

02.10. FOTOMETRÍA

Damián Gulich
2020

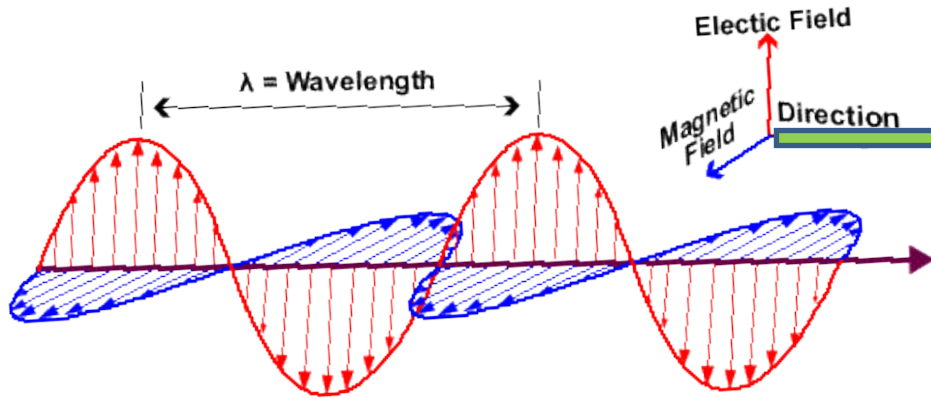
1. Definiciones

© Damián Gulich
www.damiangulich.com.ar

Fotometría

- La óptica geométrica describía principalmente las trayectorias luminosas. Ahora se estudiará desde el punto de vista de la energía que transporta teniendo en cuenta la sensibilidad del ojo humano a la radiación que incide sobre él.
- No toda la radiación emitida por una fuente llega al ojo y produce sensación luminosa, ni toda la energía que consume (por ej. una lámpara) se convierte en luz visible.
- Todo esto se debe evaluar y por ese motivo surge la necesidad de definir nuevas magnitudes fotométricas: *el flujo luminoso, la intensidad luminosa, la iluminancia y el rendimiento o eficiencia luminosa.*

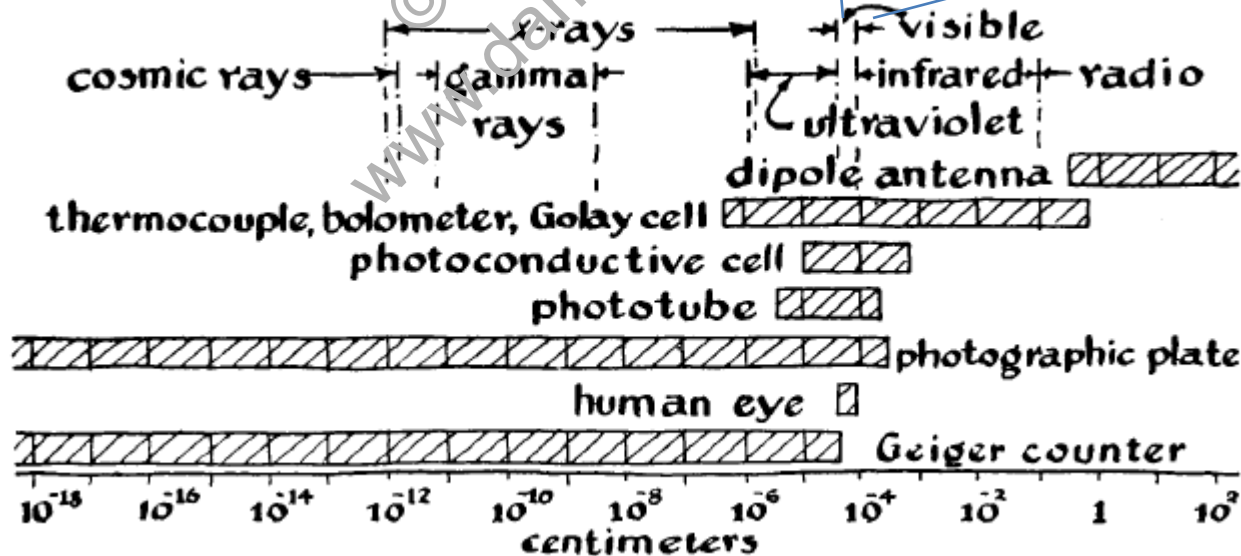
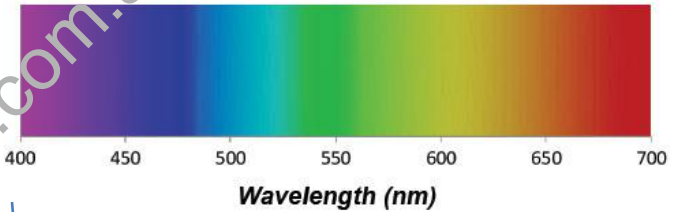
Radiación electromagnética



Electric Field
Magnetic Field
Direction

$$\vec{S} = \frac{1}{\mu_0} \vec{E} \times \vec{B}$$

Vector de Poynting

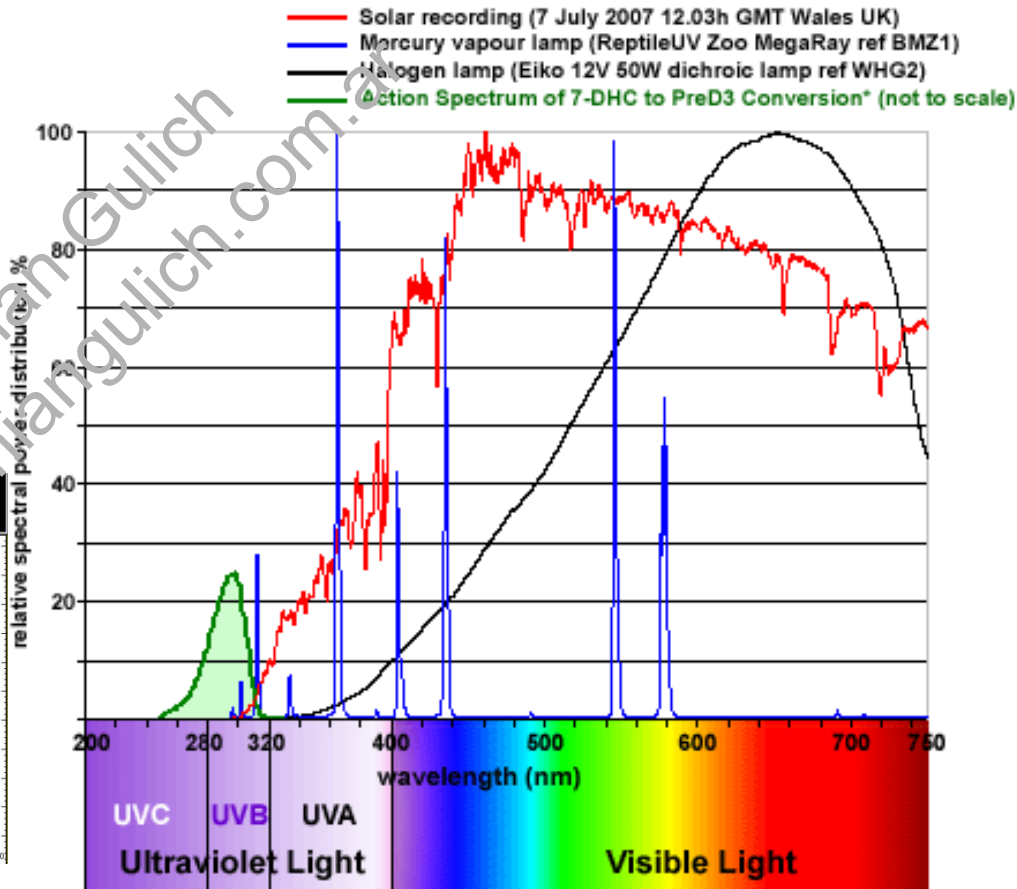
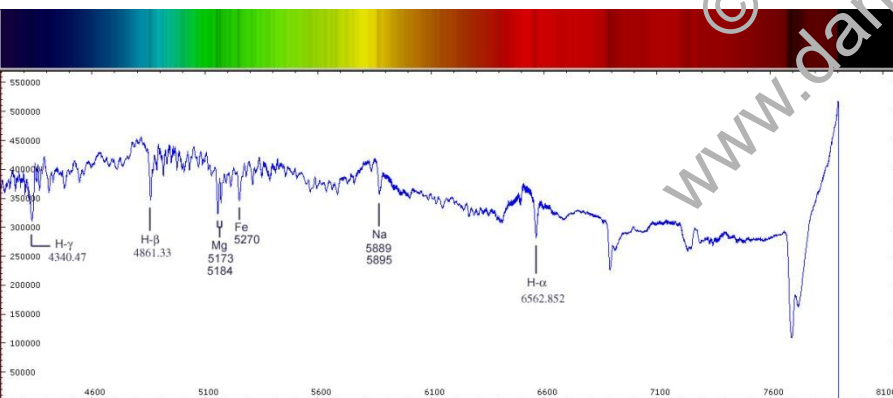


Espectros de fuentes

El *espectro* es el conjunto diferenciado de las distintas radiaciones (λ) que integran la energía irradiada por una fuente.

La *distribución espectral* de la luz es una función $P(\lambda)$ la cual define la potencia para cada longitud de onda.

El *flujo espectral* $\Phi_e(\lambda)$ (comunmente medido en W/nm) se dibuja en función de λ (en nm) y da información objetiva de las intensidades relativas de las distintas longitudes de onda en un haz de luz.



Diferentes fuentes luminosas tienen muy diferentes distribuciones espectrales

Los campos y lo que podemos medir

Vector de Poynting $\vec{S} = \frac{1}{\mu_0} \vec{E} \times \vec{B}$ $[\vec{S}] = \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$

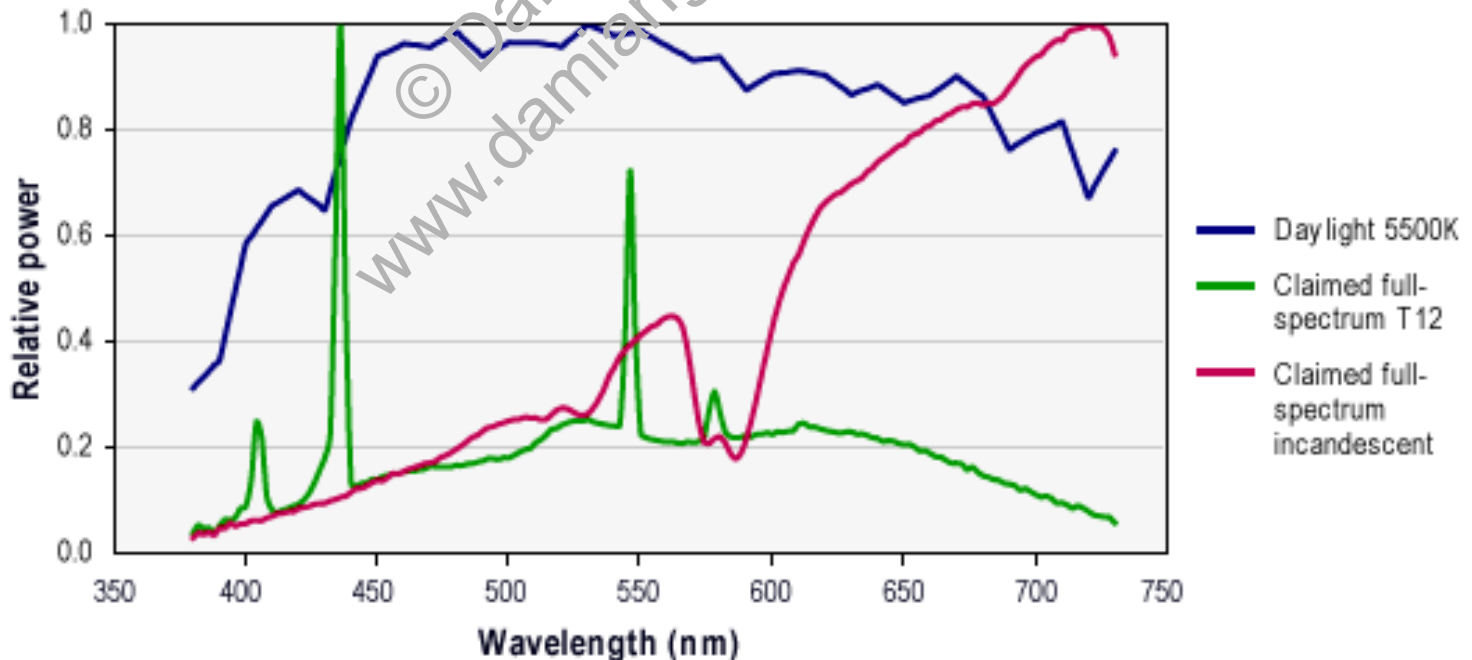
$$\|\vec{S}\| = S = \frac{1}{\mu_0} E_0 B_0$$

