

Capítulo 2

Unidades y conceptos de iluminación

Sin tratar de profundizar en los conceptos y ecuaciones físicas, analizaremos aquellos que son fundamentales para el estudio y análisis de los sistemas de iluminación.

1 FLUJO LUMINOSO

Es la cantidad de energía radiante emitida en el espacio por una fuente luminosa en la unidad de tiempo, percibida y evaluada en términos de respuesta visual según el valor fijado internacionalmente para la sensibilidad del ojo humano $V(\lambda)$:

$$\phi = \frac{Q}{t}$$

donde N: flujo luminoso (cantidad de luz emitida por unidad de tiempo) en lúmenes (lm)
Q: cantidad de luz emitida en lúmenes por segundo (lm @s)
t: tiempo de duración de la emisión en segundos (s).

También se define como el flujo luminoso emitido en el un ángulo sólido de un estereorradián por una fuente puntiforme de una candela, colocada en el centro de una esfera que emite una intensidad luminosa uniforme en todas direcciones. Así:

$$\phi = I \times \omega$$

donde I: intensidad luminosa en candelas (cd)
T: ángulo sólido en estereorradianes (sr).

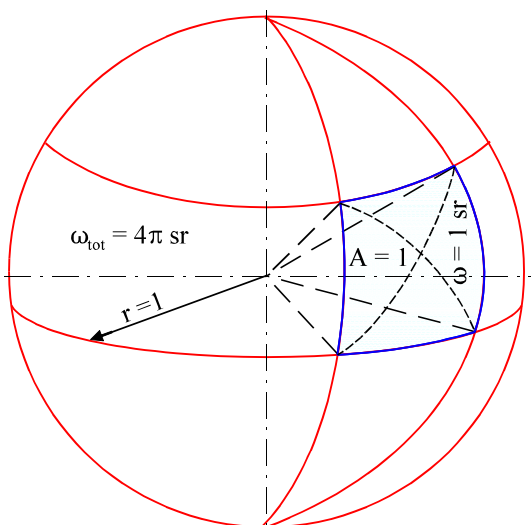


Figura 1. Ángulo sólido.

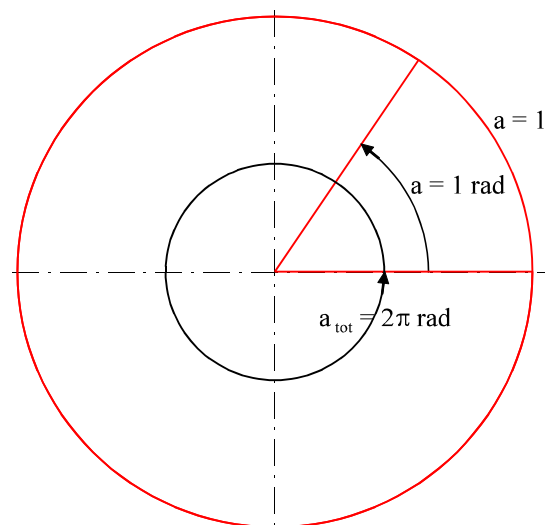


Figura 2. Ángulo plano.

Los flujos luminosos de las lámparas son los indicados en la documentación técnica de los fabricantes de las mismas. Una interesante extensión del concepto de flujo luminoso como potencia es el de *eficacia luminosa*, relación entre el flujo luminoso emitido por una fuente y la potencia empleada para obtener tal flujo. A través de esta cifra es posible evaluar el ahorro que puede dar una lámpara con respecto a otra. Se obtiene mediante la expresión:

$$\eta = \frac{\Phi}{P}$$

donde η : eficacia luminosa en lúmenes por vatio (lm/W)
 Φ : flujo luminoso emitido por fuente de luz en lúmenes (lm)
 P : potencia eléctrica consumida por la lámpara en vatios (W).

Otras relaciones empleada en relación al flujo son la *utilancia*, que, en las instalaciones de iluminación, se define como la porción del flujo luminoso recibido en el área deseada en relación al flujo total emitido en la sala por las luminarias:

$$\eta_R = \frac{\Phi_A}{\Sigma \Phi_L}$$

donde η_R : utilancia, adimensional
 Φ_A : flujo total recibido en el área deseada en lúmenes (lm)
 Φ_L : flujo emitido por cada lámpara de la sala en lúmenes (lm).

Y el *factor de utilización*, que, en las instalaciones de iluminación, se precisa como la porción del flujo luminoso emitido en el área deseada en relación al flujo total emitido en la sala por las luminarias:

$$\eta_B = \frac{\Phi_N}{\Sigma \Phi_L}$$

donde η_B : factor de utilización, adimensional
 Φ_N : flujo total emitido en el área deseada en lúmenes (lm)
 Φ_L : flujo emitido por cada lámpara de la sala en lúmenes (lm).

