

## B.0. Introducción y unidades de medida

### B.0.1. La era de la información.

Corresponde al auge de la optoelectrónica.

Optoelectrónica: técnica de procesar la información mediante la luz.

Necesidad de medios muy eficaces de intercambio de información.

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

Funciones básicas:

- Detección y recepción de la información.
- Amplificación de la información.
- Manipulación de la información.
- Memoria.
- Transferencia de información.
- Generación de la información.
- Visualización la información.

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

Desventajas de los dispositivos electrónicos:

- Necesidad de interconexión mediante cables o conexiones metálicas.
- La utilización de cables es cara, no es capaz de transmitir muchos canales y necesita repetidores cada cierta distancia.
- Interferencias electromagnéticas.
- Los electrones no se ven, por lo que necesariamente debemos utilizar visualizadores.

### B.0.4. Ventajas de un sistema de procesamiento de la información basado en la luz.

- 1) Inmunidad frente a las interferencias electromagnéticas.
- 2) No-interferencia de dos señales luminosas que se cruzan.
- 3) Posibilidad de un alto paralelismo.
- 4) Alta velocidad / alto ancho de banda.

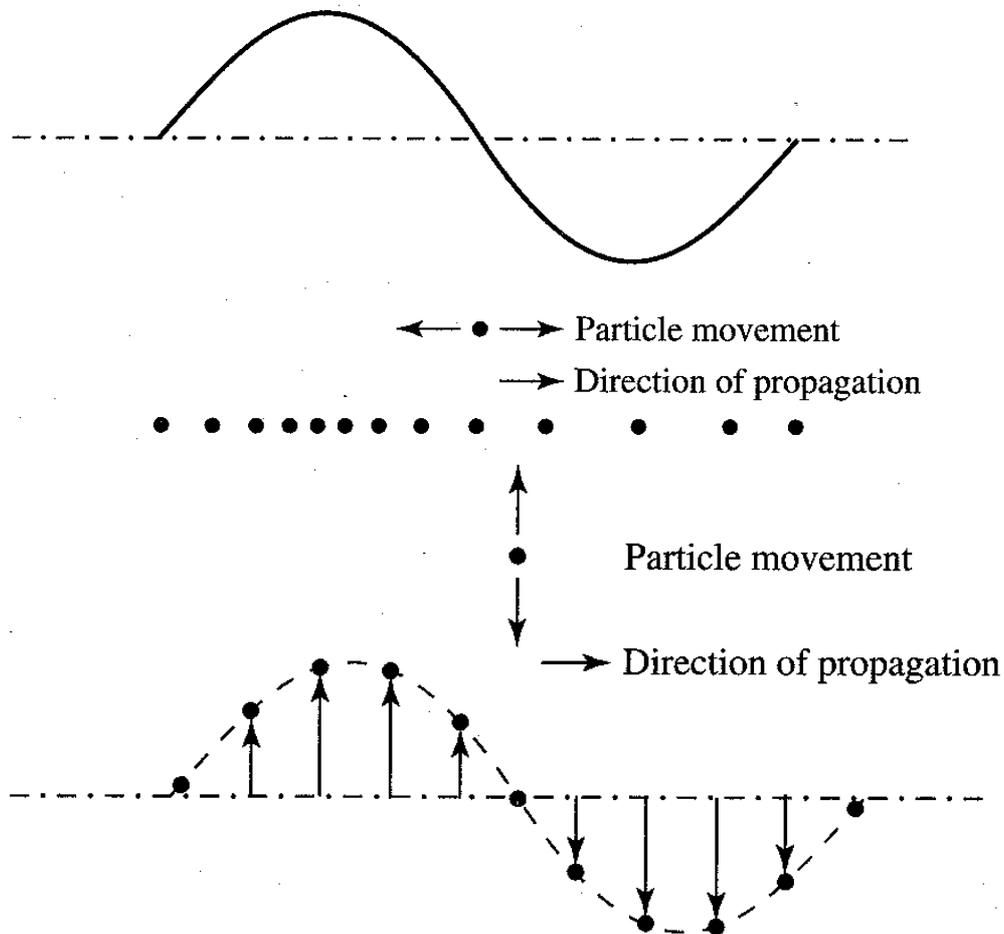
5) Fácil direccionalidad de los haces de luz mediante lentes u hologramas.

6) Dispositivos de funciones especiales (transformadas de Fourier de imágenes, análisis espectrales, etc).

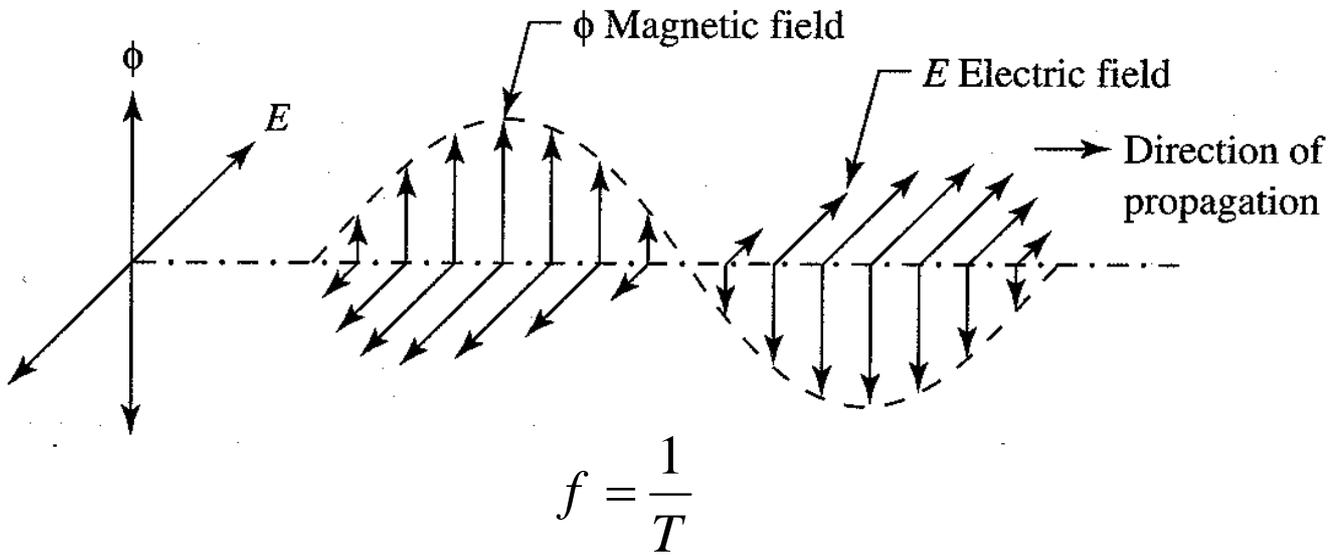
7) Facilidad de acoplamiento con un sistema electrónico.