Debido a las altas frecuencias a partir del infrarrojo (f de 300 GHz a 430 THz) en general no podemos medir los valores instantáneos de $\vec{E}$ y $\vec{B}$, determinamos con algún instrumento el *flujo* de energía de la radiación absorbiéndola en una superficie y con ello determinamos $\vec{E}$ y $\vec{B}$:

Intensidad: $I = \bar{S} = \frac{1}{\mu_0} E_{\text{rms}} B_{\text{rms}} = \frac{1}{2\mu_0} E_0 B_0 = \frac{1}{2\mu_0 c} E_0^2$

Radiometría, fuentes luminosas

- Se emplean diversos tipos de detectores para hacer una medida **cuantitativa** de la radiación electromagnética de una fuente en cualquier λ .
- En general no hay fuentes que emitan en una sola longitud de onda, sino que éstas emiten un **espectro de frecuencias**.
- $P(\lambda)$ es la **distribución espectral** de potencia radiante para una fuente.



Algunas definiciones

La **radiometría** estudia la energía radiante para cualquier longitud de onda.

La **fotometría** estudia el flujo radiante en la región visible del espectro y tiene como objetivo la evaluación de la energía radiante productora de una sensación visual.

En efecto, no se necesita conocer sólo la eficacia visual de diversas radiaciones sino el comportamiento visual humano para elaborar una fotometría visual.

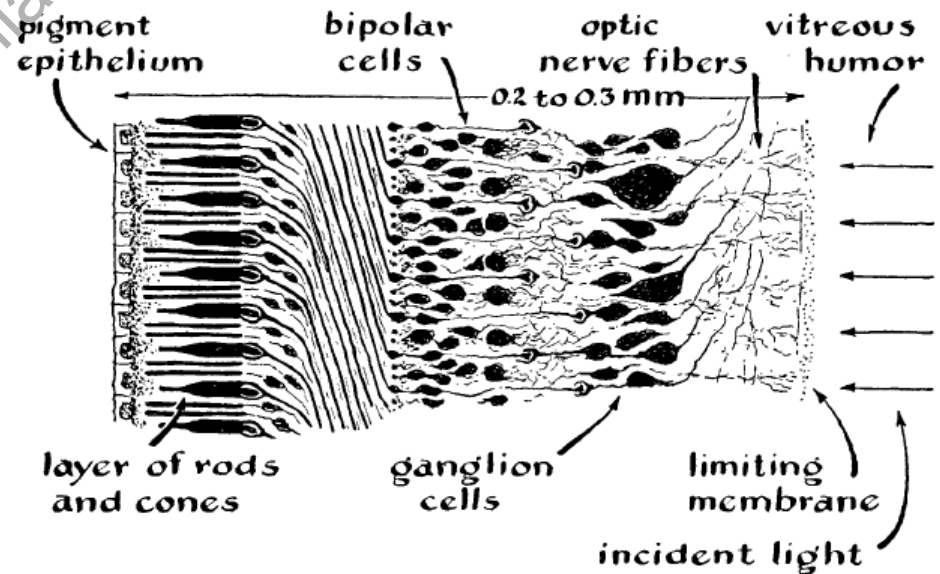
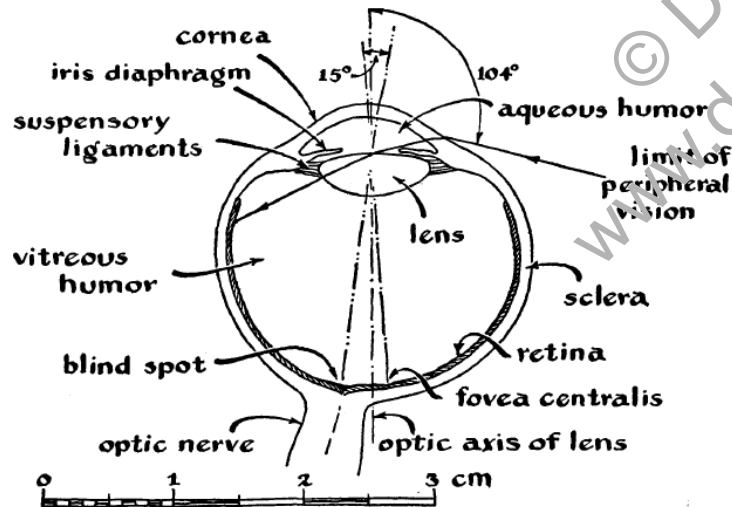
2. El factor humano

© Damián Gulich
www.damiangulich.com.ar

Fotometría: el ojo como detector

- La **fotometría** estudia el flujo radiante en la región del espectro visible por el ojo humano (región en que se produce una sensación visual).

$$380 \text{ nm} \sim \text{UV} \lesssim \lambda_{\text{visible}} \lesssim 700 \text{ nm} \sim \text{IR}$$



La sensación visual

La sensación visual que resulta cuando el flujo radiante incide sobre la retina tiene tres características:

MATIZ permite clasificar a un color como rojo, azul, etc.

SATURACIÓN da el grado en el que el color se separa del gris neutro y se aprox. al color espectral puro

BRILLO es la característica de cualquier sensación que permite clasificarla como equivalente a algún elemento de la escala de grises

CROMATICIDAD
de la sensación
visual

gris neutro es acromático



© Damián Gulich
www.damiangulich.com.ar

Escala de grises para explicar la sensación del brillo. La máxima sensación a la izquierda, la mínima a la derecha.

Respuesta del ojo humano

La **respuesta luminosa** $V(\lambda)$ [o *función luminosa*, o *función de eficiencia luminosa*] es la respuesta del ojo humano a intensidad constante de luz en función de λ .

Visión **escotópica**
(niveles bajos de
iluminación)

Visión **fotópica**
(niveles normales de
iluminación)

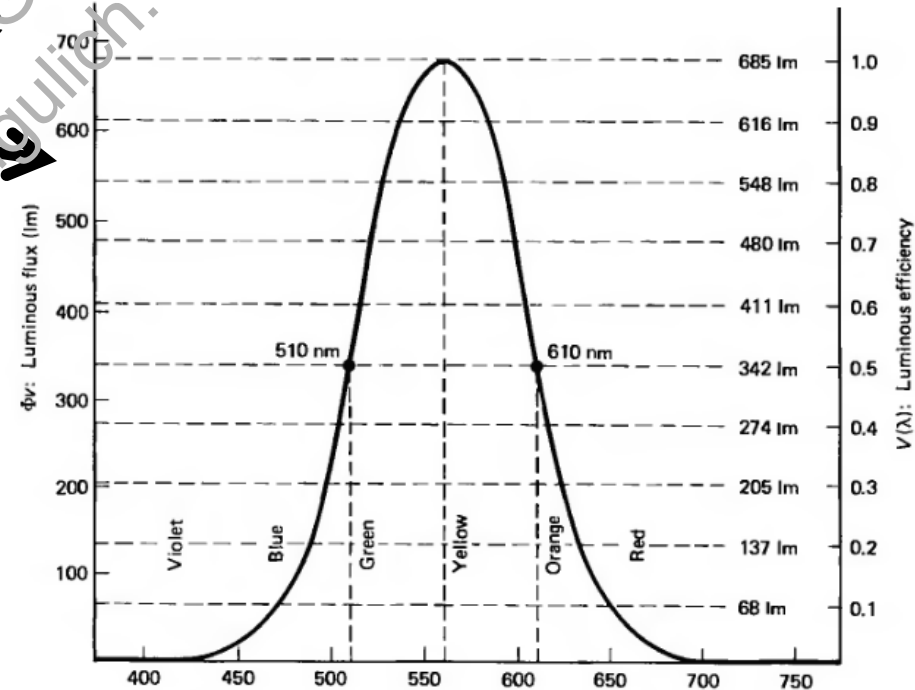
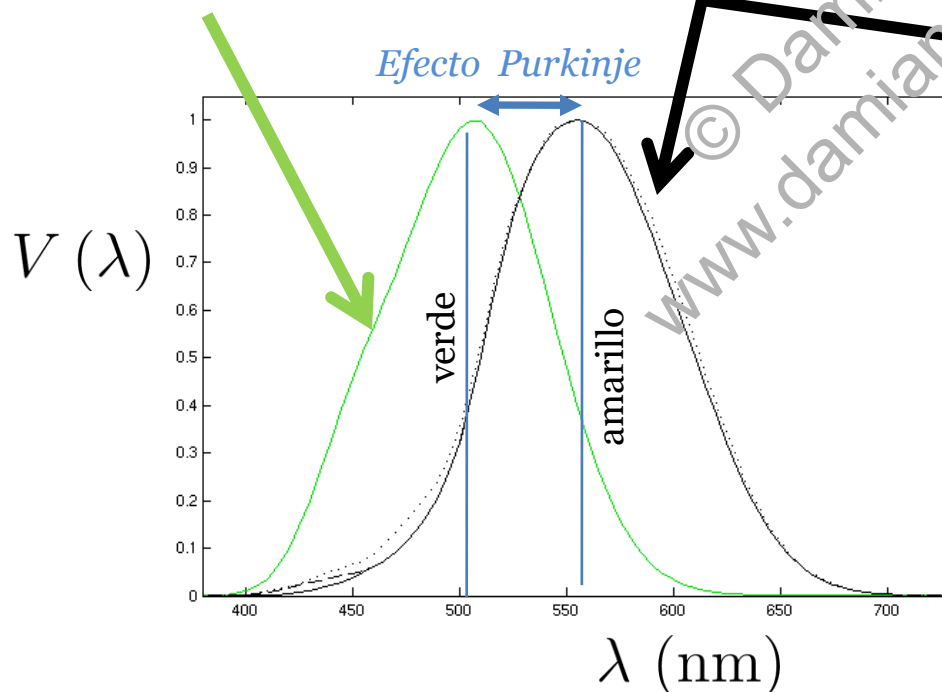


Figure 2-7 CIE luminous efficiency curve. The luminous flux corresponding to 1 W of radiant power at any wavelength is given by the product of 685 lm and the luminous efficiency at the same wavelength: $\Phi_v(\lambda) = 685V(\lambda)$ for each watt of radiant power.

Flujo luminoso

- El **flujo luminoso** da una idea de la cantidad de luz emitida por una fuente en todas direcciones pesada por la sensibilidad del medio de registro (en este caso, el ojo humano)

$$\Phi_{\text{luminoso}} = K_m \int_{380 \text{ nm}}^{700 \text{ nm}} \Phi_{\text{espectral}}(\lambda) V(\lambda) d\lambda$$

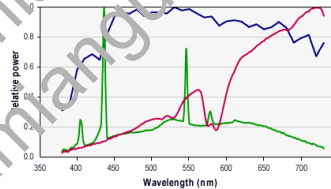
Máxima eficiencia espectral

$K_m = 683,002 \text{ lm/W}$ (cond. fotópicas)

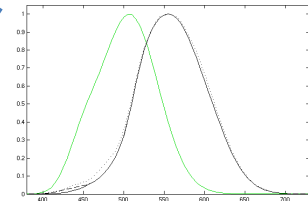
$K_m = 1699 \text{ lm/W}$ (cond. escotópicas)



¡El ojo humano se pone más sensible con baja iluminación!



