la superficie:

VNIVERSITAT (O Escola Tècnica Superior d'Enginyeria

Tema B.0: Introducción

$$L = \frac{I_{REF}}{A} = \frac{R \cdot E}{\pi}$$
(B.0.51)

Cuando el patrón de reflexión es lambertiano, la luminancia en todas direcciones es la misma. Como la mayoría de las superficies son reflectores lambertianos, podemos confirmar esta regla observando las fuentes extensas que hay a nuestro alrededor. Un ejemplo típico es la superficie de la luna, que tiene una luminancia uniforme. La misma ecuación también explica por qué la luminancia o brillo de los objetos no cambia con la distancia o la dirección del observador.

#### **B.0.7.11.** Excitancia Radiante y Luminosa

#### B.0.7.11.1. <u>Excitancia (M)</u>

La excitancia describe la densidad de flujo desde un área radiante. Tiene las mismas dimensiones,  $W/m^2$  o  $lm/m^2$ , que la incidencia radiante o iluminación. La diferencia es que la excitancia se aplica a un área radiante activa y la incidencia a un área receptora pasiva. Así,

$$M_{R} = \frac{\phi_{R}}{A} \qquad y \qquad M_{P} = \frac{\phi_{P}}{A} \tag{B.0.52}$$

donde  $M_R$ : excitancia radiante (W/m<sup>2</sup>),  $M_P$ : excitancia fotométrica (lm/m<sup>2</sup>), A: área emisora (m<sup>2</sup>).

#### B.0.7.11.2. <u>Relaciones derivadas de la Excitancia.</u>

A partir de la excitancia pueden obtenerse otras características como por ejemplo, el flujo de una superficie Lambertiana que es,

$$\phi_{\rm S} = \mathbf{M} \cdot \mathbf{A} \tag{B.0.53}$$

Y para cualquier fuente Lambertiana,

$$I_0 = \frac{\phi_s}{\pi} = \frac{M \cdot A}{\pi}$$
(B.0.54)

La siguiente figura muestra una fuente Lambertiana iluminando una superficie. En este caso, se pueden desarrollar las siguientes relaciones.

La intensidad en la dirección del receptor es,

VNIVERSITAT (O Escola Tècnica Superior d'Enginyeria

Tema B.0: Introducción

$$I_{\theta} = I_0 \cos\theta \tag{B.0.55}$$

El flujo en el receptor es:

$$\phi_{\rm r} = I_{\theta} \,\omega_{\rm R}, \quad \text{donde} \ \omega_{\rm R} = \frac{A_{\rm R}}{d^2} = \frac{A_{\rm R} \cdot \cos \alpha}{d^2}$$
(B.0.56)

Así,

$$\phi_{\rm r} = \frac{I_0 \cdot \cos\theta \cdot A_{\rm R} \cdot \cos\alpha}{d^2} = \frac{\phi_{\rm S} \cdot \cos\theta \cdot A_{\rm R} \cdot \cos\alpha}{\pi \cdot d^2} \tag{B.0.57}$$

donde  $\phi_r$ : flujo en el receptor (W o lm),  $\phi_s$ : flujo de la fuente (W o lm),  $I_0$ : intensidad de la fuente perpendicular a la superficie de la fuente (W/sr o lm/sr),  $\theta$ : dirección del receptor desde la perpendicular de la fuente,  $A_R$ : área del receptor (m<sup>2</sup>),  $\alpha$ : ángulo del receptor desde la perpendicular, d: distancia de la fuente al receptor (m).



Fig. B.0.21: Iluminación producida por una fuente extendida Lambertiana.

La ecuación de  $\phi_r$  se aplica cuando la distancia entre fuente y receptor es mucho mayor que las dimensiones de la fuente o el receptor. Como la iluminación sobre la superficie del receptor es  $E_r = \phi_r / A_R$ , podemos escribir,

$$E_{r} = \frac{I_{0} \cdot \cos\theta \cdot \cos\alpha}{d^{2}} = \frac{\phi_{s} \cdot \cos\theta \cdot \cos\alpha}{\pi \cdot d^{2}}$$
(B.0.58)

Si el área del receptor y la fuente son perpendiculares a la línea que los conecta  $\cos\theta=1$  y  $\cos\alpha=1$ 

$$\phi_{\rm r} = \frac{I_0 \cdot A_{\rm R}}{d^2} \tag{B.0.59}$$

$$E_{r} = \frac{I_{0}}{d^{2}} = \frac{\phi_{s}}{\pi \cdot d^{2}}$$
(B.0.60)

A menudo las fuentes directas o por reflexión con superficies de áreas grandes se definen por su luminancia o esterancia (L), lo que puede expresarse como  $L=I_0/A_S$  o  $I_0=L A_S$ . De modo que las ecuaciones  $\phi_r$  y  $E_r$  quedan como,

$$\phi_{\rm r} = \frac{\mathbf{L} \cdot \mathbf{A}_{\rm S} \cdot \mathbf{A}_{\rm R} \cdot \cos \theta \cdot \cos \alpha}{d^2} \tag{B.0.61}$$

$$E_{r} = \frac{L \cdot A_{s} \cdot \cos\theta \cdot \cos\alpha}{d^{2}}$$
(B.0.62)

Cuando la superficie de la fuente y el receptor son paralelas y perpendiculares al eje del flujo  $\cos\theta=1$  y  $\cos\alpha=1$ , como hemos visto antes, las ecuaciones anteriores se simplifican,

$$E_{r} = \frac{L \cdot A_{s}}{d^{2}} = L \cdot \omega_{s}$$
(B.0.63)

donde  $\omega_s$ : ángulo sólido de la fuente subtendido por el receptor (sr).