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

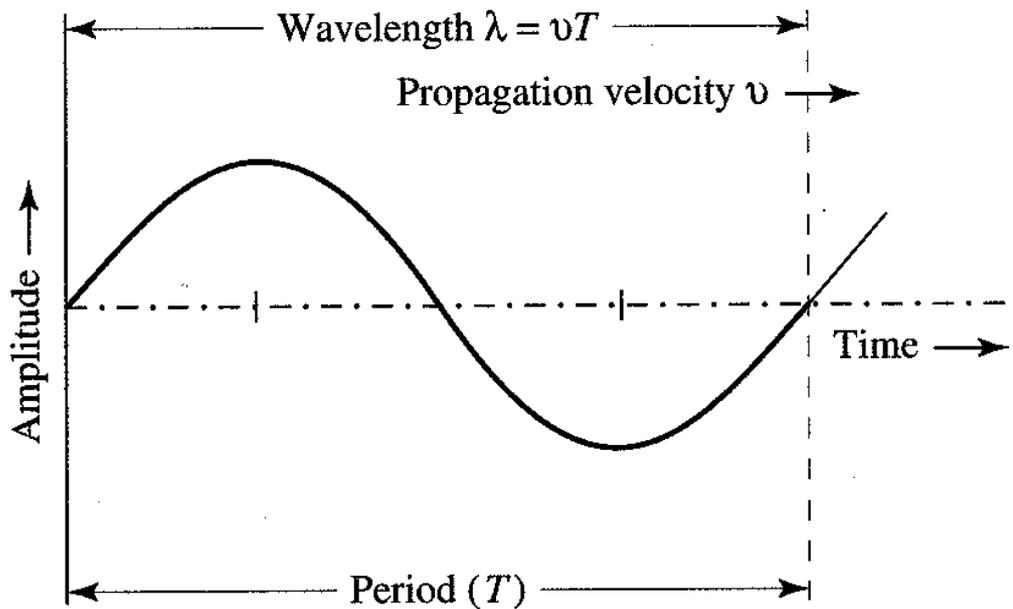
### B.0.5.1. Tipos de ondas.



Onda electromagnética (luz):



### B.0.5.2. Relaciones y ecuaciones.

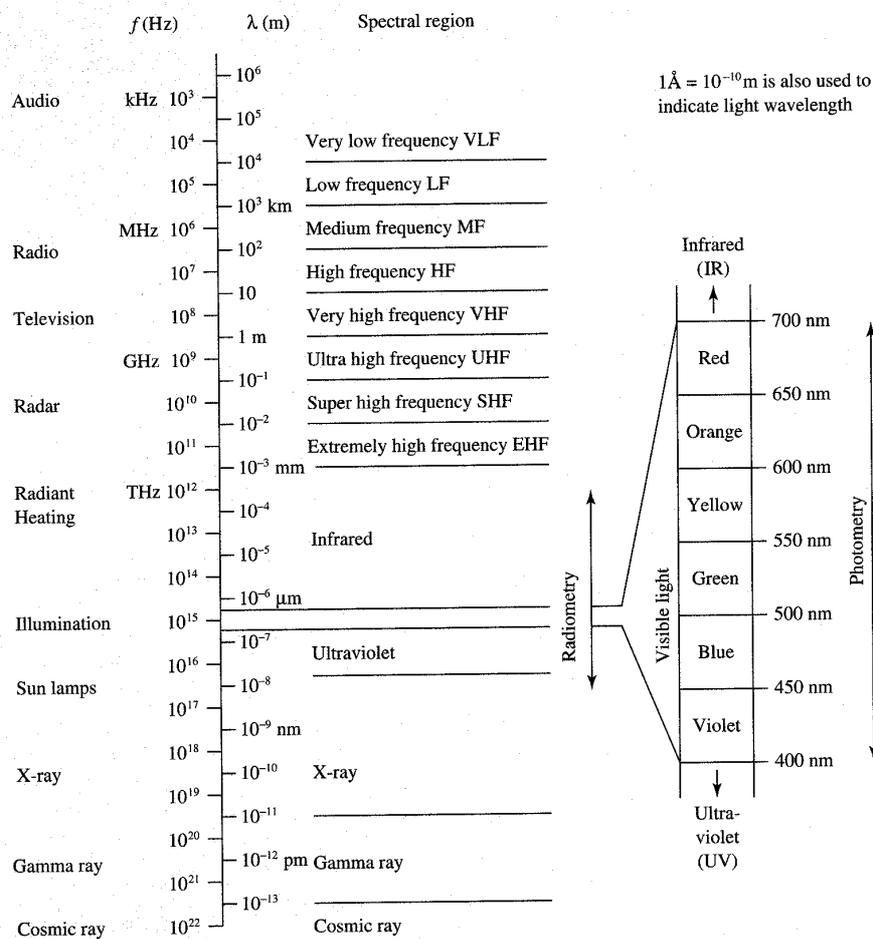


$$\lambda = v \cdot T = v / f$$

Velocidad de la luz en el vacío:

