



# RADIOMETRÍA, FOTOMETRÍA, FUNCIÓN $V(\lambda)$

## AUTOR

**Thomas Salmon:** Northeastern State University, EEUU

## PAR REVISOR

**Scott Steinman:** Southern California College of Optometry, EEUU

## ESTE CAPITULO INCLUIRÁ UNA REVISIÓN DE:

- Radiometría
- Fotometría
- Funciones de luminosidad CIE
- Componentes básicos medidos en la fotometría

## RADIOMETRIA

**Q. ¿Qué es la radiometría? ¿cuál es la diferencia entre radiometría y fotometría?**

**A. La radiometría describe las propiedades físicas de la luz, pero, la fotometría describe la luz desde un punto de vista perceptual. La radiometría mide la energía, sea o no detectada por el sistema visual, la fotometría cuantifica la luz como si fuera percibida por un observador humano normal estándar**

## ENERGIA Y PODER

La unidad básica de la **energía** es el joule. El Poder se define como energía por unidad de tiempo. La unidad básica del *poder* es el *wattio*.

$$1 \text{ watt} = 1 \text{ joule} / 1 \text{ segundo}$$

Una bombilla de luz que dice 60 wattios de *poder radiante*, produce 60 joules de energía por segundo. Si se deja prendida por 10 segundos produciría 600 joules de energía. Esto describe el total de energía que irradia una fuente luminica en todas las direcciones.

## RADIOMETRÍA (CONT.)

### INTENSIDAD RADIANTE

Una *fente puntual* emite energía radiante en todas las direcciones. Si se localiza en el centro de una esfera, su energía o poder se distribuirá a lo largo de toda la superficie interior de la esfera. En algunos casos se necesita saber qué tan concentrado está el poder en una dirección particular. Es decir, que tanto poder está contenido en un determinado volumen. La cantidad de poder contenido en un volumen definido con forma de cono, se conoce con el nombre de intensidad radiante. A mayor poder en el cono, mayor es la intensidad radiante. La unidad para un ángulo sólido (tamaño del cono) son los estereoradianes (Schwartz Fig. 4-5).

$$\text{Estereoradian} = \text{área en la apertura del cono} / (\text{longitud del cono})^2$$

Para tener una idea del tamaño de un estereoradian, imagine un cono de helado grueso con una apertura de 17.15 cm de diámetro y una longitud de 15.24 cm. Un cono así tendría un volumen angular de 1 estereoradian. La intensidad radiante cuantifica la concentración de la luz que es emitida de una fuente puntual y se expresa en wattios/estereoradian.

### RADIANCIA

Una fuente extendida a lo largo de un tubo fluorescente de luz puede pensarse como una colección de puntos. La cantidad de poder radiante emitido de una fuente extendida se conoce con el nombre de **radiancia**. La radiancia se expresa en unidades de watt/estereoradianes/m<sup>2</sup>

### IRRADIANCIA

La cantidad de poder radiante que cae sobre una superficie se conoce con el nombre de **irradiancia**. La irradiancia se expresa en watts/m<sup>2</sup>. Tenga cuidado de no confundir radiancia con irradiancia. La radiancia hace referencia a la energía emitida de una superficie (energía proveniente de) La irradiancia hace referencia a la energía que cae sobre una superficie (energía que incide sobre)

## FOTOMETRÍA

Con estos conocimientos básicos de radiometría, estudiaremos el tema de fotometría. La radiometría describe las propiedades físicas de la luz, pero, la fotometría describe la luz desde un punto de vista perceptual. La radiometría mide la energía, sea o no detectada por el sistema visual, la fotometría cuantifica la luz como si fuera percibida por un **observador humano estándar**.

En optometría generalmente nos interesa más la fotometría que la radiometría, pero, existen ciertos casos en los que la radiometría es más relevante. Por ejemplo, al estudiar el efecto de los láseres en los tejidos oculares, no nos interesa tanto saber que tan brillante es, sino que tanta energía se transfiere a los tejidos para tratar enfermedades oculares o para evitar dañarlos. En ese caso estaría uno más interesado en la información radiométrica en la fotométrica.

La fotometría está estrechamente relacionada con la radiometría, sin embargo, no se deben confundir. Obviamente para la luz visible, más energía o poder la hará parecer más brillante. Por esa razón una bombilla de 100 wattios parece ser más brillante que una de 60 wattios. Para la luz ultravioleta o infrarroja, aún con más energía, la luz no será percibida.