2 INTENSIDAD LUMINOSA

La intensidad luminosa es la cantidad de luz emitida por una fuente puntiforme que se propaga en una determinada dirección. Tal intensidad se define como el cociente del flujo emitido en una cierta dirección en un cono de ángulo sólido, por lo tanto:

$$I = \frac{\Phi}{\omega}$$

donde I : intensidad luminosa en candelas (cd)
 Φ : flujo que incide sobre la superficie en lúmenes (lm)
 ω : ángulo sólido en estereorradianes (sr)

En la XVI Conferencia General de los Pesos y de las Medidas de 1979 se ha establecido que la intensidad de 1 cd equivale a la intensidad de una fuente que emita en un ángulo sólido de 1 sr la radiación monocromática de frecuencia $540 \cdot 10^{12}$ hertz y de potencia $N=1/683$ W. Un ojo medio internacional, establecido en la sede CIE, nos permite definir el máximo valor de visibilidad relativa para radiaciones de longitud de onda de 555 nm, valor que corresponde aproximadamente al de la fuente bajo examen, que por este motivo tiene 1 lumen.

Conviene hacer notar que la intensidad luminosa carece de significado a menos que se especifique la dirección de la radiación incidente o emitida. La intensidad luminosa según diferentes ángulos es un concepto más útil en la especificación de las características de lámparas y luminarias, y se representa gráficamente en forma de curvas de distribución de intensidades.

3 LUMINANCIA (ILUMINACIÓN)

El concepto de iluminación está orientado al proyecto luminotécnico. En efecto, se puede evaluar la cantidad de luz que emitida desde una fuente de luz, está presente sobre una superficie. Por tanto, la *iluminancia* o *iluminación* es la cantidad de flujo que incide sobre una superficie dividido por el tamaño de la misma. Así:

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

donde E: iluminancia en lux (lx)
 N: flujo que incide sobre la superficie (lm)
 A: área de la superficie afectada por el flujo (m²).

4 ILUMINANCIA

Si la fuente luminosa no es puntiforme debemos considerarla en el ámbito de una determinada dimensión, por consiguiente la definición que había sido dada de intensidad luminosa no se puede seguir aplicando. De esta forma, será necesario introducir un nuevo concepto que evalúe la cantidad de energía luminosa emitida por estas superficies, ya sea una fuente de luz propia o una luz reflejada.

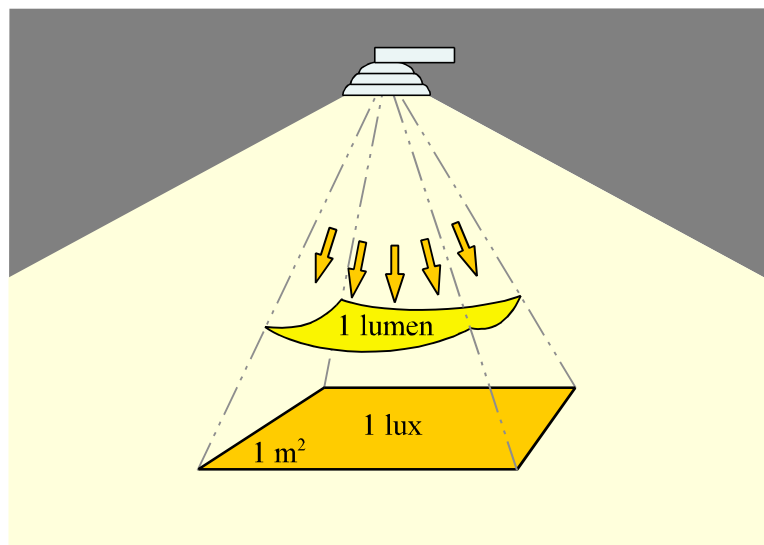


Figura 3. Iluminancia.

El valor fotométrico introducido de esta manera es la luminancia que se define como la relación entre la intensidad luminosa de la fuente en la dirección de un observador y la superficie emisora así como la ve el mismo observador (o superficie aparente). Las unidades de medida utilizadas son la cd/m² y el lm/sr×m² (nit), siendo la relación fundamental dada por:

$$L = \frac{I_{\alpha}}{A \cdot \cos\alpha}$$

donde L: luminancia en candelas por metro cuadrado (cd/m²)
 I: intensidad luminosa en candelas en la dirección "
 A: área de la fuente en metros cuadrados (m²)
 "': ángulo comprendido entre el ojo del observador y la recta normal a la fuente.

También se define, en un punto de una superficie según una dirección determinada, como el cociente entre la intensidad luminosa según dicha dirección producida por un elemento de superficie alrededor del punto, y el área de la proyección ortogonal del elemento de superficie en un plano perpendicular a la dirección. Y como la intensidad luminosa producida o reflejada por una superficie dada.