$$c = 2.997924574 \times 10^8 \text{ (m/s)}$$

## B.0.5.3. El espectro electromagnético.



## B.0.5.4. Radiometría y fotometría.

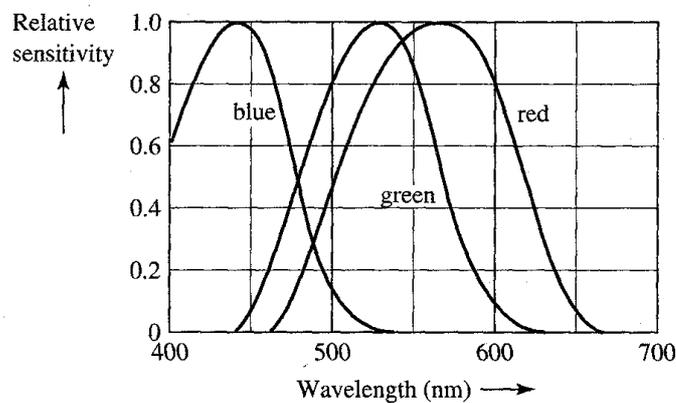
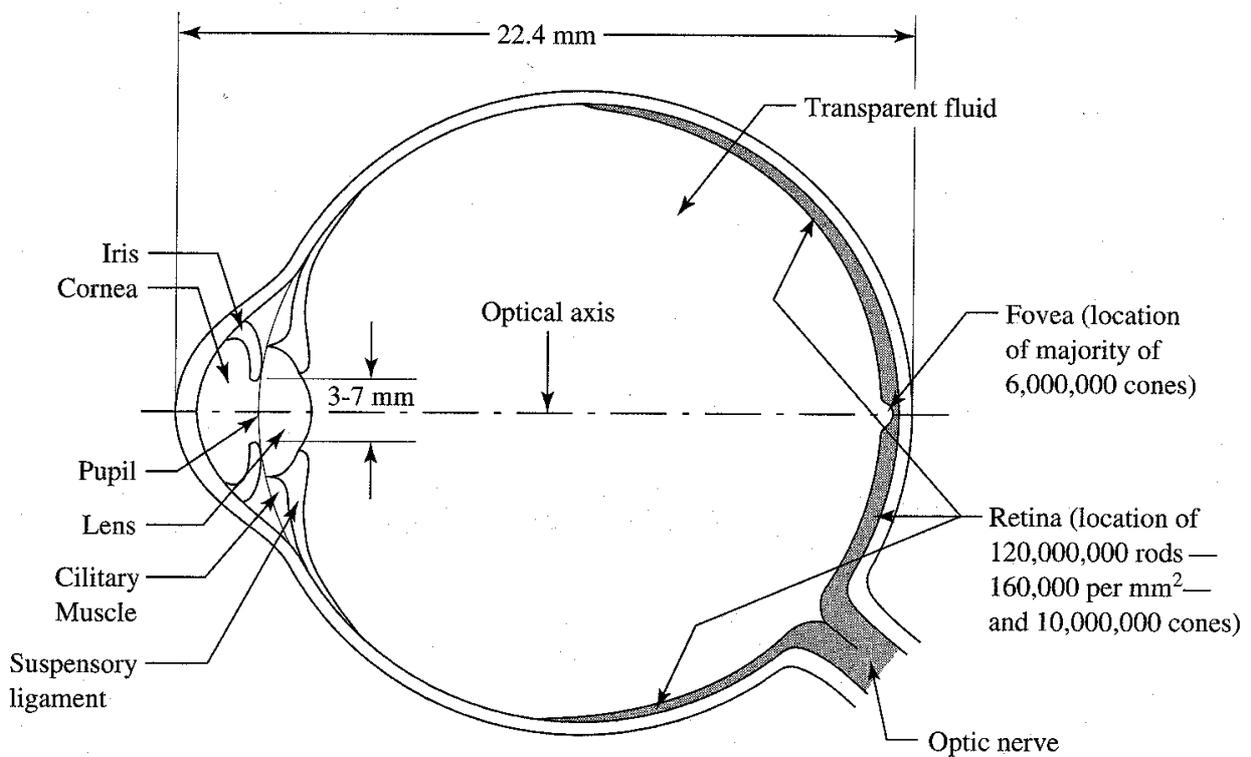
**Radiometría:** estudia las propiedades y características de la radiación, describe el campo de radiación, la interacción de la radiación con dispositivos y receptores, y las características de las fuentes de radiación y receptores.

En radiometría se mide radiación ==> resultados en watos, watos por metro cuadrado, etc

**Fotometría:** estudia la luz visible (entre 400 y 700nm) y su percepción por el ojo humano .

## B.0.6. La naturaleza de la visión humana.

### B.0.6.1. El ojo humano.

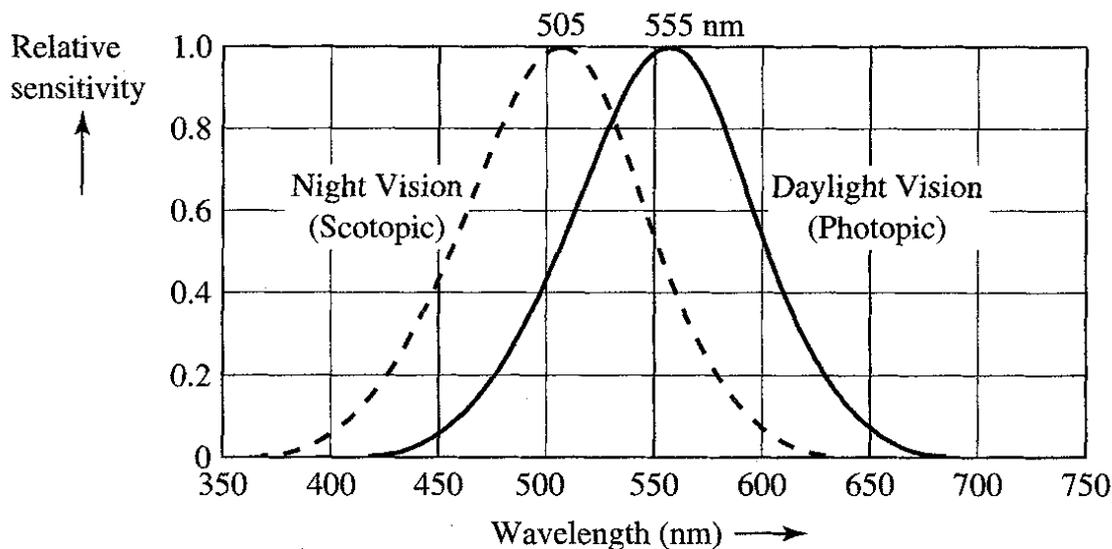


## B.0.6.2. Características de la visión humana.

### B.0.6.2.1. Respuesta en amplitud.

- Rango de amplitud de 1 a 50.000.000 (desde la luz de las estrellas con 0,002lx hasta la luz brillante del sol de 100.000lx).
- Respuesta logarítmica.