Depende de la fuente

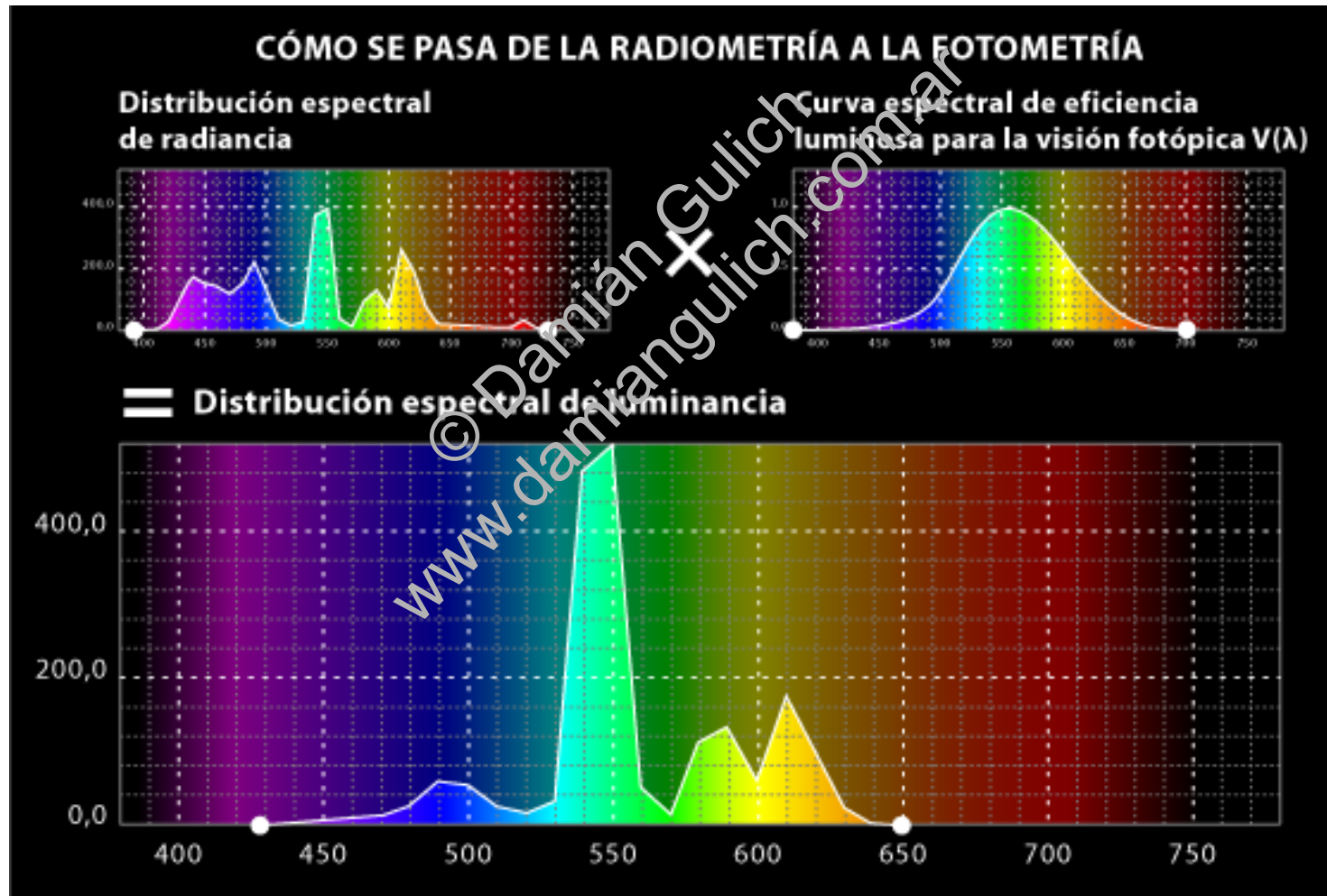


Caso de visión

$$[\Phi_{\text{luminoso}}] = \text{lm} \text{ (\"lumen\")}$$

Ejemplo: Bajo condiciones fotópicas una luz monocromática de 555 nm (color verde) con un flujo radiante de 1 W, genera un flujo luminoso de 683,002 lm, que corresponde con la máxima respuesta del ojo humano

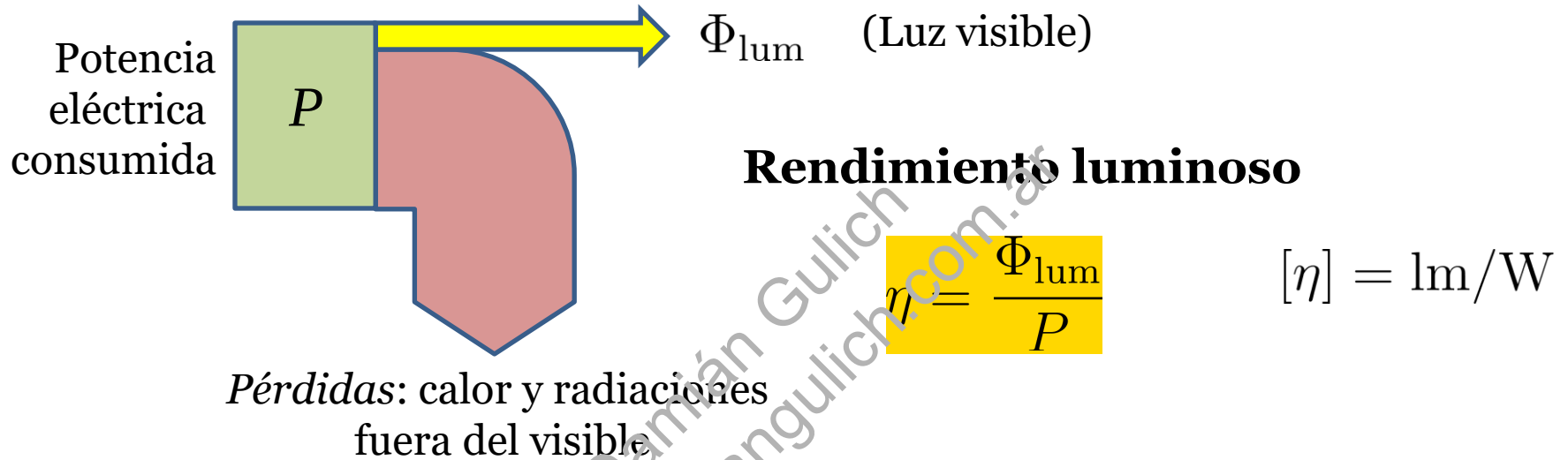
¿Qué consecuencias tiene que el ojo responde a la luz visible con distinta eficiencia a lo largo del espectro visible?



3. Rendimiento de una fuente luminosa

© Damián Guich
www.damianguich.com.ar

Rendimiento de fuentes reales de iluminación



Ejemplo: lámpara Clase A -- la más eficiente de las bajo consumo (\$79 - 2019)

$$\Phi_{\text{lum}} = 1185 \text{ lm}$$
$$P = 20 \text{ W}$$

$$\eta = \frac{1185 \text{ lm}}{20 \text{ W}} = 59,25 \text{ lm/W}$$

Una lamparita incandescente de 100 W ($\eta = 13,8 \text{ lm/W}$) tiene (1380 lm) tiene



Traditional
light bulb
15 lm/W



Energy-saving bulb
(fluorescent)
58 lm/W



LED bulb
76 lm/W



TL tube
100-110 lm/W
(most efficient
existing technology)



Philips TLED
prototype 200 lm/W
twice as much as today's
most efficient
existing technology



The more lumens per watt (lm/W) a lamp produces,
the more energy-efficient it is.

Rendimiento luminoso de algunas fuentes

<i>Tipo de lámpara</i>	<i>Potencial nominal</i>	<i>Rendimiento luminoso</i>	
Lámpara incandescente	40 W	11 lm/W	(1,6 %)
Fluorescente	40 W	80 lm/W	(11,7 %)
Mercurio alta presión	400 W	58 lm/W	(8,5 %)
Halogenuros metálicos	360 W	78 lm/W	(11,4 %)
Sodio a alta presión	400 W	120 lm/W	(17,6 %)
Sodio a baja presión	180 W	183 lm/W	(26,8 %)
LED (comercial)	2 W	200 lm/W	(40 %)

4. Color

© Damián Gulich
www.damiangulich.com.ar

El aspecto de los objetos según la fuente que los ilumina

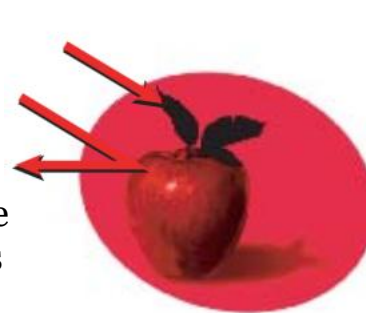
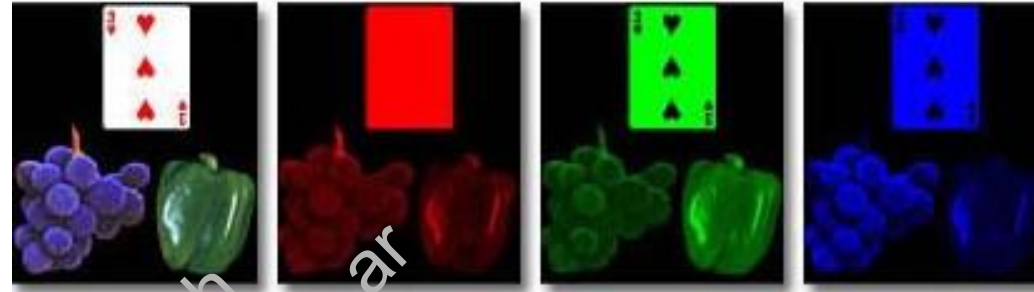
Cuando deseamos evaluar una lámpara, además de las características fotométricas (intensidad, flujo luminoso y rendimiento) debemos analizar la calidad de la reproducción de colores y la duración de las mismas.

Los colores que vemos con nuestros ojos dependen en gran medida de las características cromáticas de las fuentes de luz.

Hemos de considerar dos aspectos:

- el color que presenta la fuente
- cómo son reproducidos los colores de los objetos iluminados por esta fuente

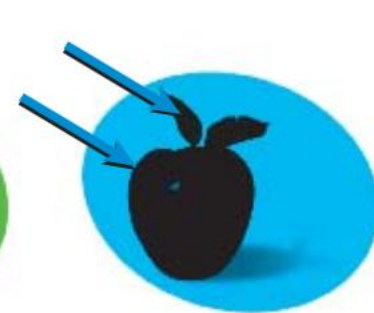
Los objetos iluminados por una lámpara fluorescente no se ven del mismo tono que aquellos iluminados por lámparas incandescentes. En el primer caso destacan más los tonos azules mientras que en el segundo lo hacen los rojos. Esto se debe a que la luz emitida por cada una de estas lámparas tiene un alto porcentaje de radiaciones monocromáticas de color azul o rojo.



In red light, the apple appears red because it reflects the red light. But the leaves look black.



In green light, the apple appears black because no red light strikes it. But the leaves look green.



In blue light, both the apple and the leaves appear black.

Colores de fuentes luminosas - percibidos y mezclas

Los **colores primarios o básicos** son aquellos cuya combinación produce todos los demás.