Al comparar el brillo aparente de las luces de diferentes longitudes de onda, se debe tener en cuenta la sensibilidad del ojo para diferentes longitudes de onda. Por ejemplo un láser de 5-mW verde se verá más brillante que uno de 5-mW rojo, porque el ojo es más sensible a la luz verde que a la roja.

## FUNCIONES DE LUMINOSIDAD CIE

Para hacer esto más simple, primero consideraremos una fuente de luz monocromática (una única longitud de onda) que es visible para el ojo humano. Con el fin de calcular su brillo para un observador estándar, es decir, la **intensidad fotométrica** de la luz, debe saber lo siguiente:

- Poder radiométrico (en wattios)
- Longitud de onda
- Sensibilidad del ojo a esa longitud de onda

La sensibilidad del ojo a diferentes longitudes de onda, para un observador estándar, fue establecida por la CIE (Commission Internationale de l'Eclairage o comisión internacional de iluminación) en 1924. Esta información estandarizada es fundamental en el campo de la fotometría y se conoce como:

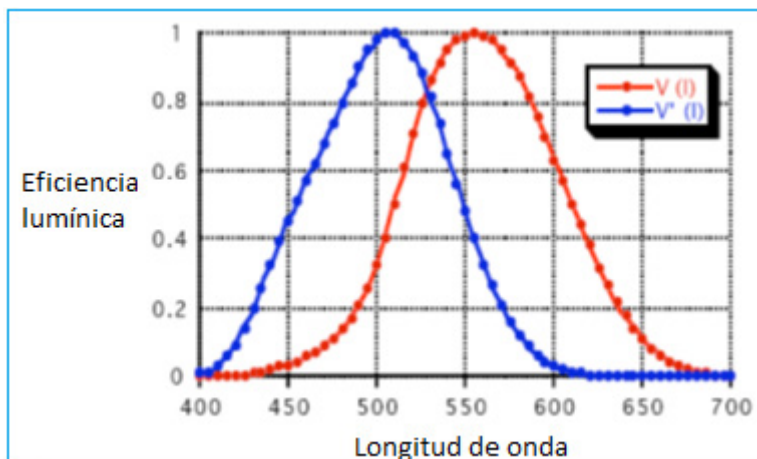
- Función de eficiencia lumínica del ojo humano
- Función de luminosidad espectral
- Función de luminosidad **fotópica**
- Función CIE 1924  $V(\lambda)$  o curva V lambda para visión fotópica

Esta función describe la sensibilidad normal relativa del ojo para diferentes longitudes de onda bajo condiciones fotópicas. Es decir, durante la luz del día en lugar de condiciones de visión nocturna. En este caso, los fotorreceptores con los que están trabajando

Cuando el sistema visual está adaptado a la oscuridad, la sensibilidad máxima del ojo cambia hacia longitudes de onda más cortas, aquí trabajan los bastones. La función de sensibilidad correspondiente bajo condiciones de baja luminosidad es la función de luminosidad **escotópica** o la función CIE  $V'(\lambda)$  (función V-prima lambda) 1951. Generalmente trabajamos con la función fotópica, pero debe saberse que existe una luminosidad espectral diferente para la visión escotópica (visión nocturna).

La figura 5-1 muestra las funciones  $V(\lambda)$  y  $V'(\lambda)$  en un mismo gráfico. Note que ambas curvas tienen forma de campana. La curva  $V(\lambda)$  tiene su punto más alto cerca a los 555nm (punto más alto de sensibilidad del cono), por lo tanto la eficiencia lumínica relativa del ojo humano en esta longitud de onda está determinada por el valor de  $V(\lambda_{555})=1.0$ .

