

Transformación y Uso Eficiente de la Energía

BLOQUE II. ELECTRICIDAD

2. Mejora de la eficiencia energética en sistemas de alumbrado



Juan Carcedo Haya

Departamento de Ingeniería
Eléctrica y Energética

Este material se publica con licencia:

[Creative Commons BY-NC-SA 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)



PRINCIPIOS FÍSICOS DE LA LUZ

Energía radiante: Se propaga por medio de radiaciones, es decir, perturbaciones periódicas del estado electromagnético del espacio. Por lo tanto, no necesitan un medio de propagación.

Todas las radiaciones electromagnéticas se propagan en el vacío a una velocidad de 300.000 km/s.

Los distintos tipos de radiación se caracterizan por su frecuencia, período o longitud de onda.

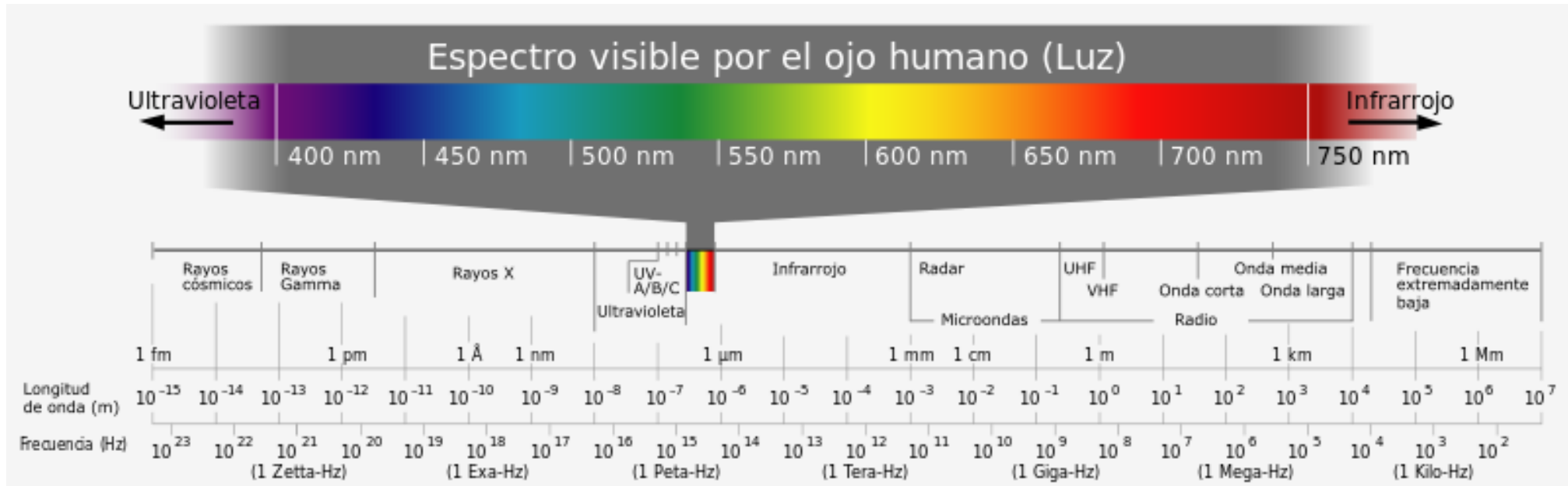
$$f = \frac{1}{T}$$

$$f = \frac{c}{\lambda}$$

La frecuencia y por lo tanto el período son invariables. Entonces, la longitud de onda dependerá de la velocidad de propagación.