### B.0.6.2.2. Respuesta en frecuencia.

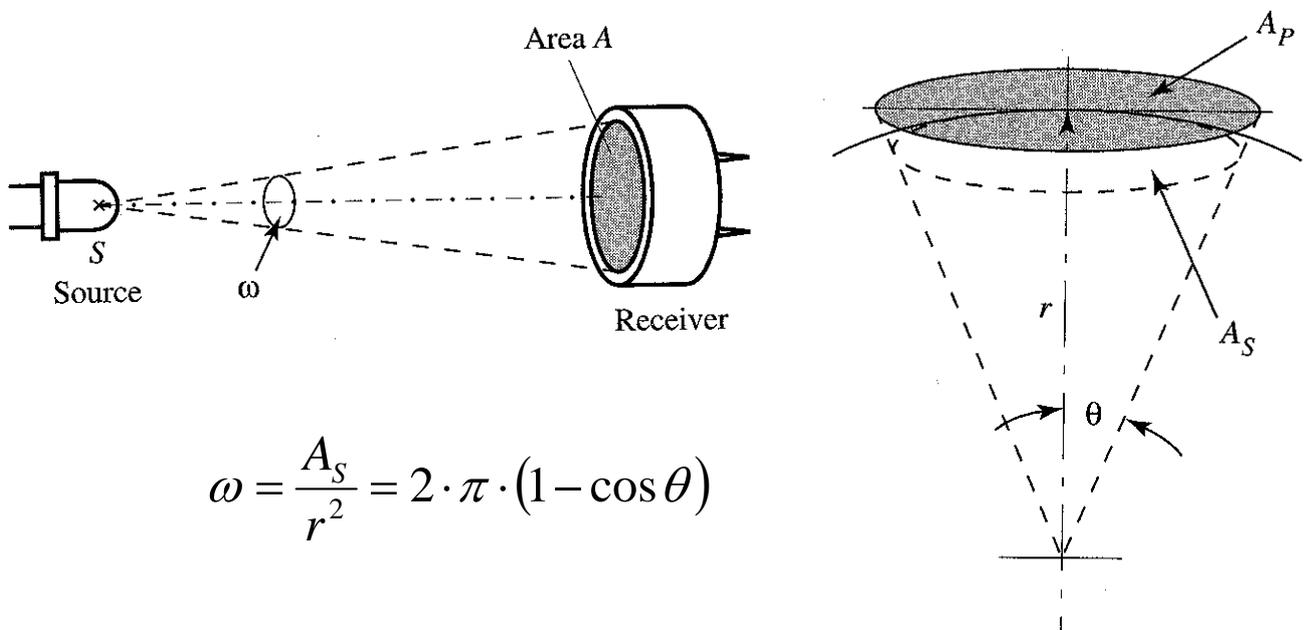
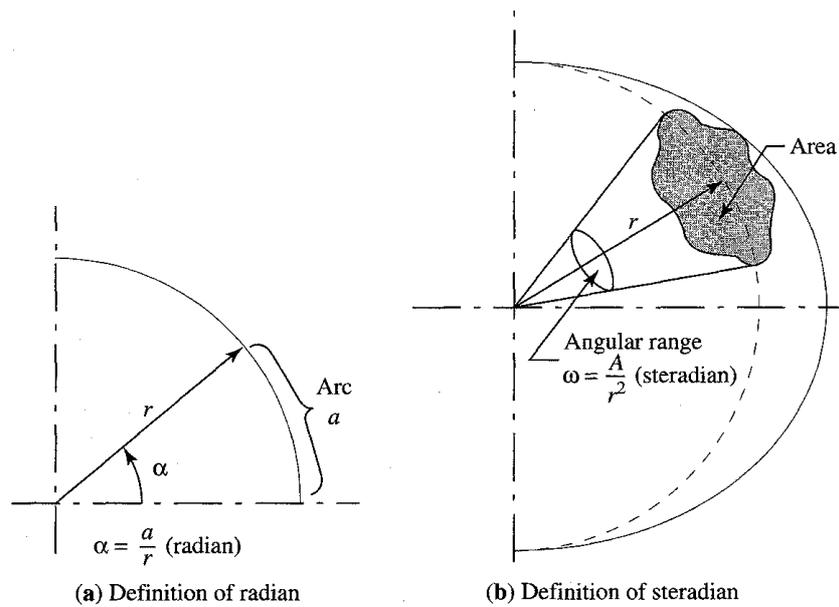


### B.0.6.2.2. Respuesta temporal.

- Proceso exponencial lento de adaptación a cambios de iluminación.
- Parpadeo: medida de la inercia del ojo.

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

## B.0.7.1. El ángulo sólido.



### B.0.7.2. Flujo radiométrico y fotométrico.

$\phi_R$  = nº de fotones emitido por la fuente por segundo (potencia emitida por la fuente, en W).

$\phi_P$  = Flujo fotométrico o luminoso. Depende de la respuesta del ojo (lm).