La curva  $V'(\lambda)$  (escotópica) cambia hacia longitudes de onda más cortas y tiene su punto más alto cerca a los 507 nm (punto más alto de sensibilidad para el bastón). La eficiencia lumínica relativa en esta longitud de onda está determinada por el valor de  $V'(\lambda_{507})=1.0$ . (Schwartz Fig. 4-8)

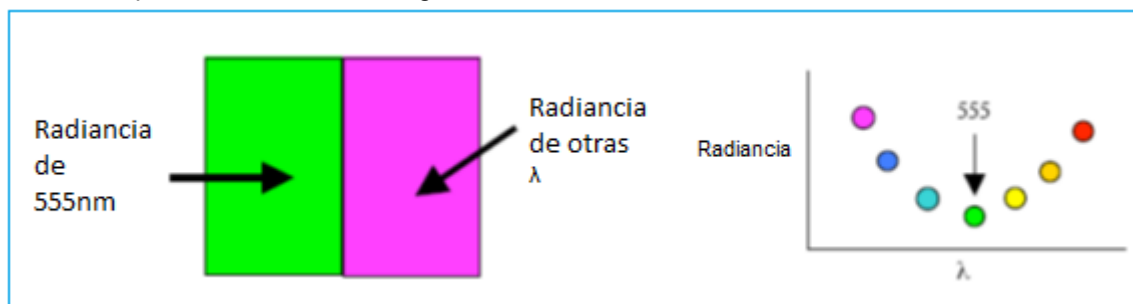


**Figura 5.1:** Curvas CIE  $V(\lambda)$  (derecha, roja) y  $V'(\lambda)$  (izquierda, azul)

## FUNCIONES DE LUMINOSIDAD CIE (CONT.)

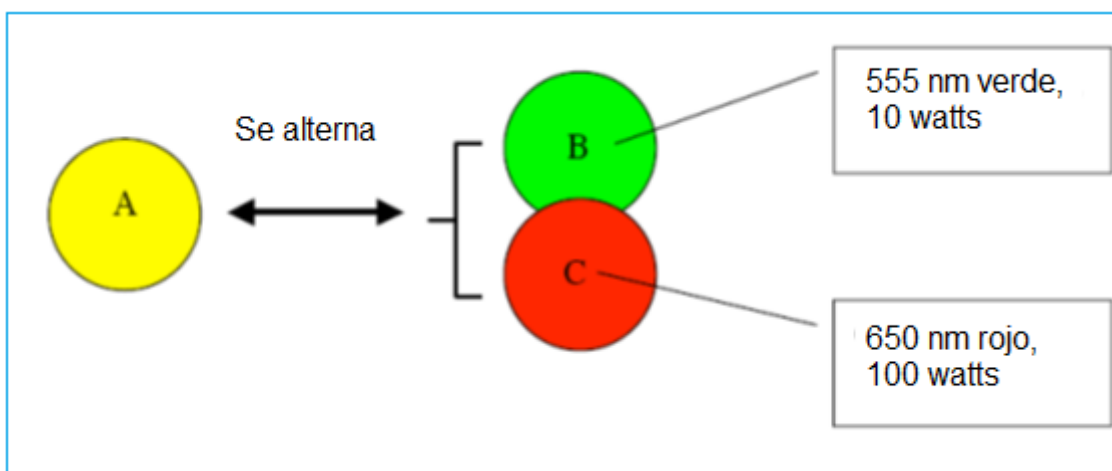
### DERIVACIÓN DE LA FUNCIÓN DE LUMINOSIDAD FOTÓPICA

¿Cómo se puede determinar de manera experimental la función de luminosidad fotópica? Es decir, que tan brillantes se ven las diferentes longitudes de onda para el ojo humano? Una forma (Schwartz Fig. 4-9) sería comparar una luz de referencia con una longitud de onda y radiancia establecidas, con otra luz de diferente longitud de onda (Fig 5-2). Desafortunadamente este procedimiento da resultados muy variables porque es muy difícil igualar el brillo de estímulos que tienen diferentes longitudes de onda.



**Figura 5.2:** Experimento para comparar la eficiencia lumínica relativa de dos longitudes de onda diferentes.

Otro método útil, conocido como la **fotometría heterocromática intermitente (HFP)**, fue desarrollado para superar este problema. Un único estímulo iluminado es diseñado de tal forma que cambia de manera intermitente entre dos longitudes de onda (Fig. 5-3 A y Schwartz Fig 4-10) con una frecuencia de alrededor de 15 ciclos/seg o (15 Hz). Por ejemplo, una longitud de onda puede ser de 555nm con una radiancia establecida (Fig5-3, B) mientras que la otra longitud de onda es variable y su radiancia puede ajustarse (Fig5-3, C). Los colores alternantes aparentarán fusionarse en otro color intermedio, pero, si su brillo no es igual la luz se verá intermitente. La radiancia de esta longitud de onda debe ajustarse hasta que la intermitencia desaparezca o disminuya. En ese punto, la luminancia (brillo percibido para un observador humano estándar) es igual. El procedimiento se repite para muchas longitudes de onda. La información del CIE 1924 se basa en experimentos que emplean el método descrito anteriormente.



