

FLUJO LUMINOSO

La mayoría de las fuentes de luz emiten energía electromagnética distribuida en múltiples longitudes de onda. Se suministra energía eléctrica a una lámpara, la cual emite radiación. Esta energía radiante emitida por la lámpara por unidad de tiempo se llama potencia radiante o *flujo radiante*. Sólo una pequeña porción de esta potencia radiante se encuentra en la región visible: en la región entre 400 y 700 nm. El sentido de la vista depende tan sólo de la energía radiada visible o *luminosa* por unidad de tiempo.

*El **flujo luminoso** F es la parte de la potencia radiante total emitida por una fuente de luz que es capaz de afectar el sentido de la vista.*

En una lámpara común de luz incandescente, sólo aproximadamente el 10 por ciento de la energía radiante es flujo luminoso. La mayor parte de la potencia radiante no es luminosa.

El ojo humano no es igualmente sensible a todos los colores. En otras palabras, iguales potencias radiantes de diferentes longitudes de onda no producen la misma brillantez. Una lámpara de luz verde de 40 W se ve más brillante que una lámpara de luz azul de 40 W. La figura 16 muestra una gráfica que indica la respuesta del ojo a diversas longitudes de onda. Observe que la curva de sensibilidad tiene forma de campana centrada aproximadamente en la región media del espectro visible. En condiciones normales, el ojo es más sensible a la luz verde-amarilla de longitud de onda de 555 nm. La sensibilidad decae rápidamente para longitudes de onda más largas y más cortas.

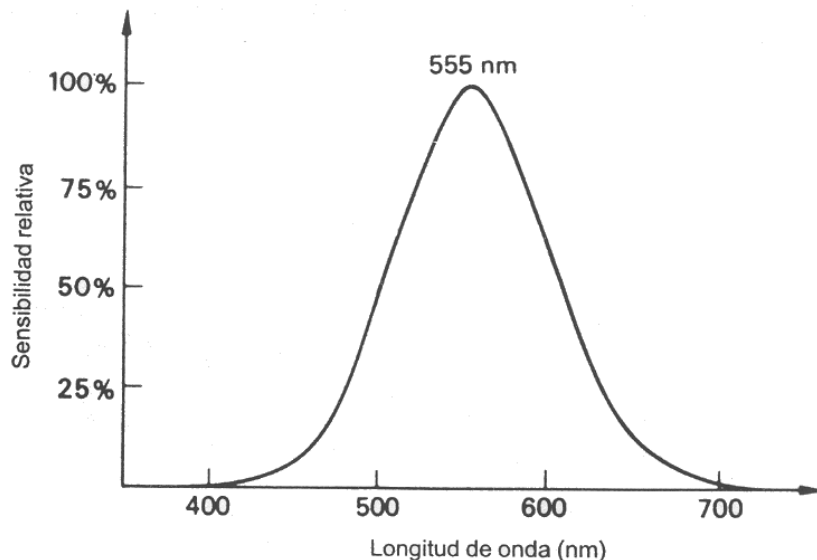


Figura 16. Curva de sensibilidad del ojo humano.

Si la unidad elegida para el flujo luminoso debe corresponder a la respuesta sensitiva del ojo humano, es preciso definir una nueva unidad. El watt (W) no es suficiente debido a que las sensaciones visuales no son las mismas para colores diferentes. Lo que se necesita es una unidad que mida la *brillantez*. Dicha unidad es *el lumen* (lm), el cual se determina por comparación con una fuente patrón.

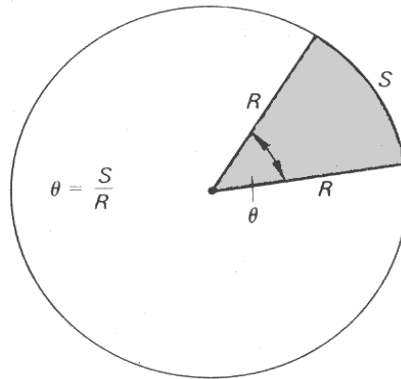


Figura 17. Definición de ángulo plano e expresado en radianes.

Para comprender la definición de un lumen en términos de la fuente patrón, debemos primero desarrollar el concepto de un ángulo sólido. Un ángulo sólido en estereorradianes (sr) se define en la misma forma que un ángulo plano se define en radianes. En la figura 17 el ángulo θ en radianes es:

$$\theta = \frac{S}{R} \text{ rad}$$

donde S es la longitud del arco y R es el radio. En forma similar se define el ángulo sólido Ω en la figura 18. Éste puede imaginarse como la abertura del extremo de un cono subtendido por un segmento de área sobre la superficie esférica.