$$1 \text{ lumen} = 1/683 \text{ W a } 555\text{nm}$$

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

**Eficiencia:** Relación entre el flujo fotométrico o luminosidad y el flujo total radiométrico emitido por la fuente.

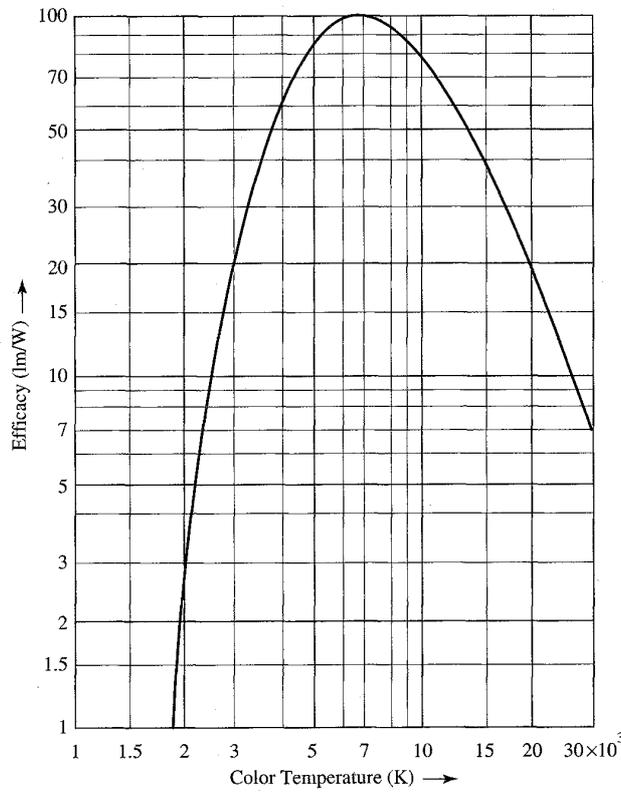
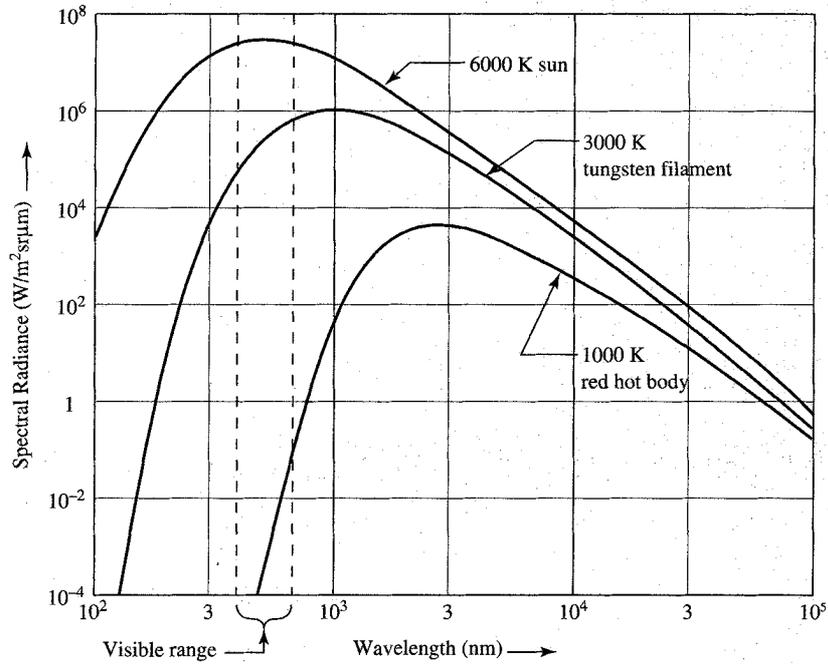
$$K = \frac{\phi_P}{\phi_R} \quad [\text{lm/W}]$$

Conversión de radiación monocromática en flujo fotométrico:

$$K_\lambda = V_\lambda \cdot 683$$

Depende de la sensibilidad relativa del ojo a la longitud de onda  $\lambda$ ,  $V_\lambda$ .

# B.0.7.3.1. Eficiencia de los radiadores térmicos.



### B.0.7.3.2. Eficiencia de los radiadores con espectros no continuos (de líneas)

$$\phi_P = \phi_R K_\lambda$$

Conversión de flujo radiométrico a flujo fotométrico en una lámpara de vapor de mercurio de 1kW

$\lambda$ [nm]	Flujo radiométrico $\phi_R$ [W]	Sensibilidad del ojo $V_\lambda$	Eficiencia espectral $K_\lambda = V_\lambda 683$ [lm/W]	Flujo fotométrico $\phi_P = \phi_R K_\lambda$ [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
374 W				115.807 lm
- 78 W				
296 W en el espectro visible				

$$K = \frac{\phi_P}{\phi_R} = \frac{115.807}{900} = 128,7 \frac{lm}{W}$$

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

Producto de la potencia por el tiempo:

$$N_R = \phi_R t \text{ [W}\cdot\text{h]}$$

$$N_P = \phi_P t \text{ [lm}\cdot\text{h]}$$

## B.0.7.5. Intensidad radiométrica y fotométrica.

### B.0.7.5.1. Definición de términos.

**Intensidad radiométrica:** Flujo radiométrico por estereorradián.

$$I_R = \frac{\phi_R}{\omega} \quad [\text{W/sr}]$$

En el rango visual, describe la luminosidad (el brillo) de la fuente.

**Intensidad luminosa o fotométrica:** Flujo fotométrico por estereorradián.

$$I_P = \frac{\phi_P}{\omega} \quad [\text{cd}]$$

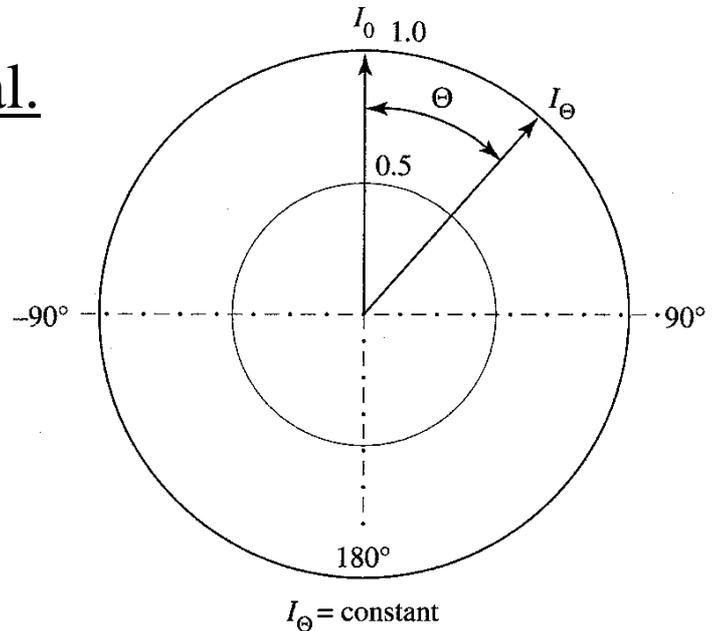
Una fuente con el doble de intensidad luminosa que otra, no se ve el doble de brillante debido a la respuesta logarítmica de nuestros ojos.

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

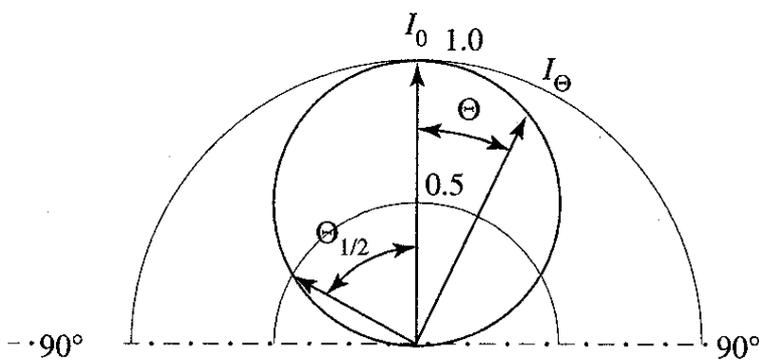
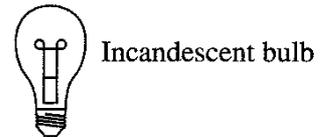
## B.0.7.6. Perfiles habituales de radiación en optoelectrónica.