**Figura 5.3:** Fotometría heterocromática intermitente. El punto amarillo, cuyo color es visto como resultado de una fusión de los dos colores alternantes, parece ser intermitente hasta que la luminancia de los dos colores se vuelve igual (mismo brillo percibido). En este ejemplo, la radiancia del color rojo debe ser 10 veces mayor al poder de referencia de la luz verde, por tanto el ojo debe tener una sensibilidad de 1/10 para una longitud de onda de 650nm, por tanto el valor  $V(\lambda)$  para una longitud de onda de 650 nm es de 0.1

En el **método de bordes mínimamente distintos** que se muestra en Schwartz Fig. 4-11, la longitud de onda estándar y la longitud de onda a medir ocupan dos mitades de un parche cuadrado (Similar al estímulo que se muestra en la Fig.5-2) y comparten un borde común. Las radiancias se ajustan hasta que el poder se vuelve mínimamente distinto ( parece verse sin bordes definidos en lugar de verse filoso) En esa radiancia el brillo parece ser el mismo, por tanto la luminancia es igual. Los resultados de este método concuerdan con los de HFP.

## COMPONENTES BÁSICOS MEDIDOS EN LA FOTOMETRÍA

### PODER LUMÍNICO

Mientras que el poder radiante es simplemente una función de cuanta energía está presente, *el poder lumínico* indica el brillo percibido (para un observador humano estándar). 10 wattios en una longitud de onda de 555nm es más brillante que 10 wattios en 400 nm. Incluso aunque el poder radiante sea el mismo, el poder lumínico en 400nm es menor. El poder lumínico en una determinada longitud de onda se expresa en lúmenes, en donde un lumen se define como:

$$\text{lúmen} = (\text{poder radiante en wattios})V_{\lambda}(680)$$

Esta ecuación aparece en Schwartz y usa una constante que fue redondeada a 680. Otras referencias usan 683 o 685. Note que esta fórmula es para lúmenes fotópicos. Vea los ejemplos en Schwartz Fig.4-2. La curva  $V_{\lambda}$  hace referencia a la función de luminosidad fotópica. Ya que los bastones son más sensibles a la luz, es decir puede ver mejor en oscuridad que los conos, el brillo percibido de una luz para un sistema escotópico es diferente y por tanto, existe una fórmula distinta para calcular los *lúmenes escotópicos*.

$$\text{Lúmen escotópico} = (\text{poder radiante en wattios})V'_{\lambda}(1700)$$

Resulta que a 555nm, la eficiencia lumínica escotópica es de 0.4, entonces para una fuente luminosa de 1 wattio, en esa longitud de onda, hay 680 lúmenes escotópicos. No usaremos mucho los lúmenes escotópicos en este curso. En el sistema fotópico, la eficiencia lumínica a 555nm es de 1.0, por tanto para una fuente luminosa de 1 wattio en esa longitud de onda, existen 680 lúmenes fotópicos.

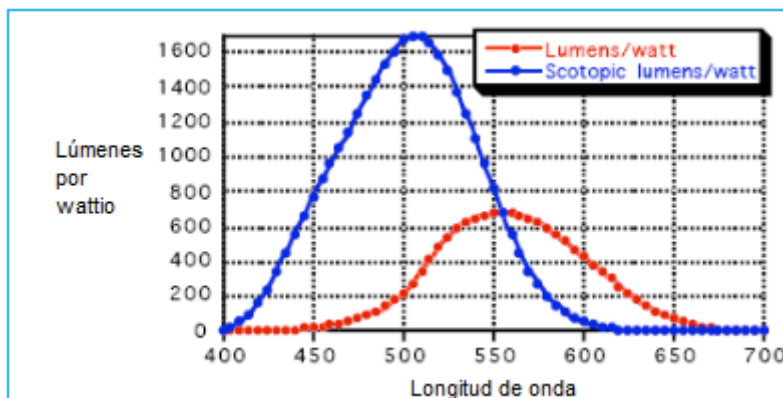


Figura 5-4: Lúmenes fotópicos y escotópicos comparados

Figura 5-4: Muestra el número de lúmenes fotópicos y escotópicos para cada longitud de onda, asumiendo un poder radiante de 1 watt. Schwartz menciona que a 555nm, ambos lúmenes, tanto fotópicos como escotópicos, son iguales y tienen un valor de 680. A 507nm hubo 1699 lúmenes por wattio. Schwartz lo redondeó a 1700.