Un estereorradián (sr) es el ángulo sólido subtendido en el centro de una esfera por un área A sobre su superficie que es igual al cuadrado de su radio R .

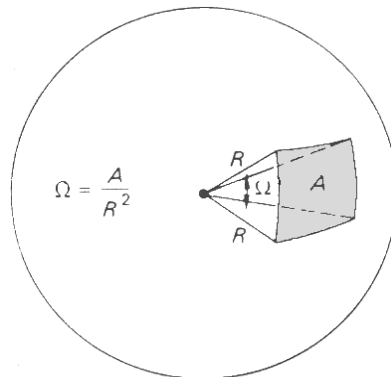


Figura 18. Definición de ángulo sólido Ω en estereorradianes.

En general, el ángulo sólido en estereorradianes está dado por:

$$\Omega = \frac{A}{R^2} \quad \text{sr}$$

El estereorradián, al igual que el radián, es una cantidad adimensional. Igual que hay 2π rad en un círculo completo, se puede demostrar con la ecuación anterior que hay 4π sr en una esfera completa.

EJEMPLO 2. ¿Qué ángulo sólido se subtiende en el centro de una esfera de 8 m de diámetro por medio de un área de 1.5 m^2 sobre su superficie?

Solución

De la ecuación $\Omega = \frac{A}{R^2}$

$$\Omega = \frac{1.5 \text{ m}^2}{(4 \text{ m})^2} = 0.0938 \text{ sr}$$

Ahora estamos en condiciones de aclarar la definición de una unidad que mide el flujo luminoso. *El lumen* se define por comparación con una fuente patrón reconocida internacionalmente.

Un lumen (lm) es el flujo luminoso (o potencia radiante visible) emitido desde una abertura de $1/60 \text{ cm}^2$ de una fuente patrón e incluido dentro de un ángulo sólido de 1 sr.

La fuente patrón consiste en un recipiente hueco que se mantiene a la temperatura de solidificación del platino, aproximadamente $1773 \text{ }^\circ\text{C}$. En la práctica es más conveniente usar lámparas incandescentes estándar que han sido calibradas por comparación con una lámpara patrón.

Otra definición conveniente de lumen utiliza la curva de sensibilidad del ojo como base para establecer el flujo luminoso. Relacionándola con la fuente patrón, un lm se define en términos de la potencia radiante de la luz verde-amarilla.

Un lumen es equivalente a $1/680 \text{ W}$ de luz verde-amarilla de 555 nm de longitud de onda.

Para determinar el flujo luminoso emitido por luz de diferente longitud de onda, debe usarse la curva de luminosidad a fin de compensar la sensibilidad visual.

EJEMPLO 3. Una fuente de luz roja monocromática (600 nm) produce una potencia radiante visible de 4 W ¿Cuál es el flujo luminoso en lúmenes?

Solución

Si la luz fuera verde-amarilla (555 nm) en vez de roja, tendría un flujo luminoso F dado por:

$$F = (680 \text{ lm/W})(4 \text{ W}) = 2720 \text{ lm}$$

A partir de la curva de sensibilidad, la luz roja tiene una longitud de onda de 600 nm y produce aproximadamente el 59 por ciento de la respuesta obtenida con la luz verde-amarilla. Así pues, el flujo luminoso que emana de la fuente de luz roja es:

$$F = (0.59)(2720 \text{ lm}) = 1600 \text{ lm}$$

El flujo luminoso con frecuencia se calcula en el laboratorio determinando la iluminación que produce sobre un área de superficie conocida.

INTENSIDAD LUMINOSA

La luz viaja radialmente hacia afuera en líneas rectas desde una fuente que es pequeña en comparación con sus alrededores. Para una fuente de luz de ese tipo, el flujo luminoso incluido en un ángulo sólido Ω permanece igual a cualquier distancia de la fuente. Por lo tanto, con frecuencia es más útil hablar del *flujo por unidad de ángulo sólido* que hablar simplemente del flujo total. La cantidad física que expresa esta relación se llama *intensidad luminosa*.

La intensidad luminosa I de una fuente de luz es el flujo luminoso F emitido por unidad de ángulo sólido Ω .

$$I = \frac{F}{\Omega}$$

La unidad de intensidad es *el lumen por estereorradián* (lm/sr), llamada *candela*. *La candela o bujía*, como a veces se le llama, se originó cuando el patrón internacional quedó definido en términos de la cantidad de luz emitida por la llama de cierta bujía. Este patrón no resultó adecuado y se reemplazó finalmente por el patrón de platino.