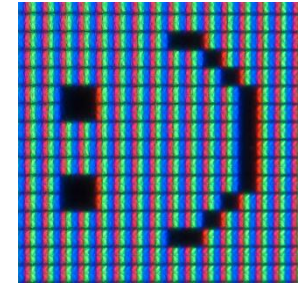
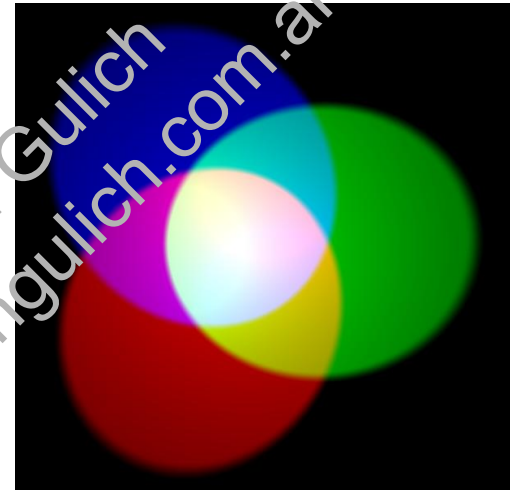
- En imprentas son el cian, el magenta y el amarillo
- En iluminación son el azul (B - blue), el verde (G - green) y el rojo (R - red).

Cualquier otro color se puede obtener combinándolos en diferentes proporciones. Así los **secundarios** se obtienen con mezclas al 50%; los **terciarios** mezclando dos secundarios entre sí, etc.

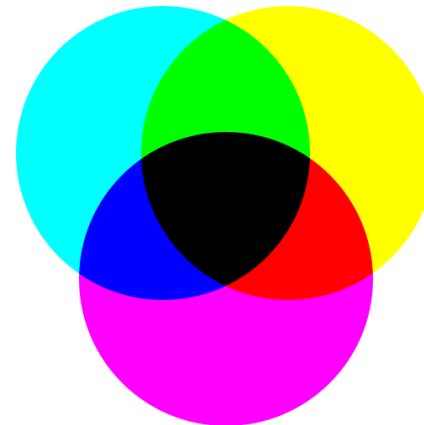
Las mezclas, que en luminotecnia se consiguen mediante filtros y haces de luces, pueden ser aditivas o sustractivas.

1. Las **mezclas aditivas u ópticas** se obtienen sumando haces de luces de colores. El color resultante dependerá de la componente que se halle en mayor proporción y será más intenso que estas. Si la suma diera blanco se diría que son **colores complementarios**.

2. Las **mezclas sustractivas o pigmentarias** se consiguen aplicando a la luz blanca una serie de sucesivos filtros de colores que darán un tono de intensidad intermedia entre las componentes.



En el **sistema RGB** (Red, Green, Blue), usado en informática, un color está definido por la proporción de los tres colores básicos - rojo, verde y azul - empleados en la mezcla.



5. Lámparas

© Damián Gulich
www.damiangulich.com.ar

5.1. Lámparas incandescentes

© Damián Gulich
www.damiangulich.com.ar

Lámparas incandescentes

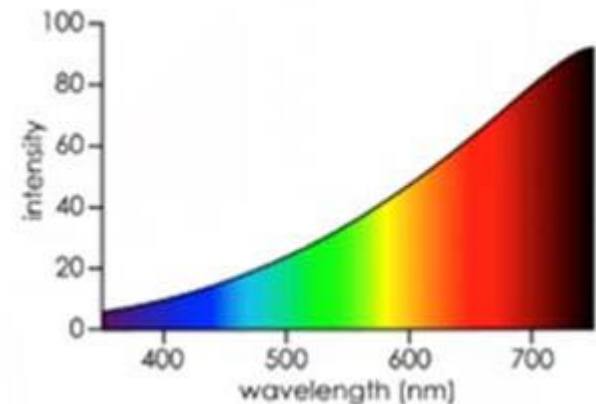
Entre las lámparas incandescentes podemos distinguir las que se han rellenado con un gas inerte de aquellas en que se ha hecho el vacío. La presencia del gas supone un notable incremento de la eficiencia luminosa de la lámpara dificultando la evaporación del material del filamento y permitiendo el aumento de la temperatura de trabajo del filamento. El espectro de estas lámparas es **continuo**.



	Lámparas con gas	Lámparas de vacío
Temperatura del filamento	2500 °C	2100 °C
Eficiencia luminosa de la lámpara	10-20 lm/W	7.5-11 lm/W
Duración	1000 horas	1000 horas
Pérdidas de calor	Convección y radiación	Radiación



Incandescent

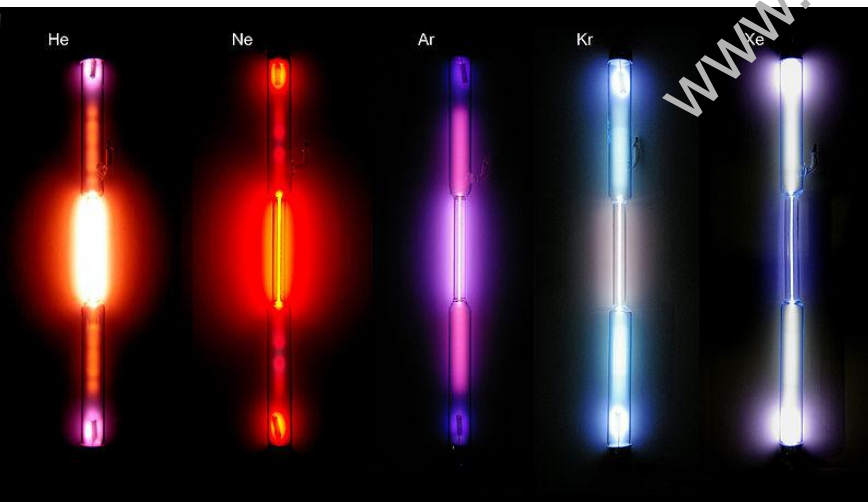
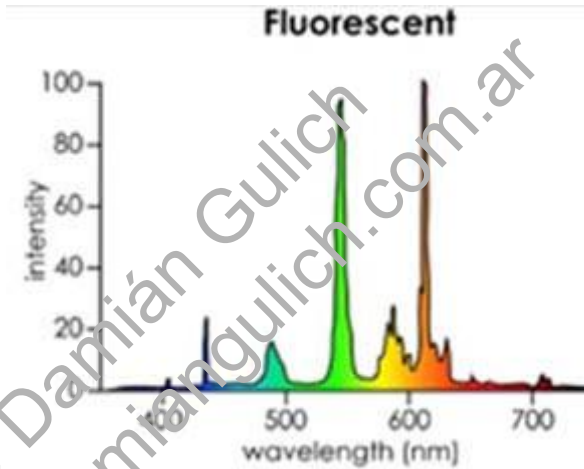
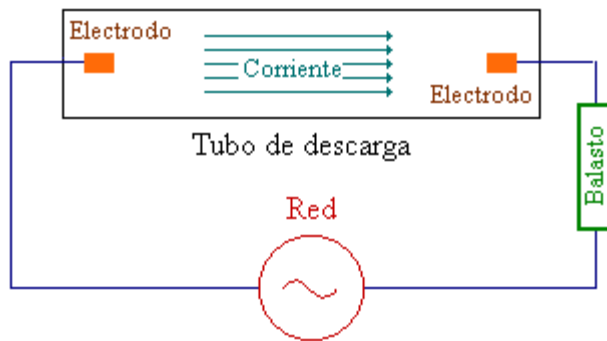


5.2. Lámparas de descarga

© Damián Gulich
www.damiangulich.com.ar

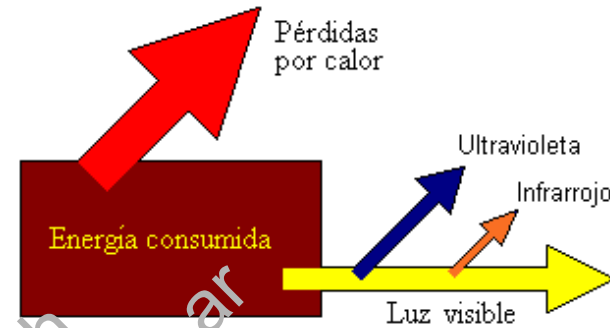
Lámparas de descarga

Las lámparas de descarga constituyen una forma alternativa de producir luz de una manera más eficiente y económica que las incandescentes. La luz emitida se consigue por excitación de un gas sometido a corriente eléctrica entre electrodos. Según el gas contenido en la lámpara y la presión a la que esté sometido tendremos diferentes tipos de lámpara con sus propias características luminosas.



El espectro de estas lámparas es **discontinuo**. La consecuencia de esto es que la luz emitida no es blanca (por ej. en las lámparas de Na a baja presión es amarillenta). Por lo tanto, la capacidad de reproducir los colores de estas fuentes de luz es, en gral., peor que en el caso de las lámparas incandescentes que tienen un espectro continuo.

Lámparas de descarga - color



En las lámparas de descarga la reproducción del color en principio no es muy buena pues sólo se emiten ciertas longitudes de onda dependientes del gas.

Para solucionar este problema podemos tratar de completar el espectro con radiaciones de longitudes de onda distintas a las de la lámpara. Hay distintas opciones:

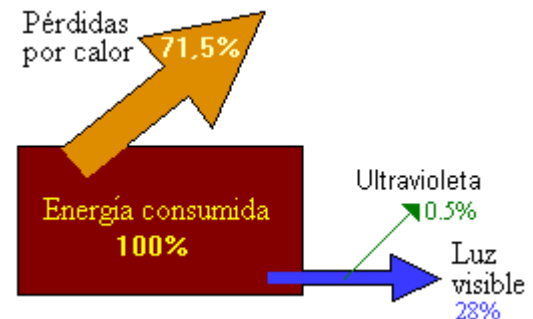
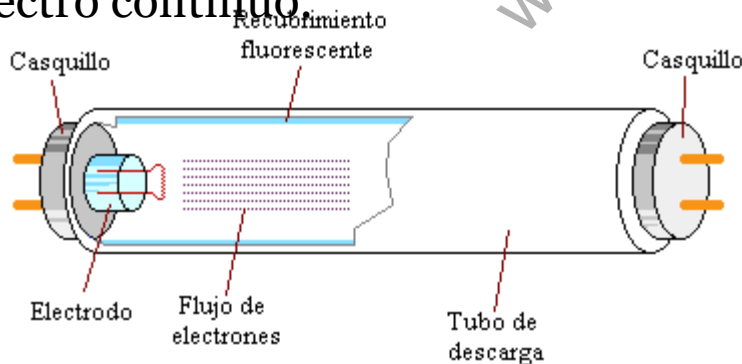
- 1) combinar en una misma lámpara dos fuentes de luz con espectros que se complementen como ocurre en las lámparas de luz de mezcla (incandescencia y descarga).
- 2) aumentar la presión del gas, aumenta el ancho de las líneas del espectro de manera que formen bandas anchas y más próximas entre sí.
- 3) añadir sustancias sólidas al gas, que al vaporizarse emitan radiaciones monocromáticas complementarias.
- 4) recubrir la pared interna del tubo con una sustancias fluorescentes que conviertan los rayos ultravioletas en radiaciones visibles (mejora reproducción de colores y eficiencia).

Lámparas de descarga - clases

Se pueden clasificar según el gas utilizado (vapor de Hg o Na) o la presión a la que este se encuentre (alta o baja presión).