Fuentes de luz y su luminancia

fuelle	luminancia cd/m ²
sol al mediodía	16×10 ⁹
sol al amanecer o atardecer	
Cielo raso	8×10 ³
cielo nublado	2×10 ³
Terreno con césped	8×10 ²
terreno cubierto de nieve	3.2×10 ⁴

fuelle	luminancia cd/m ²
vela esteárica	5×10 ³
lámpara incandescente clara 60W	
lámpara incandescente opal 60W	
Fluorescente 18W	4×10 ³
Sodio de alta presión 70W	1.5×10 ⁷

De manera independiente a la definición tomada, su valor resulta fundamental en la evaluación del deslumbramiento ya que determina la impresión de mayor o menor claridad producida por una superficie. De manera práctica se determina a partir de la iluminancia sobre una superficie y el grado de reflexión de la misma a través de la ecuación:

$$L = \frac{\rho \cdot E}{\pi}$$

- donde L: luminancia en candelas por metro cuadrado (cd/m²)
D: grado de reflexión de una superficie, según los valores de la tabla siguiente
E: iluminancia en lux (lx)
B: 3.14159

Grado de reflexión de una superficie en función del color o material

colores	factor	colores	factor	materiales	factor
blanco	0.70÷0.80	verde oliva	0.25÷0.35	arce	0.60÷0.65
crema	0.70÷0.80	naranja	0.20÷0.25	abedul	0.60÷0.65
amarillo	0.55÷0.65	rojo	0.20÷0.25	ladrillo rojo	0.20÷0.25
verde claro	0.45÷0.50	azul medio	0.20÷0.25	bloque de cemento vibrado	0.15÷0.25
rosa	0.45÷0.50	gris medio	0.20÷0.25	hormigón	0.15÷0.40
azul claro	0.40÷0.45	verde oscuro	0.10÷0.15	roble claro	0.35÷0.45
gris claro	0.40÷0.45	azul oscuro	0.10÷0.15	roble rojo	0.20÷0.35
beig	0.25÷0.35	rojo oscuro	0.10÷0.15	roble oscuro	0.15÷0.20
amarillo ocre	0.25÷0.35	gris oscuro	0.10÷0.15	esmalte blanco	0.65÷0.75
castaño claro	0.25÷0.35	azul marino	0.05÷0.10	crystal claro	0.06÷0.08
negro	0.04÷0.05	negro	0.04÷0.05	placas de fibra de madera crema	0.50÷0.06
				azulejo blanco	0.60÷0.75
				nogal oscuro	0.15÷0.20
				revoque (yeso)	0.75÷0.80
				hollín	0.02÷0.10
				terciopelo negro	0.05÷0.10
				suelos de goma	0.04÷0.10



Figura 4. Grado de reflexión de algunos colores.