EJEMPLO 4. La mayoría de las fuentes de luz tienen diferentes intensidades luminosas en diferentes direcciones. Una fuente *isotrópica* es aquella que emite uniformemente luz en todas direcciones. ¿Cuál es el flujo luminoso total emitido por una fuente isotrópica de intensidad I ?

Solución

A partir de la ecuación anterior, el flujo está dado por:

$$F = \Omega I$$

El ángulo sólido total Ω para una fuente isotrópica es 4π sr. Por lo tanto,

$$F = 4\pi I$$

EJEMPLO 5. Un proyector de luz está equipado con una lámpara de 40 cd que concentra un haz de luz sobre una pared vertical. El haz cubre un área de 9 m^2 de la pared, y el proyector está situado a 20 m de dicha pared. Calcule la intensidad luminosa del proyector.

Solución

El flujo total emitido por la lámpara de 40 cd es:

$$F = 4\pi I = (4\pi)(40 \text{ cd}) = 160\pi \text{ lm}$$

Este flujo total se concentra por medio de reflectores y lentes en un ángulo sólido dado por:

$$\Omega = \frac{A}{R^2} = \frac{9m^2}{(20m)^2} = 0.0225sr$$

La intensidad del haz se encuentra a partir de la ecuación $I = F / \Omega$:

$$I = \frac{F}{\Omega} = \frac{160\pi \text{ lm}}{0.0225sr} = 2.23 \times 10^4 \text{ cd}$$

Observe que las unidades de intensidad (cd) y las unidades de flujo (lm) son iguales desde el punto de vista dimensional. Esto sucede debido a que el ángulo sólido en estereorradianes es adimensional.

ILUMINACION

Si la intensidad de la fuente aumenta, el flujo luminoso transmitido a cada unidad de área en la vecindad de la fuente también aumenta. La superficie aparece más brillante. En la medición de la eficiencia luminosa, el ingeniero se interesa en la densidad del flujo luminoso sobre una superficie. Esto nos lleva entonces a analizar la *iluminación* de una superficie.

*La **iluminación** E de una superficie A se define como el flujo luminoso F por unidad de área.*

$$E = \frac{F}{A}$$

Cuando el *flujo F* se mide en lúmenes y el área A en metros cuadrados, la iluminación E tiene las unidades de *lúmenes por metro cuadrado o lux (lx)*. Cuando A se expresa en pies cuadrados, E se da en *lúmenes por pies cuadrados*. Al lumen por 1 pie cuadrado a veces se le denomina bujía-pie.

La aplicación directa de la ecuación requiere un conocimiento del flujo luminoso que incide en una superficie dada. Desafortunadamente, el flujo de las fuentes de luz comunes es difícil de determinar. Por esta razón, la ecuación se usa con más frecuencia para calcular el flujo cuando A se conoce, y E se calcula, a partir de la intensidad medida.

Para entender la relación entre intensidad e iluminación, consideremos una superficie A con una distancia R de una fuente puntual de intensidad I, como muestra la figura 19. El ángulo sólido Ω subtendido por la superficie en la fuente es:

$$\Omega = \frac{A}{R^2}$$

donde el área A es perpendicular a la luz emitida.

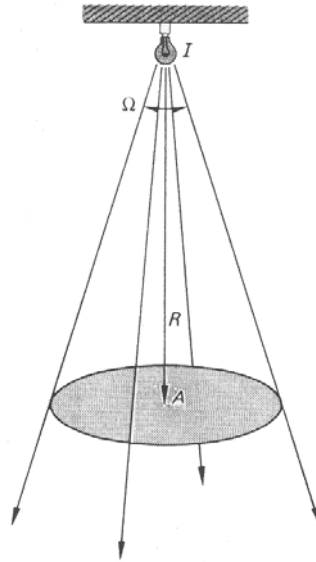


Figura 19. Cálculo de la iluminación de una superficie perpendicular al flujo luminoso incidente.