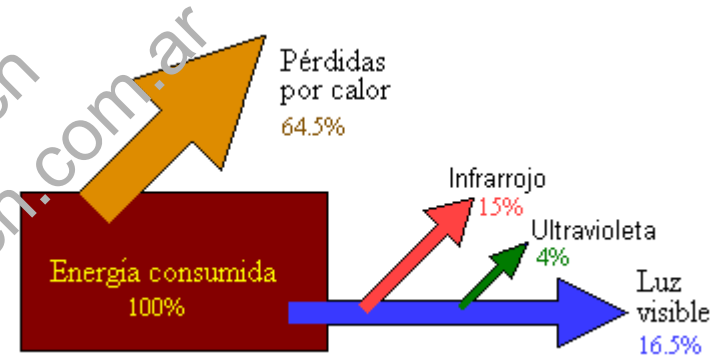
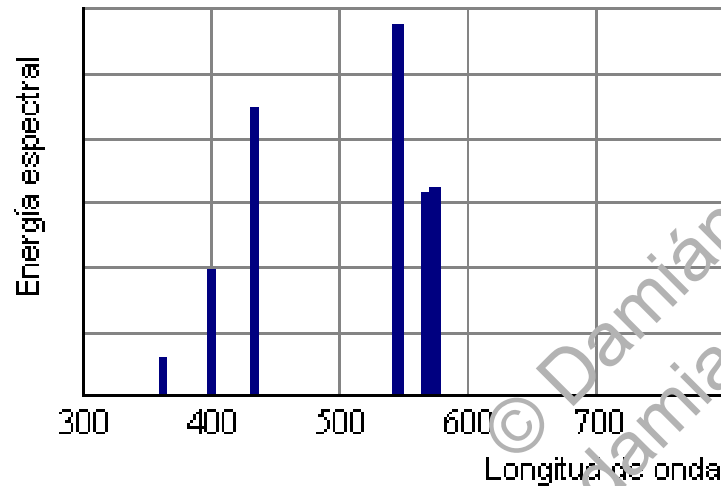
Lámparas de vapor de Hg a baja presión (0.8 Pa) (lámparas fluorescentes)

En el espectro de emisión del Hg predominan las radiaciones UV en la banda de 253.7 nm. Para que estas radiaciones sean útiles, se recubren las paredes interiores del tubo con polvos fluorescentes que convierten las radiaciones UV en visibles. De la composición de estas sustancias dependerán la cantidad y calidad de la luz, y las cualidades cromáticas de la lámpara. En la actualidad se usan dos tipos de polvos; los que producen un espectro continuo y los trifósforos que emiten un espectro de tres bandas con los colores primarios. De la combinación estos tres colores se obtiene una luz blanca que ofrece un buen rendimiento de color sin penalizar la eficiencia como ocurre en el caso del espectro continuo.



Lámparas de vapor de mercurio a alta presión

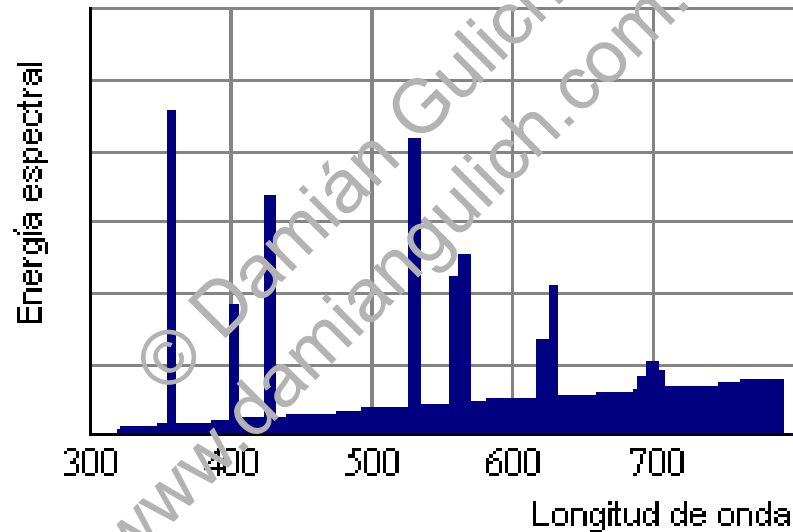
A medida que aumentamos la presión del vapor de Hg en el tubo de descarga, la radiación UV característica de la lámpara a baja presión pierde importancia respecto a las emisiones en la zona visible (violeta de 404.7 nm, azul 435.8 nm, verde 546.1 nm y amarillo 579 nm).



En estas condiciones la luz emitida, de color azul verdoso, no contiene radiaciones rojas. Para resolver este problema se acostumbra a añadir sustancias fluorescentes que emitan en esta zona del espectro. De esta manera se mejoran las características cromáticas de la lámpara.

Lámparas mezcla

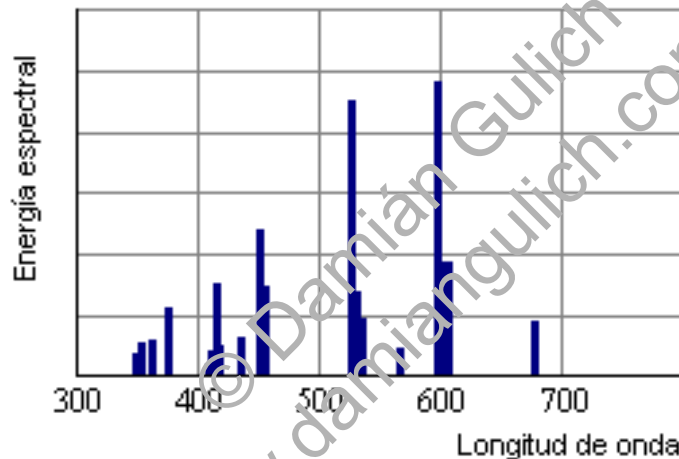
Combinación de una lámpara de Hg a alta presión con una lámpara incandescente y un recubrimiento fosforescente. El resultado de esta mezcla es la superposición, al espectro del Hg, del espectro continuo característico de la lámpara incandescente y las radiaciones rojas provenientes de la fosforescencia.



Su eficiencia está entre 20 y 60 lm/W y es el resultado de la combinación de la eficiencia de una lámpara incandescente con la de una lámpara de descarga.

Lámparas con halogenuros metálicos

Si añadimos en el tubo de descarga yoduros metálicos (sodio, talio, indio...) se consigue mejorar considerablemente la capacidad de reproducir el color de la lámpara de vapor de Hg. Cada una de estas sustancias aporta nuevas líneas al espectro (por ej. amarillo el sodio, verde el talio y rojo y azul el indio).

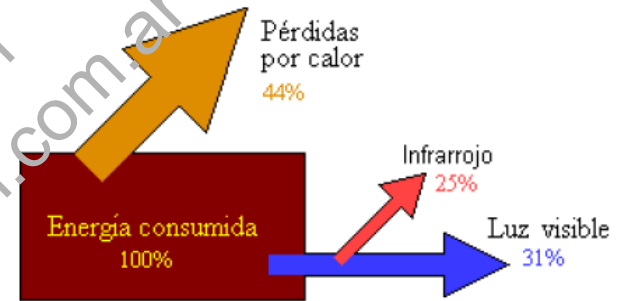
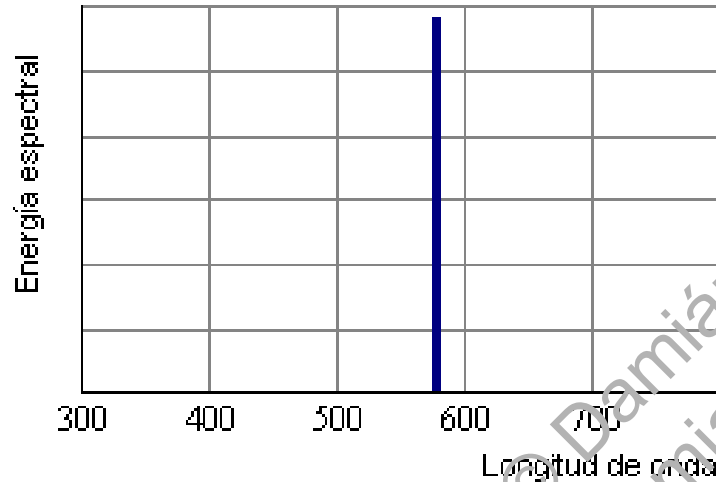


La eficiencia de estas lámparas ronda entre los 60 y 96 lm/W y su vida media es de unas 10000 horas.

Las excelentes prestaciones cromáticas la hacen adecuada entre otras para la iluminación de instalaciones deportivas, para retransmisiones de TV, estudios de cine, proyectores, etc.

Lámparas de vapor de sodio a baja presión

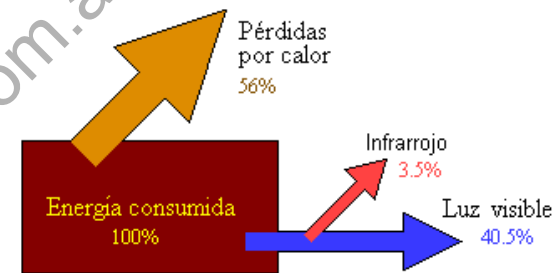
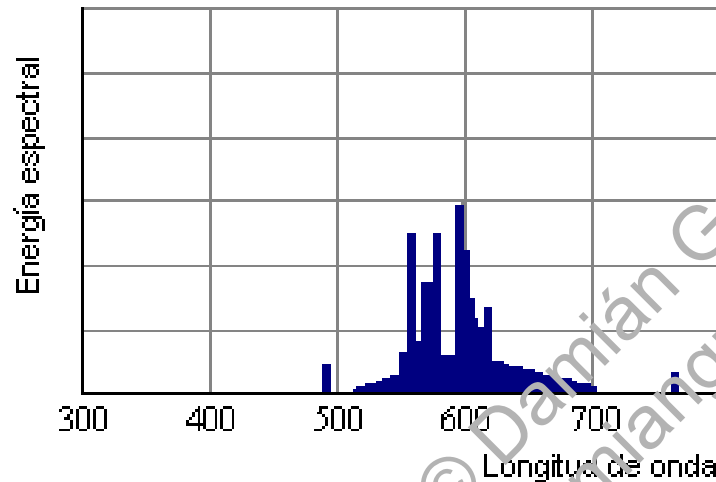
La descarga eléctrica en un tubo con vapor de Na a baja presión produce una radiación monocromática característica formada por dos rayas en el espectro (589 nm y 589.6 nm) muy próximas entre sí.



La radiación emitida, de color amarillo, está muy próxima al máximo de sensibilidad del ojo humano (555 nm). Por ello, la eficiencia de estas lámparas es muy elevada (entre 160 y 180 lm/W). Su monocromatismo hace que la reproducción de colores sean muy malos haciendo imposible distinguir los colores de los objetos.

Lámparas de vapor de sodio a alta presión

Estas lámparas tienen una distribución espectral que abarca casi todo el espectro visible proporcionando una luz blanca dorada mucho más agradable que la proporcionada por las lámparas de baja presión.



Capacidad para reproducir los colores mucho mejores que la de las lámparas a baja presión. No obstante, esto se consigue a base de sacrificar eficiencia; aunque su valor está alrededor de 130 lm/W.

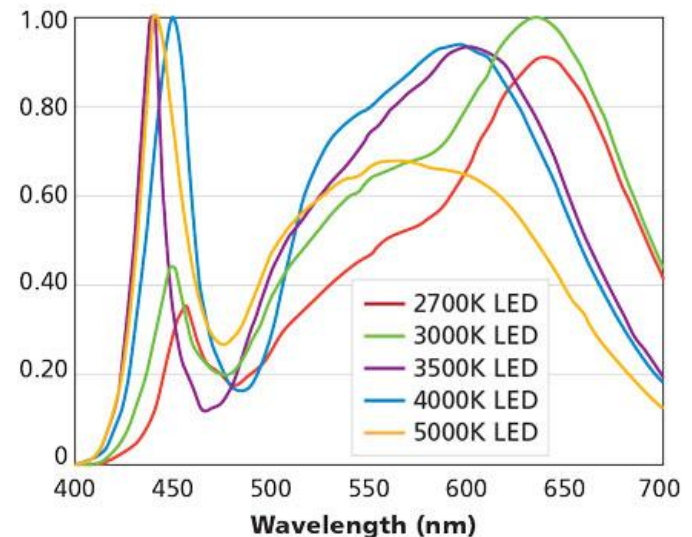
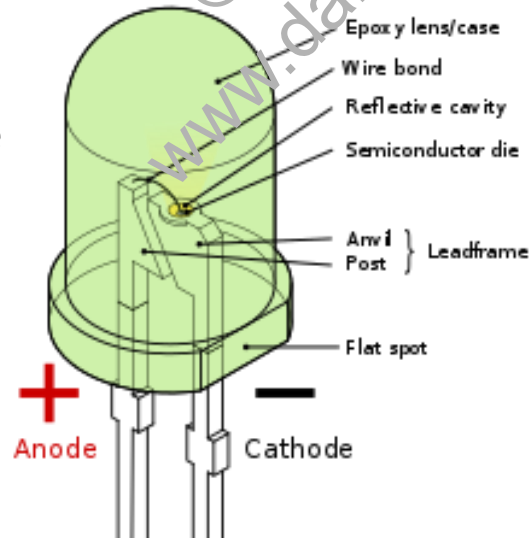
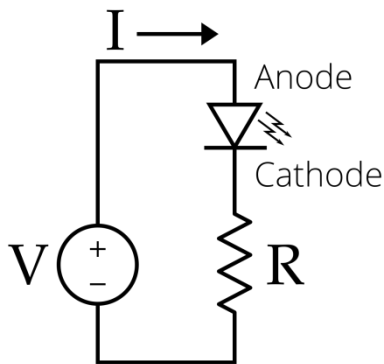
Las condiciones de funcionamiento son muy exigentes debido a las altas temperaturas (1000 °C), la presión y las agresiones químicas producidas por el Na que debe soportar el tubo de descarga.