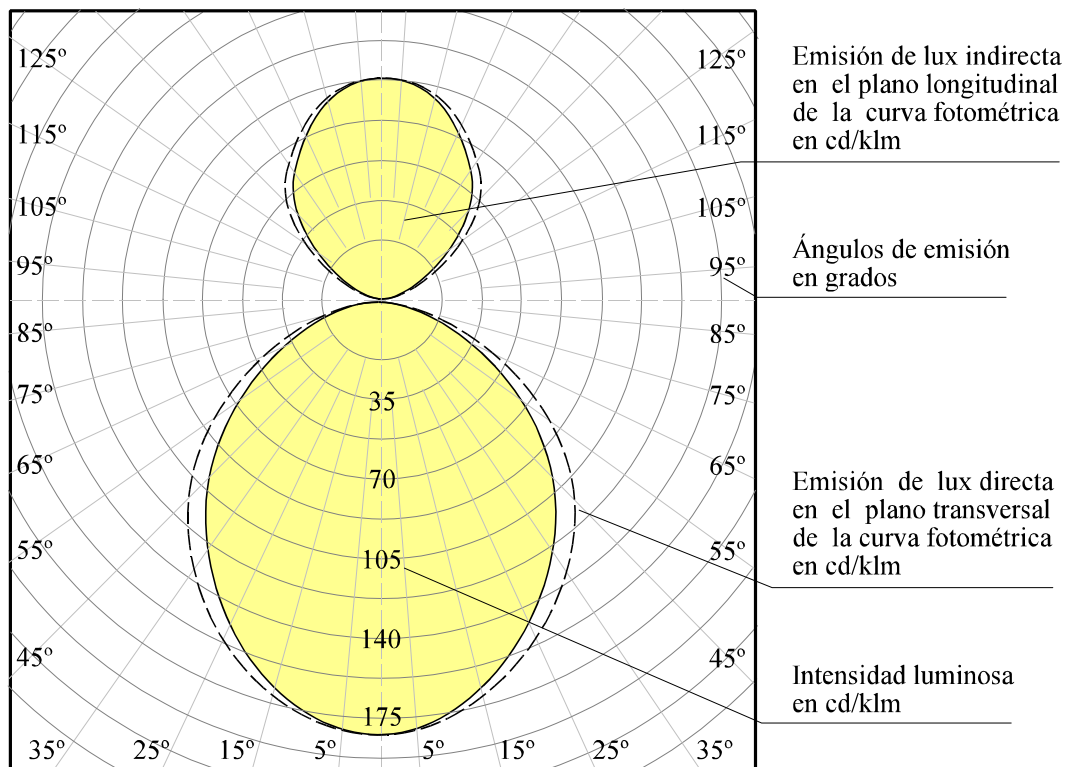


Figura 5. Curvas fotométricas de una luminaria con iluminación directa-indirecta.

5 CURVAS FOTOMÉTRICAS

La luz emitida por un aparato de iluminación se puede representar a través de un sistema gráfico llamado *curvas fotométricas*. Las mismas son la unión de los puntos de coincidencia entre las varias intensidades luminosas, que se emiten en todas las direcciones en el espacio desde la fuente luminosa, y que forman el *sólido fotométrico*. Por

intersección del sólido con planos se obtienen las curvas fotométricas. Cuando estos planos se describen a través de coordenadas polares en las cuales el centro corresponde al centro del aparato, se tienen *curvas fotométricas polares*. Estos planos se pueden hacer girar alrededor de un eje para explorar en cada punto del sólido fotométrico.

Dependiendo del eje fijado para la rotación se tienen distintos sistemas de planos fijados por las normas CIE. Una modalidad alternativa de representación de las curvas fotométricas se realiza substituyendo la descripción polar con una descripción según coordenadas cartesianas. Este sistema permite una mayor facilidad de lectura de las fotometrías con el haz angosto y generalmente se utiliza en la representación de las intensidades luminosas de los proyectores.

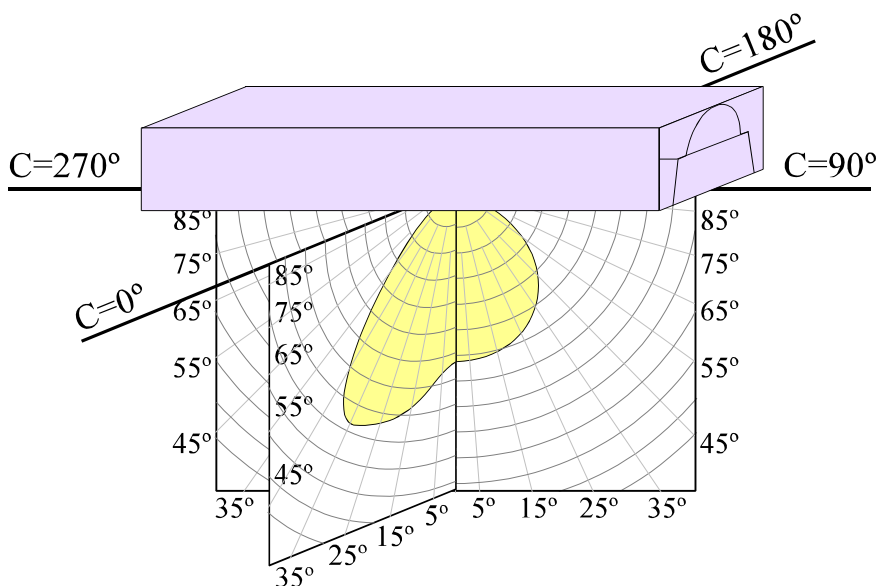


Figura 6. Curva fotométrica de un plafón.

En este diagrama los valores de los ángulos están ubicados en la abscisa con el cero en el centro del gráfico mientras que los valores de la intensidad están en la ordenada. Los dos planos que normalmente se representan son el transversal y el longitudinal que en el sistema CIE corresponden a los planos C0-C180 (línea continua) y C90-C270 (línea de trazos) respectivamente (figura 6).