Si la fuente de luz es policromática (múltiples longitudes de onda), el poder lumínico total es igual a la suma de cada poder lumínico calculado individualmente para cada longitud de onda. La naturaleza aditiva del poder lumínico de cada longitud de onda se conoce con el nombre de la **Ley de adición de Abney**. (Schwartz Fig. 4-3)

### INTENSIDAD LUMINOSA

Este término fotométrico es similar a la intensidad radiante (wattios/estereoradianes). Se usa para fuentes puntuales únicamente y la unidad se conoce con el nombre de candela.

$$1 \text{ candela} = 1 \text{ lúmen} / 1 \text{ estereoradian}$$

## COMPONENTES BÁSICOS MEDIDOS EN LA FOTOMETRÍA (CONT)

### LUMINANCIA

El brillo percibido de una fuente extendida (para un observador estándar) se conoce con el nombre de luminancia y es similar a la radiancia en que cuantifica la luz que emite una superficie extendida. La unidad métrica básica de la luminancia es el **nit**.

$$1 \text{ nit} = 1 \text{ candela} / 1 \text{ m}^2$$

Otra unidad métrica para la luminancia es el **apostilb** y la unidad similar es el **pie lambertiano**. Estas se usan específicamente con superficies lambertianas, que serán discutidas en la siguiente sección. Se definen como:

$$1 \text{ apostilb} = ((\text{candela} / \text{m}^2) / \pi) = (1/\pi) \text{ nits}$$

$$1 \text{ pie lambertiano} = (\text{candela} / \text{ft}^2) / \pi$$

### ILUMINANCIA

El término es similar a la irradiancia y cuantifica la luz que incide sobre una superficie. La unidad métrica para la iluminancia es el **lux**. La unidad inglesa para iluminancia es el **pie candela**.

$$1 \text{ lux} = 1 \text{ lúmen} / \text{m}^2$$

$$1 \text{ pie-candela} = 1 \text{ lumen} / \text{ft}^2$$

La tabla 4-1 de Schwartz enlista los valores recomendados de iluminancia para varios lugares o actividades y puede ser útil como guía. Otras unidades para luminancia e iluminancia se encuentran en la tabla 4-2 de Schwartz.

Tenga cuidado de no confundir *luminancia* e *iluminancia*. La luminancia se refiere al brillo de luz emitido por una superficie. La iluminancia se refiere al brillo de luz que incide sobre una superficie.

La tabla 5-1 muestra que existe un paralelo entre las unidades radiométricas y fotométricas. La fotometría busca entender que tan brillante se ve una luz y eso depende tanto del poder radiante como del valor  $V(\lambda)$  para cada longitud de onda.

**Tabla 5-1:** comparación entre las unidades fotométricas y radiométricas

DESCRIPCIÓN	RADIOMETRÍA	UNIDAD	FOTOMETRÍA	UNIDAD
Energía	Energía	Joule		
Energía/tiempo (poder)	Poder radiante	Joules/seg(watt)	Poder lumínico	Lúmen
Intensidad de una fuente puntual	Intensidad radiante	Watts/estereoradianes	Intensidad lumínica	Lúmenes/estereoradianes (candela)
Energía emitida de una fuente extendida	Radiancia	Watts/str/m <sup>2</sup>	Luminancia	Lum/str/m <sup>2</sup> (candela/m <sup>2</sup> ) (nit)
Energía que incide sobre una superficie	Irradiancia	Watts/m <sup>2</sup>	Iluminancia	Lúmenes/m <sup>2</sup> (lux)

## LECTURAS RECOMENDADAS/REFERENCIAS

- Schwartz SH. **Visual Perception - A Clinical Orientation, 3rd Edition**. Appleton & Lange, Stamford, Connecticut, 2004