PRINCIPIOS FÍSICOS DE LA LUZ

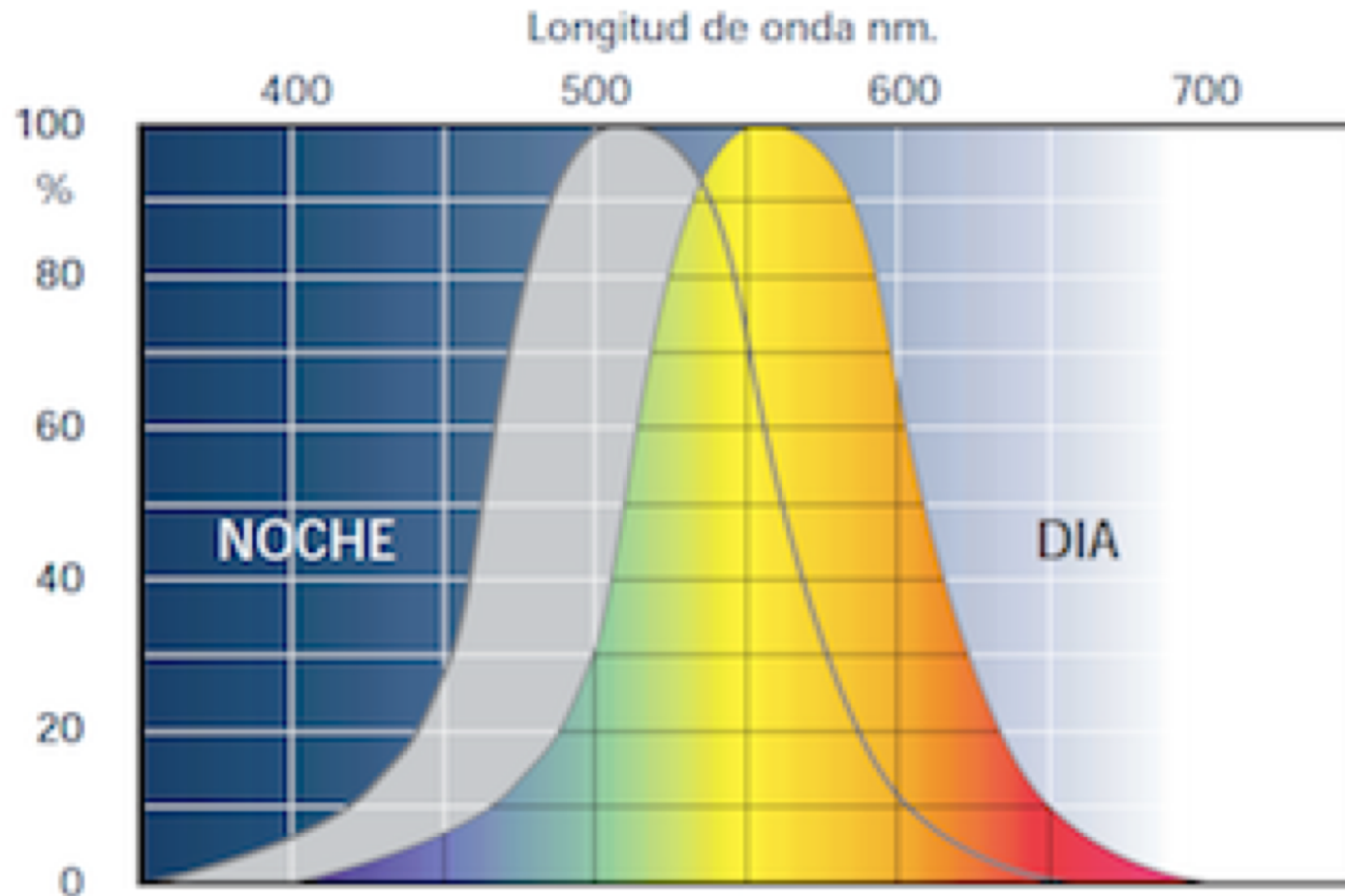
Fuente: <https://asselum.com>



Radiación visible: Radiación electromagnética capaz de producir sensaciones visuales.

Luz: Radiación visible apreciada de acuerdo con la sensibilidad del ojo humano.

PRINCIPIOS FÍSICOS DE LA LUZ



LUMINOTECNIA. MAGNITUDES FUNDAMENTALES

La luminotecnica es la ciencia que estudia las distintas formas de producción de luz, su aplicación y su control.

DEFINICIONES

Flujo luminoso:

Cantidad de energía radiante por unidad de tiempo que se convierte en luz visible, es decir, potencia de la radiación luminosa visible emitida por una fuente de luz en todas las direcciones.