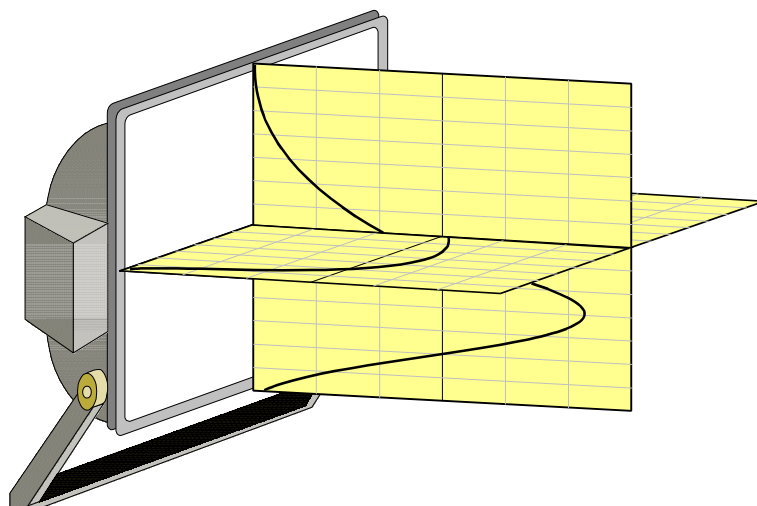


Figura 7. Planos polares de las curvas fotométricas de un proyector.

En los aparatos de interior y las luminarias viales, las curvas fotométricas están representadas en coordenadas polares, aunque, a veces, están disponibles los datos fotométricos según la clasificación de las normativas DIN 5040.

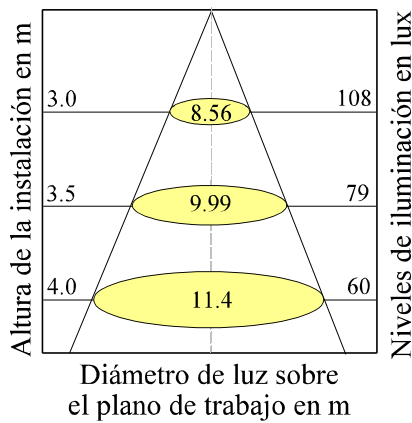


Figura 8. Datos fotométricos de un proyector circular.

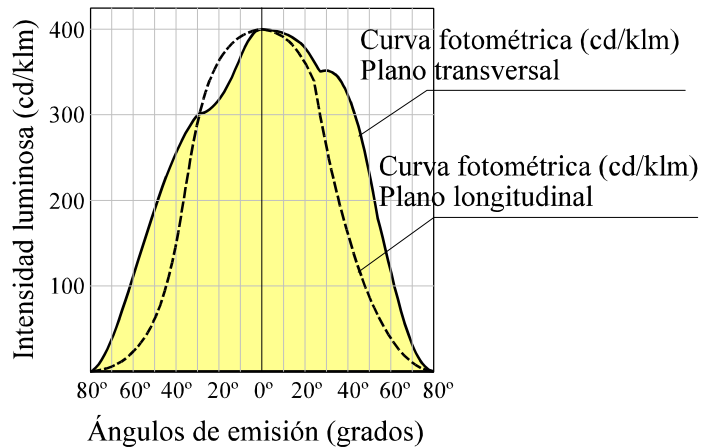


Figura 9. Curvas fotométricas de un proyector.

Visto que los proyectores tienen haces de luz más angostos, la utilización de las coordenadas polares no permite una visualización suficientemente detallada, por consiguiente se prefiere representar la curva fotométrica de los mismos mediante un diagrama cartesiano.

La *curva isolux* representa la unión de los puntos del plano que tienen el mismo valor de iluminación. Los dos ejes d/h y l/h de la figura 10 relacionan el ancho de la calle (l) con la distancia entre las columnas (d) y la altura de los mismos (h).

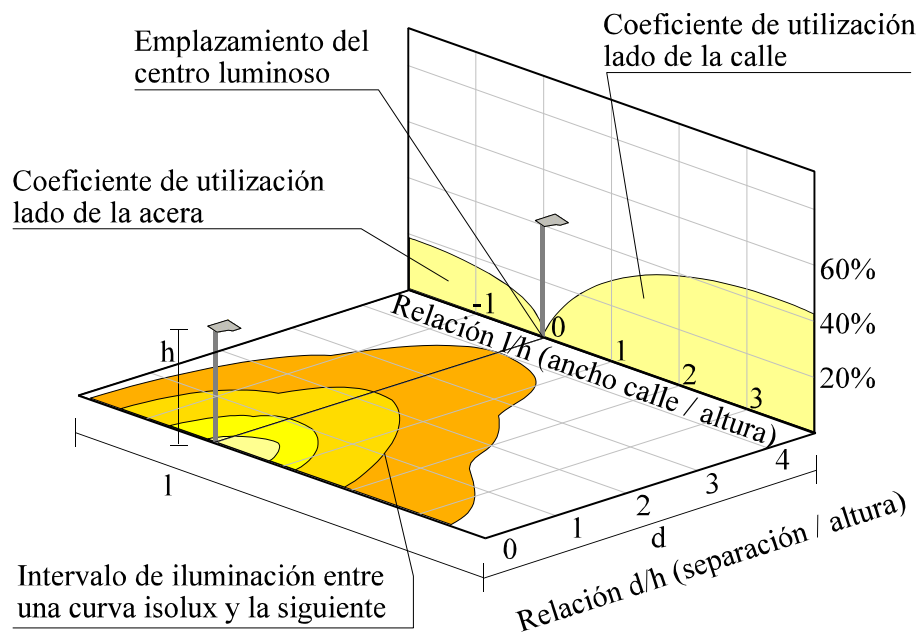


Figura 10. Curvas isolux.