5.3. Lámparas de LED

© Damián Gulich
www.damiangulich.com.ar

Lámparas de LED

- Una bombilla LED es una luz eléctrica para uso en luminarias que produce luz mediante diodo emisor de luz (LED). Las lámparas LED tienen una vida útil más larga que las lámparas incandescentes, y son significativamente más eficientes que la mayoría de las lámparas fluorescentes, con algunos chips LED capaces de emitir hasta 303 lm/W.
- Sin embargo, las lámparas LED requieren un controlador electrónico de LED cuando se usan líneas eléctricas, y las pérdidas de este circuito significan que la eficiencia de la lámpara es menor que la eficiencia de los chips LED que utiliza. Las lámparas LED más eficientes tienen eficiencias de 200 lm/W.
- A partir de 2016, los LED usan solo alrededor del 10% de la energía que requiere una lámpara incandescente.





Ejemplo: lámpara LED -- (\$90 - 2018)

$$\Phi_{\text{lum}} = 806 \text{ lm}$$

$$P = 10 \text{ W}$$

$$\eta = \frac{806 \text{ lm}}{10 \text{ W}} = 80,6 \text{ lm/W}$$

$$\eta = 200 \text{ lm/W}$$



Candle 1 Watt

With a light output of 200 lumen, this lamp can replace a 25W incandescent candle lamp, for example in chandeliers. Its filament LED technology gives the same decorative impression as the original incandescent lamps. The lamp is available in warm white and cool daylight. The lifetime is 25,000 hours. The lamp has an E14 base and is not dimmable. This product contains no mercury.

$$\eta = 200 \text{ lm/W}$$



Bulb 2 Watt

With a light output of 400 lumen, this lamp can replace a 40W incandescent bulb, for example in decorative fixtures or areas where not much light is needed. Its filament LED technology gives the same decorative impression as the original incandescent lamps. The lamp is available in warm white and cool daylight. The lifetime is 25,000 hours. The lamp has an E27 base and is not dimmable. This product contains no mercury.

$$\eta = 200 \text{ lm/W}$$



Bulb 3 Watt

With a light output of 600 lumen, this lamp can replace a 60W incandescent bulb, in the most common areas in the house. Its filament LED technology gives the same decorative impression as the original incandescent lamps. The lamp is available in warm white and cool daylight. The lifetime is 25,000 hours. The lamp has an E27 base and is not dimmable. This product contains no mercury.

$$\eta = 140 \text{ lm/W}$$



Spot 3 Watt

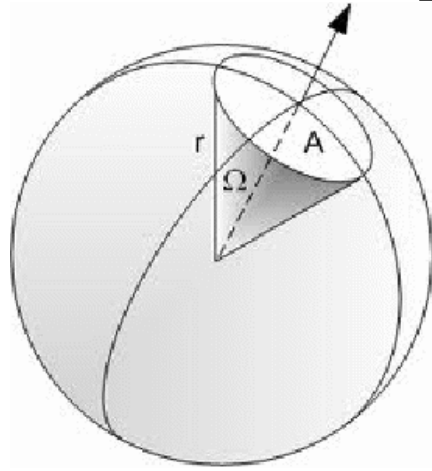
With a light output of 420 lumen, this lamp can replace low-voltage halogen lamps of 35W or 50W, for example in small recessed spotlights. The lamp has new LEDs and a newly developed driver on board to make it compatible with most of the commonly used transformers. The lamp is available in warm white and cool daylight. The lifetime is 25,000 hours. The lamp has a GU5.3 base and is not dimmable. This product contains no mercury.

6. Medidas de fotometría

© Damián Gulich
www.damiangulich.com.ar

Intensidad luminosa

- Las fuentes pueden no iluminar igual en todas las direcciones.



El **estereorradián** es la medida ángulo sólido sobre una esfera

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

$$[\Omega] = \text{sr} \text{ (‘‘estereorradián’’)}$$

$$0 \leq \Omega \leq 4\pi$$



$$d\Omega = \frac{dA}{r^2}$$

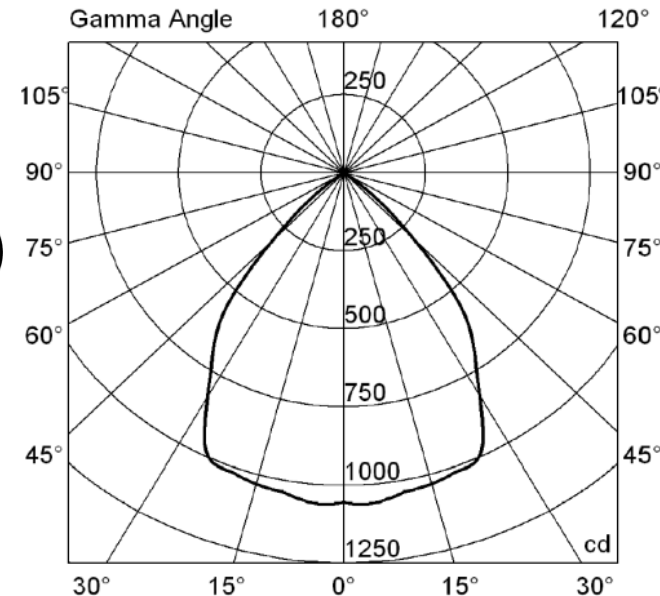
Intensidad luminosa:

$$I_{\text{lum}} = \frac{d\Phi_{\text{lum}}}{d\Omega}$$

$$[I_{\text{lum}}] = \frac{\text{lm}}{\text{sr}} = \text{cd} \text{ (‘‘candela’’)}$$

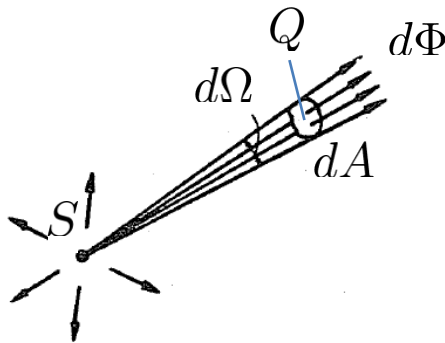
Esta definición es ideal para fuentes **puntuales**.

La **candela** es la intensidad luminosa, en una dada dirección, de una fuente que emite radiación monocromática de 540×10^{12} Hz y que tiene una intensidad radiante en esa dirección de $1/683$ W/sr. $[K_m = 683,002 \text{ lm/W (cond. fotópicas)}]$

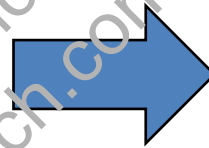


Luminaria comercial

Ejemplo: Consideremos el flujo $d\Phi$ que una fuente puntual S emite en la dirección del punto Q situado en el centro de un elemento de superficie dA que subtiende un ángulo sólido $d\Omega$ desde S :



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



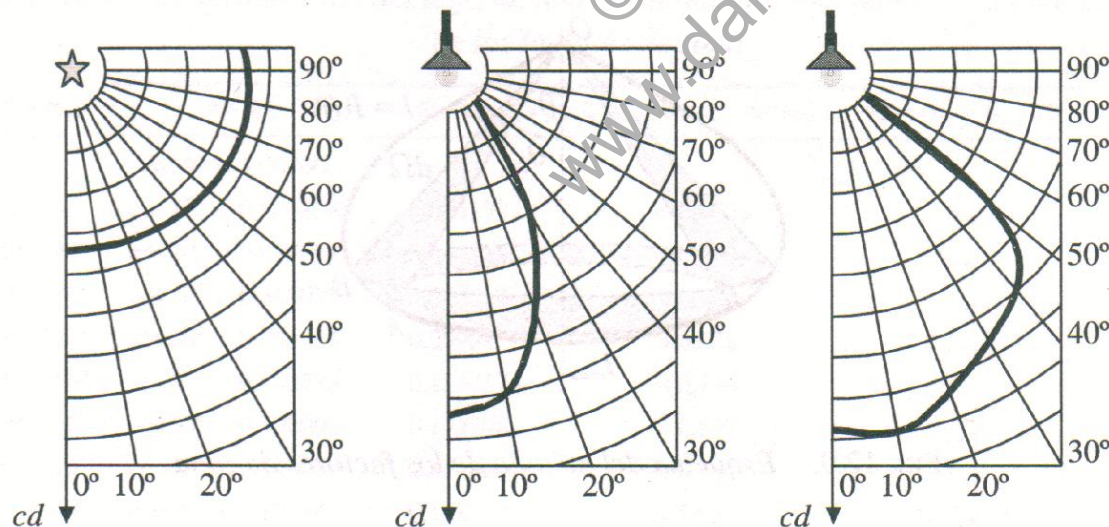
$$\Phi = \iint_{\Omega} I \, d\Omega$$

En el caso particular de que la intensidad radiada I sea independiente de la dirección (fuente isotrópica) el flujo total Φ emitido por la fuente es

$$\Phi = 4\pi \text{ sr} \cdot I$$

<i>Tipo de fuente</i>	<i>Intensidad</i>	<i>Direccionalidad</i>
Vela	1 cd	Todas direcciones
Lámpara de incandescencia 40 W/220 V	35 cd	Todas direcciones
Lámpara de incandescencia 300 W/220 V	400 cd	Todas direcciones
Lámpara de incandescencia 300 W/220 V con cono reflector	1.500 cd	Centro del haz
Lámpara de yoduros metálicos 2 KW	14.800 cd	Todas direcciones
Lámpara de yoduros metálicos 2 KW con cono reflector	250.000 cd	Centro del haz

Intensidad de
algunas fuentes
de luz así como su
direccionalidad



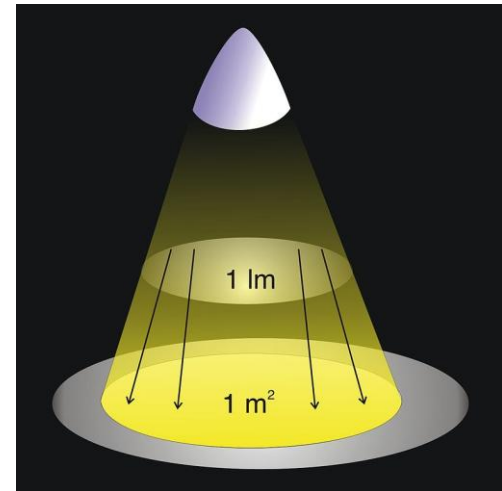
Curvas de distribución
de intensidad luminosa
a) fuente puntual
b) y c) lámparas con
luminarias

Iluminancia

- La **iluminancia** es el flujo luminoso que incide por unidad de área en un objeto iluminado.

$$E_{\text{lum}} = \frac{d\Phi_{\text{lum}}}{dA}$$

$$[E_{\text{lum}}] = \frac{\text{lm}}{\text{m}^2} = \text{lx ("lux")}$$



Luxómetro de la cátedra empleado en los trabajos de laboratorio.