Si el flujo luminoso forma un ángulo θ con la normal a la superficie, como muestra la figura 24-19, debemos considerar el área proyectada $A \cos \theta$. Ésta representa el área efectiva que el flujo "ve". Por lo tanto, el ángulo sólido, en general, se puede determinar a partir de:

$$\Omega = \frac{A \cos \theta}{R^2}$$

Despejando el flujo luminoso F en la ecuación $I = \frac{F}{\Omega}$, obtenemos:

$$F = I\Omega = \frac{IA \cos \theta}{R^2}$$

Ahora ya es posible expresar la iluminación como una función de la intensidad. Sustituyendo la ecuación anterior en la ecuación que define la iluminación nos queda:

$$E = \frac{F}{A} = \frac{IA \cos \theta}{AR^2}$$

o bien;

$$E = \frac{I \cos \theta}{R^2}$$

Para el caso especial en el que la superficie es normal al flujo, $\theta = 0^\circ$, y la ecuación anterior se simplifica quedando:

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

Debe verificar que las unidades de *candela por metro cuadrado* sean equivalentes dimensionalmente a las unidades de *lúmenes por metro cuadrado o lux*.

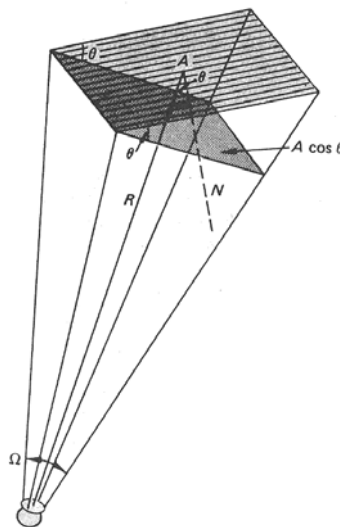


Figura 20. Cuando una superficie forma un ángulo θ con el flujo luminoso incidente, la iluminación E es proporcional a la componente $A \cos \theta$ de la superficie perpendicular al flujo luminoso.

EJEMPLO 6. Una lámpara incandescente de 100 W tiene una intensidad luminosa de 125 cd. ¿Cuál es la iluminación de una superficie situada a 3 ft abajo de la lámpara?

Solución

Sustituyendo directamente en la ecuación $E = \frac{I}{R^2}$, obtenemos:

$$E = \frac{I}{R^2} = \frac{125 \text{ cd}}{(3 \text{ ft})^2} = 13.9 \text{ lm/ft}^2$$

EJEMPLO 7. Una lámpara de filamento de tungsteno cuya intensidad es de 300 cd está situada a 2.0 m de una superficie de 0.25 m² de área. El flujo luminoso forma un ángulo de

30° con la normal a la superficie. (a) ¿Cuál es la iluminación? (b) ¿Cuál es el flujo luminoso que choca contra la superficie? (Consulte la figura 20).

Solución (a)

La iluminación se encuentra directamente a partir de la ecuación $E = \frac{I \cos \theta}{R^2}$.

$$E = \frac{I \cos \theta}{R^2} = \frac{(300cd)(\cos 30^\circ)}{(2m)^2} = 65lx$$

Solución (b)

El flujo que incide en la superficie se determina despejando F de la ecuación $E = \frac{F}{A}$. De modo que:

$$F = EA = (65 lx)(0.25 m^2) = 16.2 lm.$$

Las ecuaciones anteriores que incluyen la iluminación y la densidad luminosa son formulaciones matemáticas de la *ley del recíproco del cuadrado*, que puede enunciarse en la siguiente forma:

La iluminación de una superficie es proporcional a la intensidad luminosa de una fuente de luz puntual y es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia.

Si la luz que ilumina una superficie se eleva el doble de su altura original. La iluminación será solamente la cuarta parte del total. Si se triplica la distancia de la lámpara, la iluminación se reduce a una novena parte del total. En la figura 21 se ilustra esta relación del recíproco del cuadrado.

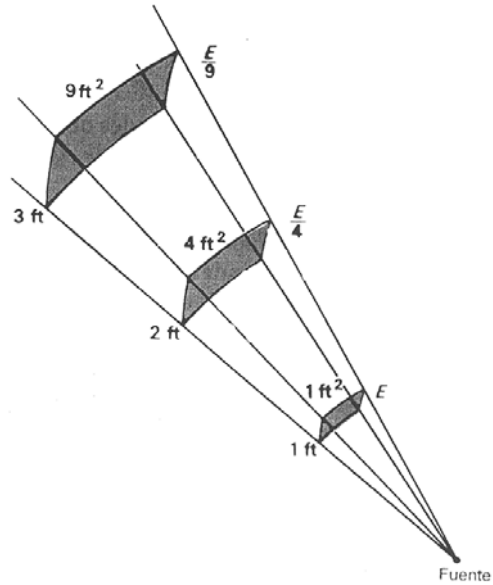


Figura 21. La intensidad luminosa I es constante para un ángulo sólido dado Ω . Sin embargo, la iluminación E (flujo por unidad de área) disminuye en proporción al cuadrado de la distancia a la fuente de luz.