La *curva isocandela* es la proyección sobre un plano de las intensidades en candelas, de un cierto sólido fotométrico, que poseen el mismo valor crea las curvas isocandela (figura 11). Por consiguiente, representan la unión de los puntos del plano que poseen la misma intensidad en candelas.

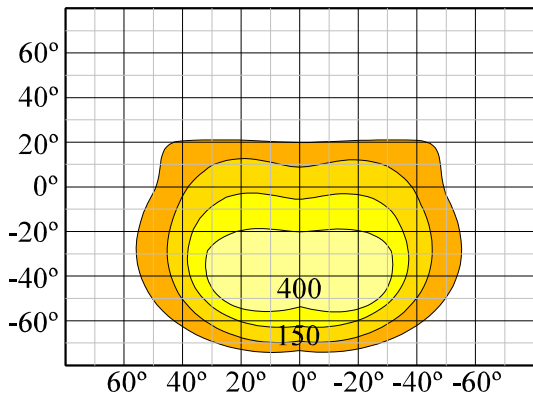


Figura 11. Curvas isocandela.

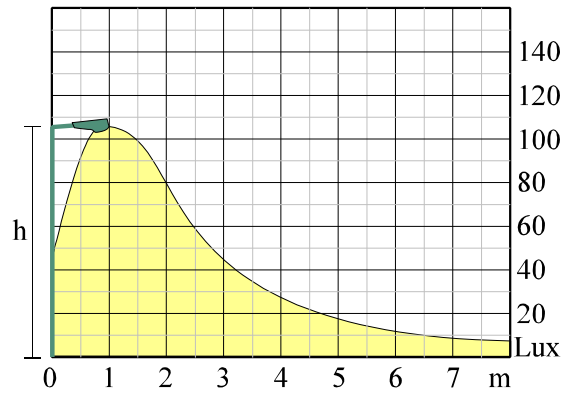


Figura 12. Curva de la iluminación.

La *cueva de la iluminación* de la figura 12 ha sido estudiada para facilitar la selección del aparato para el alumbrado público. El eje Y viene dado de la iluminación en lux, mientras que el eje X, viene dado por la distancia del cuerpo iluminador. A diferencia de los otros gráficos que se representan con una referencia relativa (con la altura de la instalación y del flujo de iluminación normalizado), este se representa con valores absolutos, es decir, la altura del aparato y la real de la instalación; el flujo de la lámpara y la efectivamente emitida. De esta forma hemos resuelto inmediatamente su disponibilidad.

El *ábaco de luminancias* se emplea para evaluar el deslumbramiento directo de cada aparato. Los valores de luminancia de las dos curvas, transversal (línea continua) y longitudinal (línea de trazos), están trazados considerando un observador dirigido hacia el aparato en un ángulo comprendido entre 45° y 85°. Los valores se trazan en una escala logarítmica. Las curvas límites delimitan el área dentro de la cual la luminancia del aparato no constituye un deslumbramiento. Cada una de estas curvas se refiere a un nivel de iluminación promedio sobre el plano útil que varía en función de cinco clases de calidad de la instalación establecidas por la CIE: si la curva de las luminancias se halla a la izquierda de las curvas límite, entonces el grado de deslumbramiento se debe considerar aceptable. En la tabla siguiente está indicada la limitación del deslumbramiento y cuándo y dónde usar un aparato con una clase de calidad en lugar de otra.

Clase	Nivel de iluminación								
A(1.15)	2000	1000	500	<300					
B(1.5)		2000	1000	500	<300				
C(1.85)			2000	1000	500	<300			
D(2.2)				2000	1000	500	<300		
E(2.55)					2000	1000	500	<300	

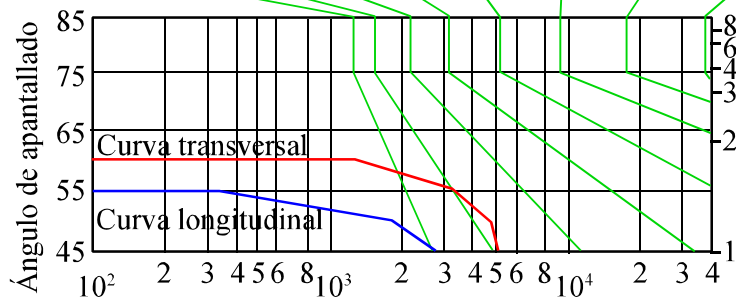


Figura 13. Ábaco de luminancias.