### B.0.7.6.1. Fuente puntual.

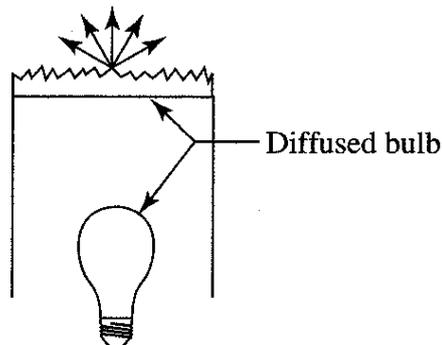
$$I_{\theta} = I_0 = \text{constante}$$



### B.0.7.6.2. Fuente lambertiana.

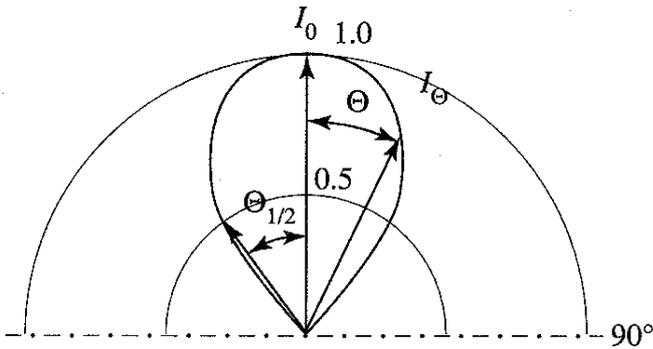


$$I_{\theta} = I_0 \times \cos \theta$$



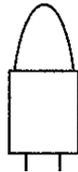
$$\theta_{1/2} = \arccos 0,5 = 60^{\circ}$$

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



$$\theta_{1/2} = \arccos 0,5^{1/n}$$

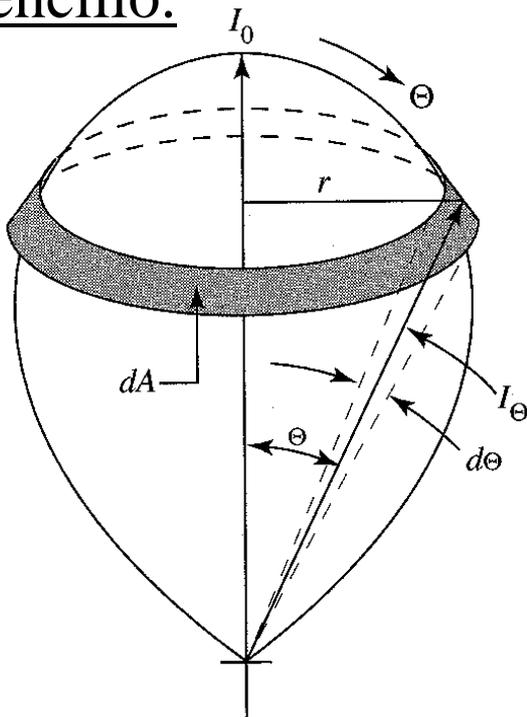
$$I_{\theta} = I_0 \times \cos^n \theta$$



LED with lens

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

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



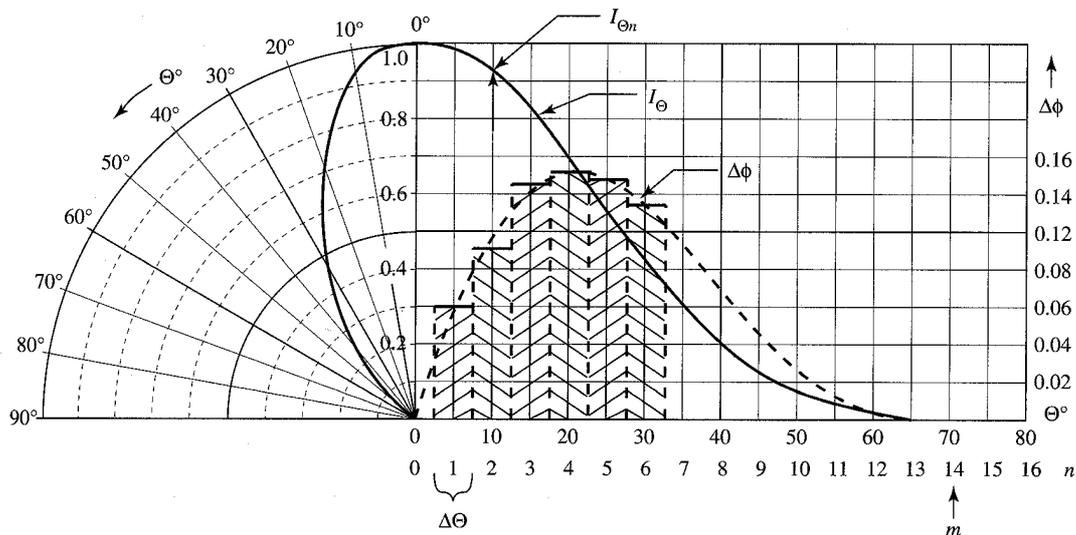
$$\phi_{\theta} = \int_0^{\theta} I_{\theta} 2\pi \sin \theta d\theta = 2\pi \int_0^{\theta} I_{\theta} \sin \theta d\theta$$

Resolveremos la integral si conocemos la expresión matemática de  $I_{\theta}$ .

Fuente	Perfil de intensidad	Ángulo mitad	Flujo dependiendo del ángulo $\theta$	Flujo total
Puntual	$I_\theta = I_0$	-	$2\pi I_0(1 - \cos\theta)$	$4\pi I_0$
Lambertiana	$I_\theta = I_0 \cos\theta$	$60^\circ$	$\pi I_0 \sin^2\theta$	$\pi I_0$
Exponente n	$I_\theta = I_0 \cos^n\theta$	$\arccos 0,5^{1/n}$	$\frac{2\pi I_0(1 - \cos^{n+1}\theta)}{n+1}$	$\frac{2\pi I_0}{n+1}$

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

Es necesario utilizar un método numérico para realizar la integración y encontrar el flujo total.