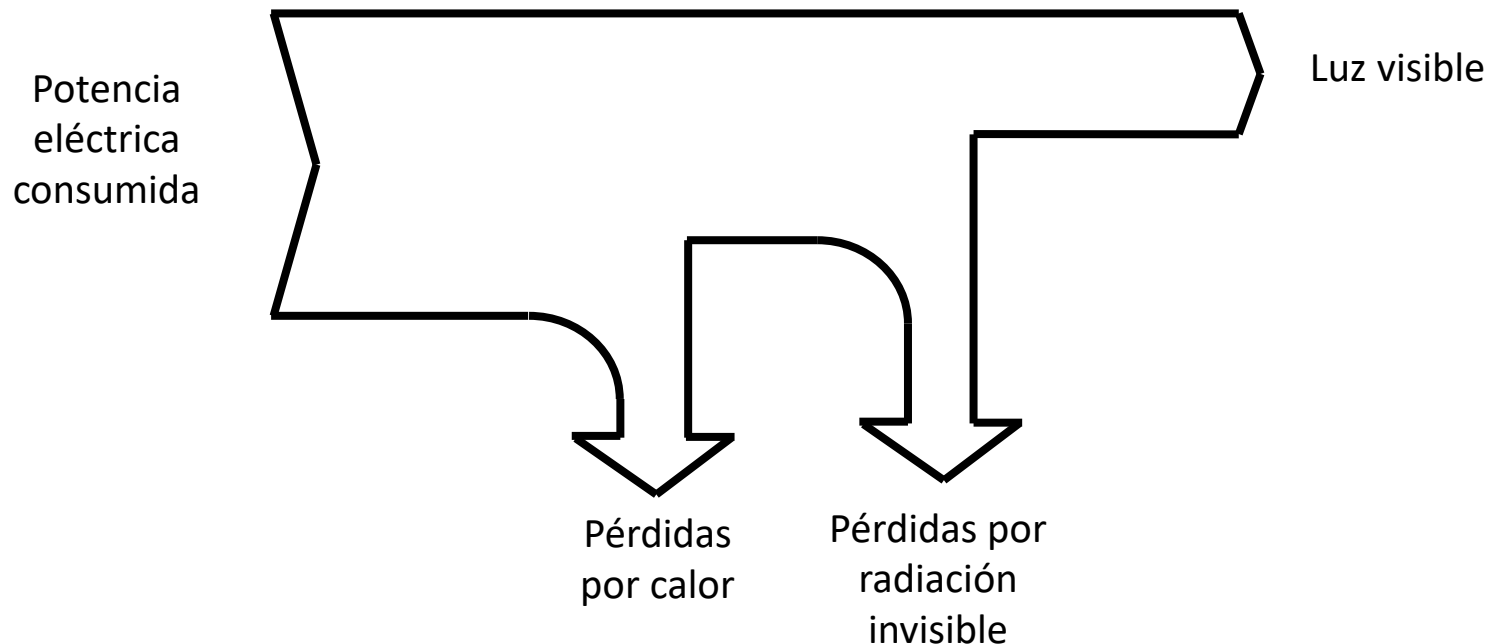
Su símbolo es Φ .

Su unidad en el S.I. es el LUMEN (lm)

LUMINOTECNIA. MAGNITUDES FUNDAMENTALES

Eficacia luminosa:

Relación existente entre el flujo luminoso emitido por una fuente de luz y la potencia que consume. Su símbolo es η . En el S.I. se expresa en LUMEN / VATIO



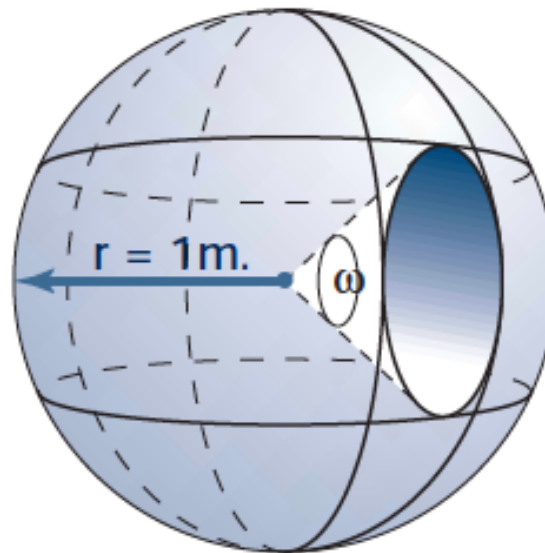
LUMINOTECNIA. MAGNITUDES FUNDAMENTALES

Intensidad luminosa:

Cantidad de flujo luminoso que emite una fuente por unidad de ángulo sólido .

Su símbolo es I .

Su unidad en el S.I. es la CANDELA (cd)



LUMINOTECNIA. MAGNITUDES FUNDAMENTALES

Illuminancia:

Relación entre el flujo luminoso que recibe una determinada superficie y su área.

Su símbolo es E.