Clases de calidad de la instalación según CIE, basadas en la limitación al deslumbramiento.

Clase de calidad	Tipo de tarea visual o actividad
A	tarea visual muy complicada
B	tarea visual que requiere prestaciones visuales elevadas
C	tarea visual que requiere prestaciones visuales normales
D	tarea visual que requiere prestaciones visuales de baja intensidad
E	para interiores donde las personas no están ubicadas en una posición de trabajo determinada sino que se pueden desplazar de una posición a otra desarrollando tareas visuales que requieren prestaciones visuales de baja intensidad

6 LEYES FUNDAMENTALES DE LA LUMINOTECNIA

6.1 Ley inversa de los cuadrados

Expresa matemáticamente la relación entre la intensidad luminosa y la iluminancia. Establece que la iluminancia en un punto de una superficie es directamente proporcional a la intensidad luminosa de la luz incidente sobre el punto, e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia desde la fuente. Cuando el punto se encuentra sobre una superficie normal a la luz incidente, la fórmula a aplicar es:

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

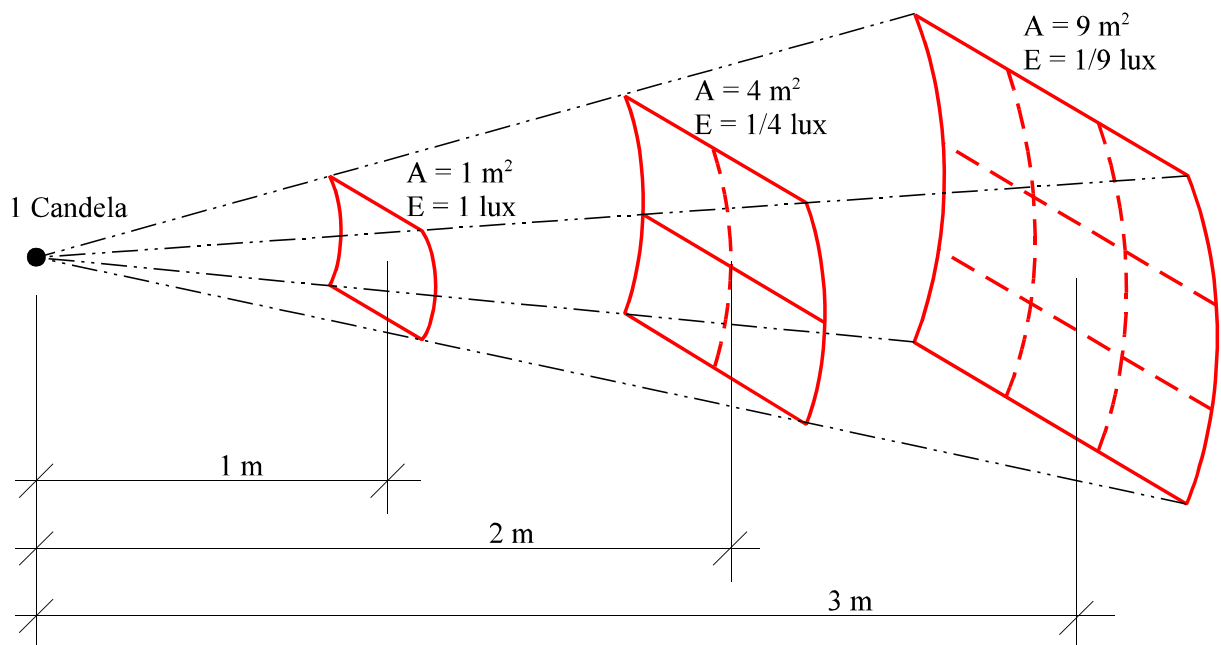


Figura 14. Ley inversa de los cuadrados.

Esta Ley se basa en el concepto de fuente puntual, que produce radiación constante en todas direcciones. Bajo tales condiciones, el flujo contenido en un ángulo sólido unitario se distribuye sobre una superficie cada vez mayor a medida que aumenta la distancia a la fuente (figura 16). Por tanto, la iluminancia decrece inversamente con el cuadrado de la distancia.

6.2 Ley del coseno

Cuando un haz luminoso incide sobre una superficie con un determinado ángulo, cubre un área mayor que cuando lo hace perpendicularmente. Como consecuencia, la densidad del flujo (lúmenes por metro cuadrado) disminuye. El área interceptada por el haz luminoso resulta ser proporcional al coseno del ángulo entre el plano inclinado y el normal a la radiación (figura 17).