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

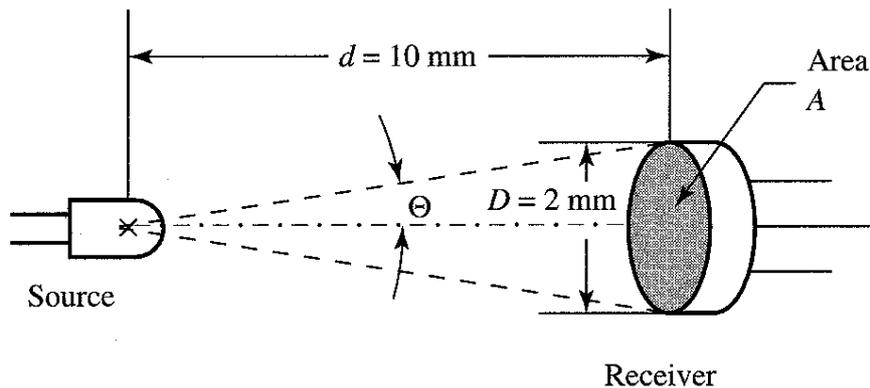
Expresan la eficiencia del acoplamiento fuente- receptor.

$$OTF = \frac{\phi_r}{\phi_s}$$

$\phi_s$ : flujo total de la fuente  
 $\phi_r$ : flujo asociado al receptor.

$NA = \sin\theta$ ,  $\theta \equiv$  Mitad del ángulo del cono del receptor  
(ángulo de acoplo)

$$\theta \text{ pequeño} \implies NA \approx \frac{D}{2 \cdot d} = \frac{\sqrt{\frac{A}{\pi}}}{d}$$



### B.0.7.8.1. Cálculo del OTF.

- Fuente puntual:  $OTF = \sin^2\left(\frac{\theta}{2}\right)$

$$\theta \text{ pequeño} \implies OTF \approx \frac{\sin^2(\theta)}{4} = \frac{(NA)^2}{4}$$

- Fuente Lambertiana:  $OTF = \sin^2\theta = (NA)^2$

- Fuente con perfil  $I_\theta = I_0 \cos^n\theta$ :

$$OTF = 1 - \cos^{n+1}\theta$$

Se calcula fácilmente a partir del ángulo de acoplo  $\theta$ .

## B.0.7.9. Incidencia radiante e iluminación.

### B.0.7.9.1. Definición de términos.

Corresponden a la distribución de flujo en una superficie:

Incidencia radiante: 
$$E_R = \frac{\phi_R}{A} \quad [\text{W/m}^2]$$

Iluminación: 
$$E_P = \frac{\phi_P}{A} \quad [\text{lm/m}^2 \text{ ó lux}]$$

$$1 \text{ lux} = 0,0929 \text{ pie-candelas}$$

$$1 \text{ pie-candela} = 10,764 \text{ lux.}$$

### B.0.7.9.2. Medida de la iluminación.

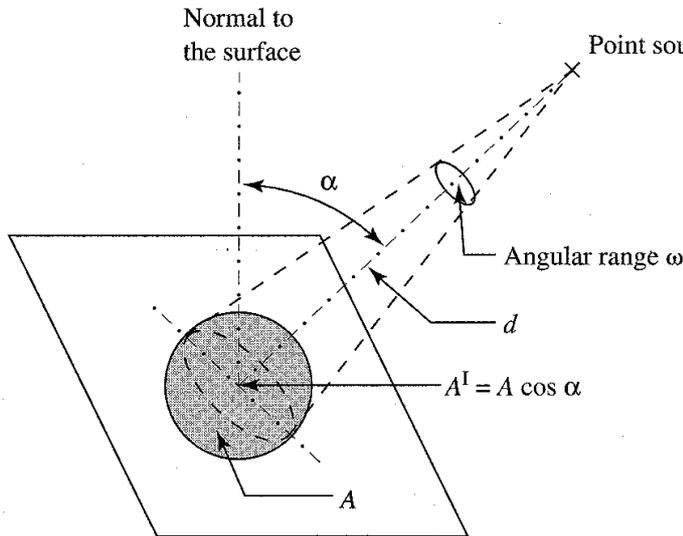
Para medirla se necesita un luxómetro.

Niveles de iluminación típicos

<b>Condición</b>	<b>Iluminación [lx]</b>
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

### B.0.7.9.3. Relaciones entre medidas.

Para una fuente puntual:



$$E = \frac{\phi_s}{A} = \frac{I_0 \cdot \cos \alpha}{d^2}$$

Si la fuente es perpendicular a la superficie:  $E = \frac{I_0}{d^2}$

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

Hacen referencia al flujo que se refleja o radia desde la fuente y es captado por nuestro ojo, “brillo por área”.

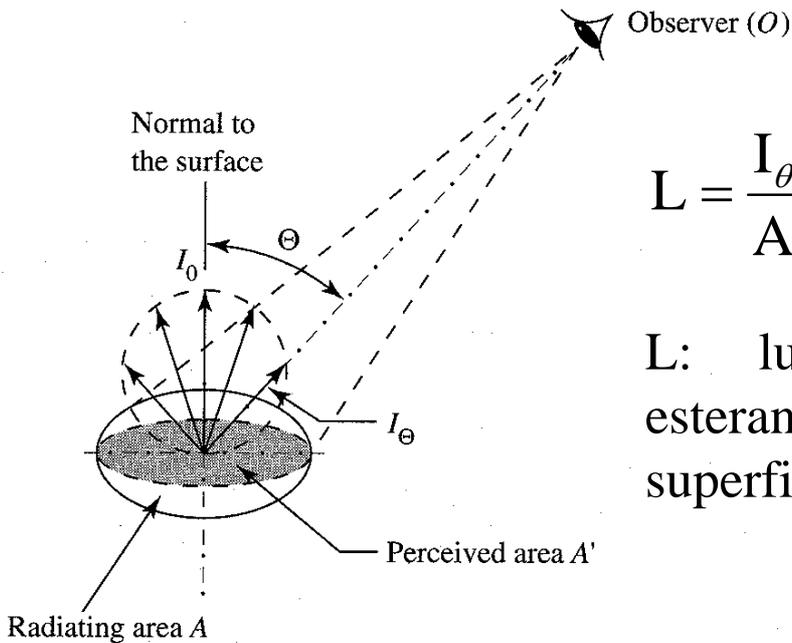
#### B.0.7.10.1. Medidas de esterancia radiante y luminancia.