Fuente puntual

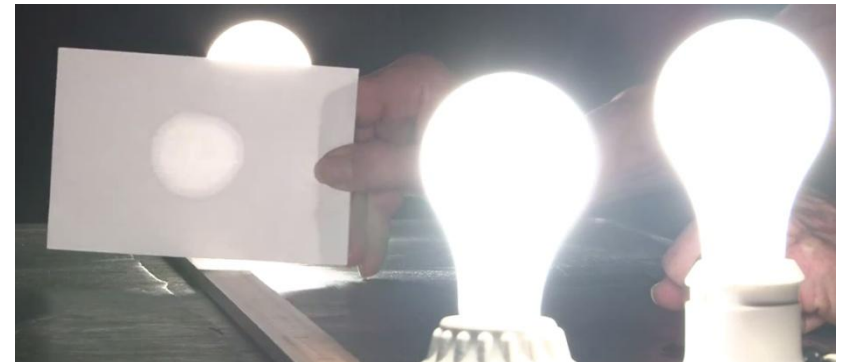
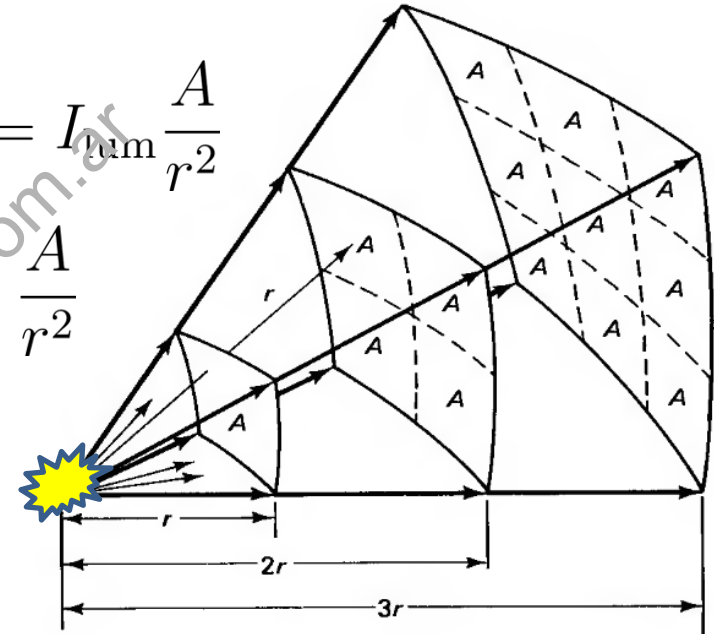
Si la fuente ilumina igual en todas direcciones, aproximamos las derivadas como valores medios (los rayos luminosos inciden normalmente sobre una superficie esférica centrada en la fuente):

$$I_{\text{lum}} = \frac{d\Phi_{\text{lum}}}{d\Omega} \equiv \frac{\Phi_{\text{lum}}}{\Omega} \Rightarrow \Phi_{\text{lum}} = I_{\text{lum}} \Omega = I_{\text{lum}} \frac{A}{r^2}$$

En este caso

$$E_{\text{lum}} = \frac{d\Phi_{\text{lum}}}{dA} \equiv \frac{\Phi_{\text{lum}}}{A} = I_{\text{lum}} \frac{A}{Ar^2} = \boxed{\frac{I_{\text{lum}}}{r^2}}$$

Illuminancia de la fuente puntual



Fuente puntual: Iluminancia sobre superficies

¿Qué pasa si la incidencia de los rayos no es normal a la superficie? Trabajando con una fuente puntual y uniforme en todas direcciones cuyos rayos inciden sobre una superficie horizontal dA ,

$$I_{\text{lum}} = \frac{d\Phi_{\text{lum}}}{d\Omega} \quad \text{donde} \quad d\Omega = \frac{dA'}{r^2} = \frac{dA \cos(\theta)}{r^2}$$

$$\Rightarrow d\Phi_{\text{lum}} = I_{\text{lum}} \cdot d\Omega = I_{\text{lum}} \cdot \frac{dA \cos(\theta)}{r^2}$$

La **iluminancia horizontal** (de la superficie horizontal dA) es $E_H = \frac{d\Phi_{\text{lum}}}{dA}$

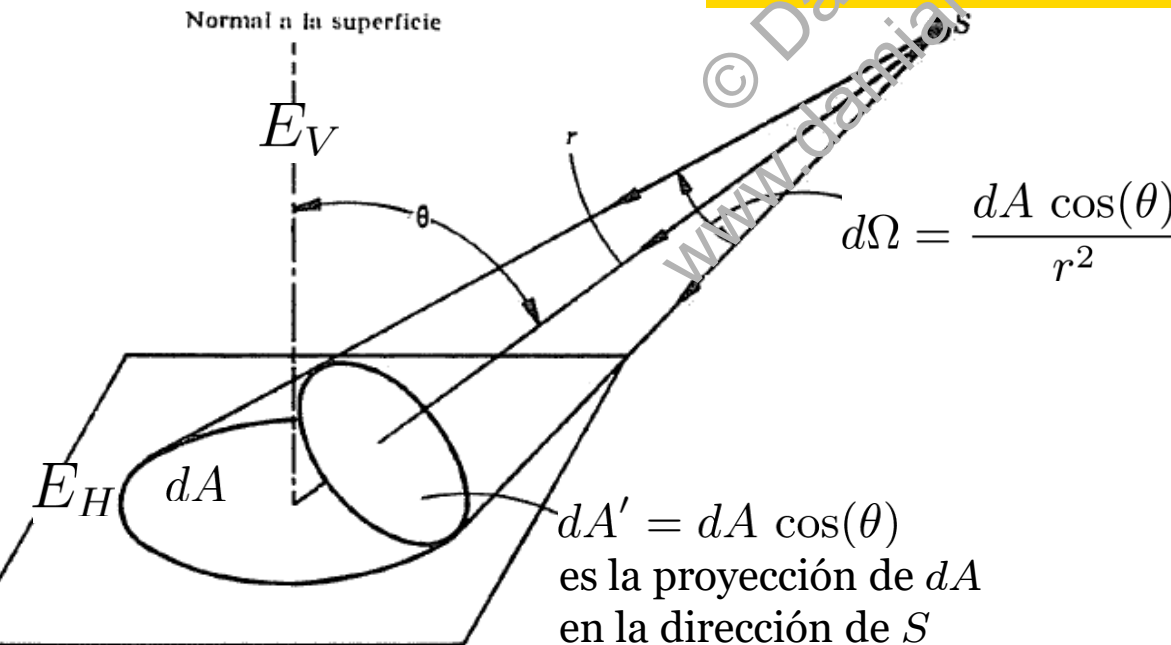
$$E_H = \frac{I_{\text{lum}} \cos(\theta)}{r^2}$$

se le conoce como “**ley del coseno**”

Análogamente, la **iluminancia vertical** es

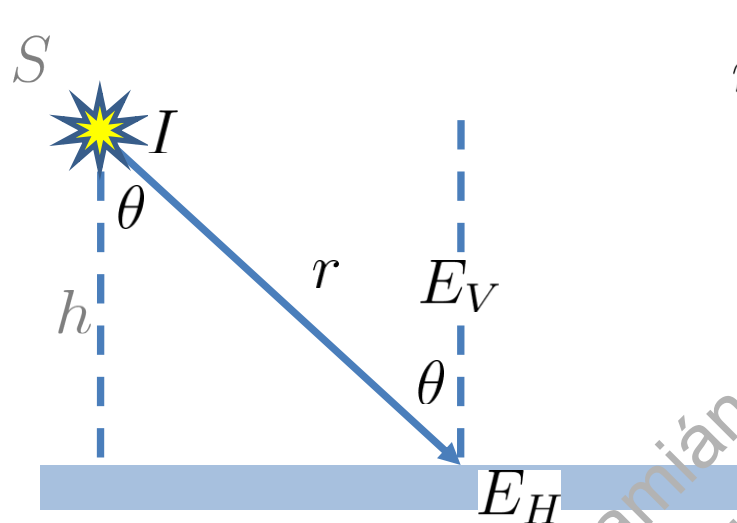
$$E_V = \frac{I_{\text{lum}} \sin(\theta)}{r^2}$$

$$E_V = E_H \cdot \tan(\theta)$$



Fuente puntual: Iluminancia sobre superficies (cont.)

También se pueden reescribir las expresiones anteriores en términos de la distancia del foco S a la superficie (h)



$$r = \frac{h}{\cos(\theta)}$$

$$E_H = \frac{I \cdot \cos^3(\theta)}{h^2}$$

$$E_V = \frac{I \cdot \cos^2(\theta) \cdot \sin(\theta)}{h^2}$$

Si un punto de la superficie está iluminado por N fuentes puntuales, su iluminancia total es la suma de las iluminancias recibidas:

$$E_H = \sum_{i=1}^N \frac{I_i \cdot \cos^3(\theta_i)}{h_i^2}$$

$$E_V = \sum_{i=1}^N \frac{I_i \cdot \cos^2(\theta_i) \cdot \sin(\theta_i)}{h_i^2}$$

Luminancia

La **luminancia** L es la intensidad luminosa que una superficie emite en una dirección determinada por unidad de superficie proyectada (superficie vista desde dicha dirección). Su símbolo es L y su unidad es la cd/m^2 .

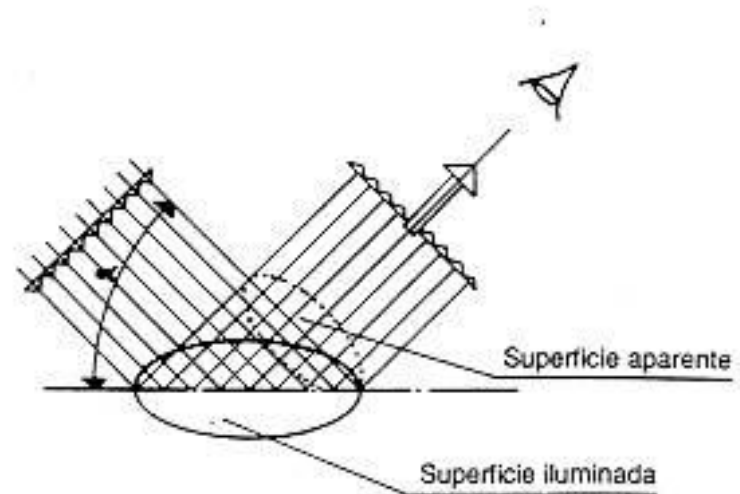
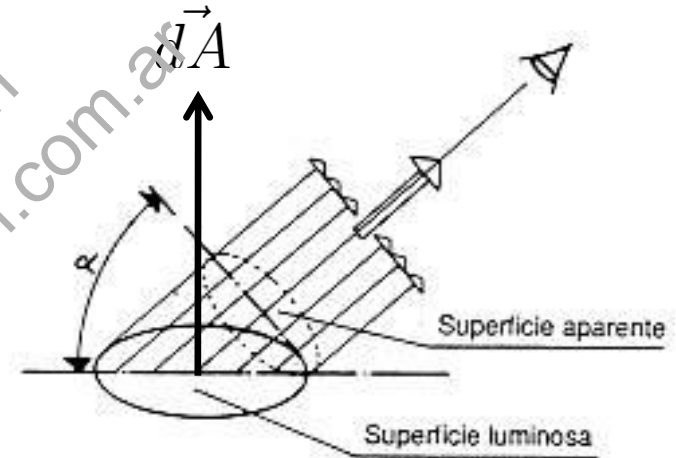
También es posible encontrar otras unidades como el stilb ($1 \text{ sb} = 1 \text{ cd}/\text{cm}^2$) o el nit ($1 \text{ nt} = 1 \text{ cd}/\text{m}^2$).

$dA \cdot \cos(\alpha)$ Es una pequeña área proyectada en la dirección del observador

dI_{lum}^{α} Es la intensidad de la fuente en el ángulo α

$$L = \frac{dI_{\text{lum}}^{\alpha}}{dA \cdot \cos(\alpha)}$$

$$[L] = \frac{\text{cd}}{\text{m}^2}$$



¿Cómo se mide la luz?

Lumen y *lux* fotométrico son términos que representan la cantidad de luz que cae sobre una superficie por segundo.