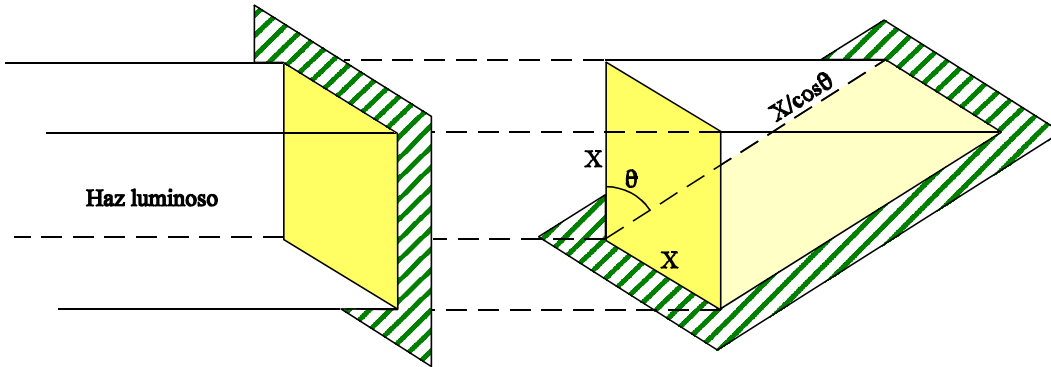


Figura 15. Ley del coseno.

La Ley del Coseno establece que la iluminancia en una superficie es proporcional al coseno del ángulo del haz incidente. Combinando ambas leyes, la fórmula anterior se convierte en:

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

6.3 Ley del coseno-cubo

Se trata de una extensión de la Ley del Coseno, muy utilizada en cálculos. Se deriva de la ecuación anterior, sustituyendo D por h/cos2 a la vista de la figura 16:

$$E = \frac{I}{h^2} \cos^3 \theta$$

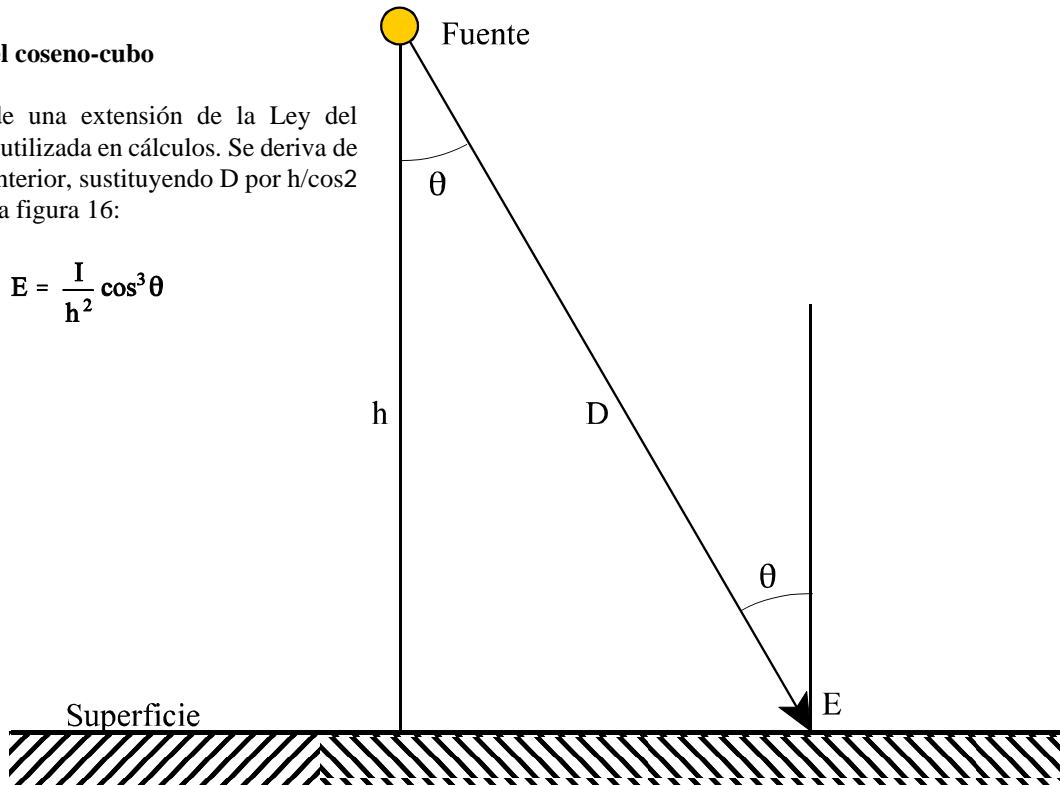


Figura 16. Ley del coseno-cubo.