Esterancia radiante, ( $L_R$ ):  $W/sr/m^2$

Luminancia, ( $L_P$ ):  $cd/m^2$  o  $lm/sr/m^2$

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

Responde a la pregunta de cuánto “brilla” o cuánta luminancia tiene una superficie iluminada  $A$  para un observador situado en  $O$ :



$$L = \frac{I_{\theta}}{A'} = \frac{I_{\theta}}{A \cdot \cos \theta}$$

$L$ : luminancia ( $\text{cd}/\text{m}^2$ ) ó esterancia ( $\text{W}/\text{sr}/\text{m}^2$ ) de la superficie  $A$ .

### B.0.7.10.3. Fuente lambertiana.

$$L = \frac{I_0 \cdot \cos \theta}{A \cdot \cos \theta} = \frac{I_0}{A}$$

La esterancia o luminancia es la misma en todas direcciones (mismo brillo en toda su superficie).

Valores de luminancia de objetos comunes

Fuente	Luminancia [cd/m <sup>2</sup> ]
Sol	1,6 10 <sup>9</sup>
Bombilla incandescente transparente (500W)	11 10 <sup>6</sup>
Bombilla incandescente mate (500W)	300 10 <sup>3</sup>
Tubo fluorescente	10 10 <sup>3</sup>
Llama de una vela	5 10 <sup>3</sup>

Fuente extendida: fuente pasiva que es iluminada. La luminancia de esta fuente se debe a la reflexión del flujo incidente.

$$L = \frac{I_{REF}}{A}$$

La luminancia depende de dos factores: la iluminación y el coeficiente de reflexión de la superficie.

Patrón de reflexión lambertiano:

$$L = \frac{I_{REF}}{A} = \frac{\phi_{REF}}{\pi} = \frac{R \cdot \phi_{INC}}{\pi} = \frac{R \cdot A \cdot E}{\pi} = \frac{R \cdot E}{\pi}$$

donde R es el coeficiente de reflexión de la superficie:

$$R = \frac{\phi_{REF}}{\phi_{INC}}$$

## B.0.7.11. Excitancia Radiante y Luminosa

### B.0.7.11.1. Excitancia (M).

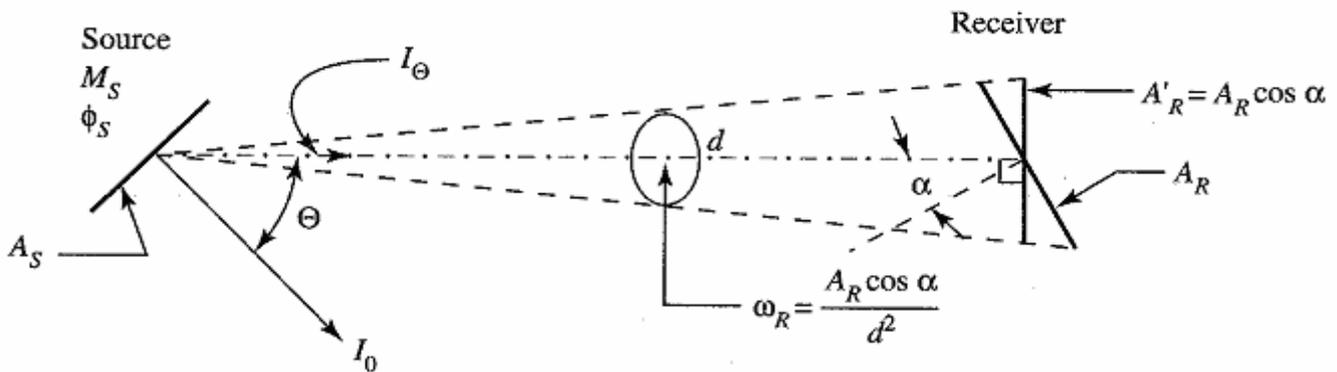
Describe la densidad de flujo desde un área radiante activa.

$$M_R = \frac{\phi_R}{A} \quad \text{y} \quad M_P = \frac{\phi_P}{A}$$

$M_R$ : excitancia radiante ( $\text{W}/\text{m}^2$ )  
 $M_P$ : excitancia fotométrica ( $\text{lm}/\text{m}^2$ )

### B.0.7.11.2. Relaciones derivadas de la Excitancia.

Para una fuente Lambertiana: 
$$I_0 = \frac{\phi_S}{\pi} = \frac{M \cdot A_S}{\pi}$$



Si la distancia entre fuente y receptor es mucho mayor que las dimensiones de la fuente o el receptor, el flujo en el receptor es:

$$\phi_r = I_\theta \cdot \omega_R = I_0 \cdot \cos \theta \cdot \frac{A_R}{d^2} = \frac{I_0 \cdot \cos \theta \cdot A_R \cdot \cos \alpha}{d^2} = \frac{\phi_S \cdot \cos \theta \cdot A_R \cdot \cos \alpha}{\pi \cdot d^2}$$

La iluminación sobre la superficie del receptor:

$$E_r = \frac{\phi_r}{A_R} = \frac{I_0 \cdot \cos \theta \cdot \cos \alpha}{d^2} = \frac{\phi_S \cdot \cos \theta \cdot \cos \alpha}{\pi \cdot d^2}$$

Si el área del receptor y de la fuente son perpendiculares a la línea que los conecta:

$$E_r = \frac{I_0}{d^2} = \frac{\phi_S}{\pi \cdot d^2} \quad \text{y} \quad \phi_r = \frac{I_0 \cdot A_R}{d^2}$$

A partir de la luminancia o esterancia de la fuente,  $L=I_0/A_S$ :

$$E_r = \frac{L \cdot A_S \cdot \cos \theta \cdot \cos \alpha}{d^2} \quad \text{y} \quad \phi_r = \frac{L \cdot A_S \cdot A_R \cdot \cos \theta \cdot \cos \alpha}{d^2}$$

Si el área del receptor y de la fuente son perpendiculares a la línea que los conecta:

$$E_r = \frac{L \cdot A_S}{d^2} = L \cdot \omega_S$$

$\omega_S$ : ángulo sólido de la fuente subtendido por el receptor.