Valores típicos de iluminancia generados por [lux]	
Sol + cielo	100.000
Sol + cielo (nublado)	10.000
Interior cerca de una ventana	1.000
Luz de la luna llena	0,2
Luz de las estrellas	0,0003

El ojo humano es sensible a esta amplia gama (¡10 órdenes de magnitud !)

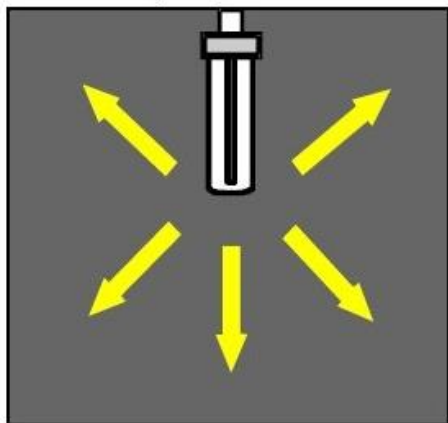
Las cámaras son sensibles a 3 órdenes de magnitud

• Los niveles de iluminación recomendados dependen de las actividades que se vayan a realizar. Podemos distinguir entre tareas con requerimientos luminosos mínimos, normales o exigentes.

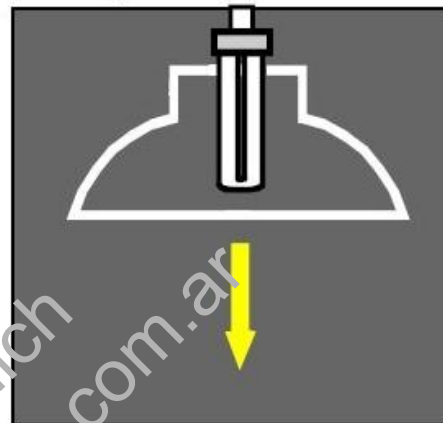
Valores típicos de iluminancia necesarios para, [lux]	
almacenes, cuartos de maquinaria..	50 - 200
zonas de trabajo	100 - 1000
Mínimo recomendado para trabajos comunes	100
tareas visuales con un grado elevado de detalle	2000

$$\Phi_{\text{lum}}$$

a) Flujo luminoso

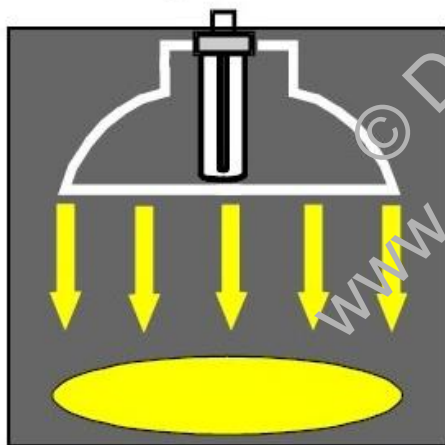


b) Intensidad luminosa



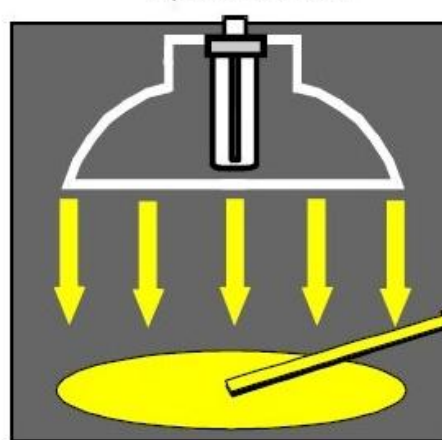
$$I_{\text{lum}} = \frac{d\Phi_{\text{lum}}}{d\Omega}$$

c) Iluminancia



$$E_{\text{lum}} = \frac{d\Phi_{\text{lum}}}{dA}$$

d) Luminancia



$$L = \frac{dI_{\text{lum}}^{\alpha}}{dA \cdot \cos(\alpha)}$$

Magnitudes radiométricas y fotométricas

		Radiometría		Fotometría	
Magnitud	Símbolo	Denominación	Unidad	Denominación	Unidad
Flujo de energía	Φ	Potencia Radiante	Watt	Flujo luminoso	Lumen (lm)
Sobre una superficie	E	Irradiancia	W/m ²	Iluminancia	Lux (lx)
Desde una superficie	I	Intensidad radiante	W/sr	Intensidad luminosa	Candela (cd)
Propagándose en un haz	L	Radiancia	W/m ² sr	Luminancia	Cd/m ²

Preguntas

© Damian Gulich
www.damiangulich.com.ar

Ejemplos

© Damian Gulich
www.damiangulich.com.ar

Un flujo radiante esta formado por 20 W de luz monocromática de longitud de onda de 500 nm y 10 W de luz monocromática de longitud de onda de 600 nm a) ¿Cuál es el flujo radiante del conjunto? b) Cual es el flujo luminoso c) rendimiento de dicho flujo radiante

Flujo radiante $P_1 = 20 \text{ W}$ $P_2 = 10 \text{ W}$
 Long. Onda $\lambda_1 = 500 \text{ nm}$ $\lambda_2 = 600 \text{ nm}$

Flujo luminoso = $\Phi =$
 $(0.323 \times 20 \text{ W} + 0.631 \times 10 \text{ W}) \times 685 \text{ lm/W} =$
 $= 8747 \text{ lm}$

Rendimiento = $\Phi / P_1 + P_2$
 $= 8747 \text{ lm} / 30 \text{ W} = 292 \text{ lm/W}$

$\lambda \text{ (nm)}$	$V(\lambda)$	$\lambda \text{ (nm)}$	$V(\lambda)$	$\lambda \text{ (nm)}$	$V(\lambda)$	$\lambda \text{ (nm)}$	$V(\lambda)$
380	0,0000	480	0,1390	580	0,8700	680	0,0170
385	0,0001	485	0,1693	585	0,8163	685	0,0119
390	0,0001	490	0,2080	590	0,7570	690	0,0082
395	0,0002	495	0,2586	595	0,6949	695	0,0057
400	0,0004	500	0,3230	600	0,6310	700	0,0041
405	0,0006	505	0,4073	605	0,5668	705	0,0029
410	0,0012	510	0,5030	610	0,5030	710	0,0021
415	0,0022	515	0,6082	615	0,4412	715	0,0015
420	0,0040	520	0,7100	620	0,3810	720	0,0010
425	0,0073	525	0,7932	625	0,3210	725	0,0007
430	0,0116	530	0,8620	630	0,2650	730	0,0005
435	0,0168	535	0,9149	635	0,2170	735	0,0004
440	0,0230	540	0,9540	640	0,1750	740	0,0003
445	0,0298	545	0,9803	645	0,1382	745	0,0002
450	0,0380	550	0,9950	650	0,1070	750	0,0001
455	0,0480	555	1,0002	655	0,0816	755	0,0001
460	0,0600	560	0,9950	660	0,0610	760	0,0001
465	0,0739	565	0,9786	665	0,0446	765	0,0000
470	0,0910	570	0,9520	670	0,0320	770	0,0000
475	0,1126	575	0,9154	675	0,0232	775	0,0000

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 m² de la pared, y el proyector está situado a 20 m de dicha pared. Calcule la intensidad luminosa del proyector.

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

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

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

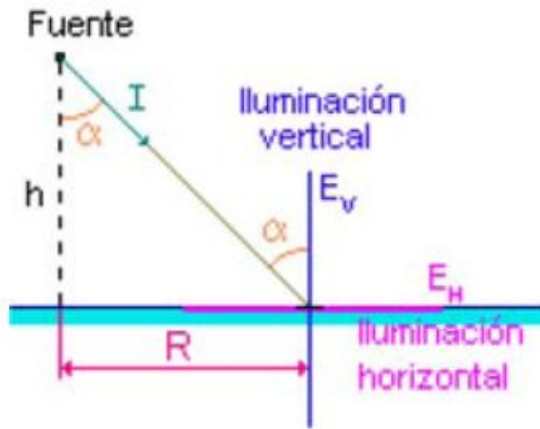
$$\Omega = \frac{A}{R^2} = \frac{9 \text{ m}^2}{(20 \text{ m})^2} = 0.0225 \text{ sr}$$

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

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

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.

Una superficie está iluminada por una fuente luminosa puntual de 80 cd de intensidad cte en todas direcciones situada a 2 m de altura. Calcular la iluminancia horizontal y vertical para los ángulo alfa: 0, 30°.



$$E_H = \frac{I \cdot \cos^3 \alpha}{h^2}$$

$$E_V = \frac{I \cdot \cos^2 \alpha \cdot \sin \alpha}{h^2}$$

$$E = \sqrt{E_H^2 + E_V^2}$$

dado que $h = 2 \text{ m}$, $I = 80 \text{ cd}$ y $\alpha = 0^\circ$ y $\alpha = 30^\circ$ entonces:

$$\alpha = 0^\circ$$

$$E_H = \frac{I \cdot \cos^3 \alpha}{h^2} = \frac{80 \cdot \cos^3 0}{2^2} = 20 \text{ lx}$$

$$E_V = \frac{I \cdot \cos^2 \alpha \cdot \sin \alpha}{h^2} = \frac{80 \cdot \cos^2 0 \cdot \sin 0}{2^2} = 0$$

$$E = \sqrt{E_H^2 + E_V^2} = E_H = 20 \text{ lx}$$

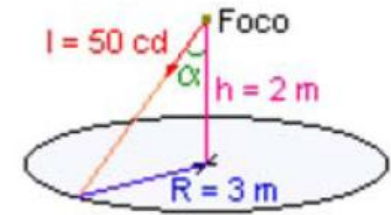
$$\alpha = 30^\circ$$

$$E_H = \frac{I \cdot \cos^3 \alpha}{h^2} = \frac{80 \cdot \cos^3 30}{2^2} = 12.99 \text{ lx}$$

$$E_V = \frac{I \cdot \cos^2 \alpha \cdot \sin \alpha}{h^2} = \frac{80 \cdot \cos^2 30 \cdot \sin 30}{2^2} = 7.5 \text{ lx}$$

$$E = \sqrt{E_H^2 + E_V^2} = 15 \text{ lx}$$

Una superficie circular de 3 m de radio está iluminada por una lámpara de 50 cd de intensidad constante en todas direcciones situada a 2 m de altura sobre el centro de la superficie. Calcular la iluminación horizontal máxima y mínima sobre la superficie.



Como la intensidad es constante en todas direcciones y la altura también el valor de la iluminancia dependerá únicamente de la distancia de los puntos al foco. En nuestro caso el punto más próximo es la proyección de la bombilla sobre la superficie ($\alpha = 0^\circ$) y los más alejados son aquellos que están en los bordes ($R = 3 \text{ m}$).

Iluminancia máxima:

$$\alpha = 0^\circ; \quad E_{max} = \frac{I \cdot \cos^3 \alpha}{h^2} = \frac{50 \cdot \cos^3 0}{2^2} = 12.5 \text{ lx}$$

Iluminancia mínima ($R = 3 \text{ m}$):

$$\tan \alpha = \frac{d}{h} = \frac{3}{2}; \quad \alpha = 56.31^\circ; \quad E_{min} = \frac{I \cdot \cos^3 \alpha}{h^2} = \frac{50 \cdot \cos^3 56.31}{2^2} = 2.13 \text{ lx}$$

A que altura por encima del centro de una mesa circular de radio R debe colocarse una fuente luminosa puntual para producir una iluminación máxima en el borde de la mesa?

$$E = \frac{I \cos \theta}{d^2} = \frac{I h}{(R^2 + h^2)^{3/2}}$$

$$\frac{dE}{dh} = 0 = I(R^2 + h^2)^{-3/2} - 12h^2 \frac{3}{2}(R^2 + h^2)^{-5/2}$$

$$R^2 + h^2 - 3h^2 = 0$$

$$R^2 - 2h^2 = 0$$

$$h = \frac{R}{\sqrt{2}}$$

¡Gracias!

© Damien Gulich
www.damiangulich.com.ar