Su unidad en el S.I. es el LUX (lx) = lm / m²



LUMINOTECNIA. MAGNITUDES FUNDAMENTALES

Luminancia:

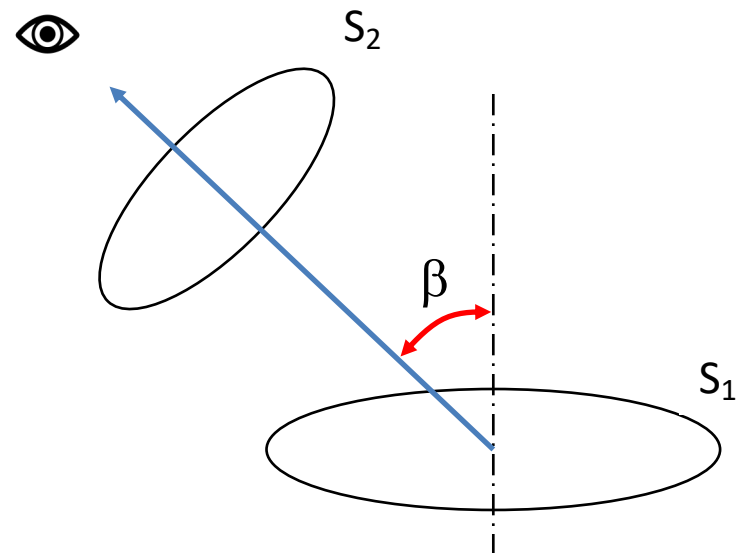
Intensidad luminosa por unidad de superficie aparente (*) de una fuente de luz

Su símbolo es L .

En el S.I. se expresa en cd / m^2

(*) Concepto de superficie aparente: Proyección de la superficie real sobre un plano perpendicular a la dirección de la mirada.

$$L = \frac{I}{S_1 \cdot \cos \beta}$$



LUMINOTECNIA. MAGNITUDES FUNDAMENTALES

Índice de reproducción cromática:

Es una medida de la capacidad que una fuente luminosa tiene para reproducir fielmente los colores de varios objetos en comparación con una fuente de luz natural o ideal. Se define por la CIE como un índice que varía entre 0 y 100.

 $90 < IRC < 100$

EXCELENTE

 $80 < IRC < 90$

BUENO

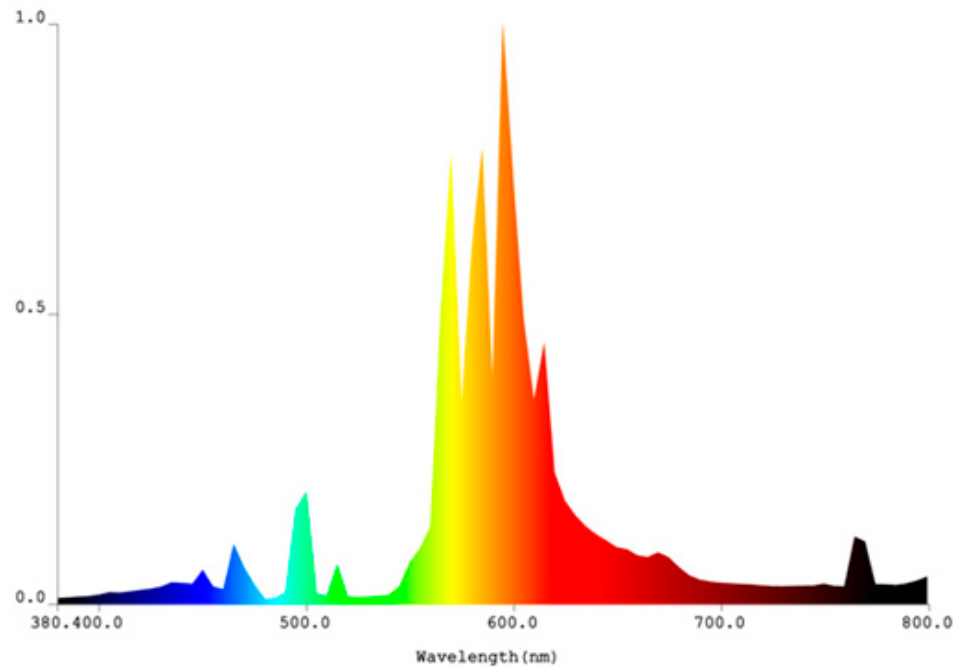
 $IRC < 80$

MODERADO O POBRE

LUMINOTECNIA. MAGNITUDES FUNDAMENTALES

Distribución espectral:

Representa la cantidad de energía radiada que emite la fuente de luz en las diferentes áreas visibles del espectro.



LUMINOTECNIA. MAGNITUDES FUNDAMENTALES

Temperatura de color:

Parámetro que caracteriza la tonalidad de la luz emitida. Es la temperatura a la que el cuerpo negro presenta una apariencia de color similar.

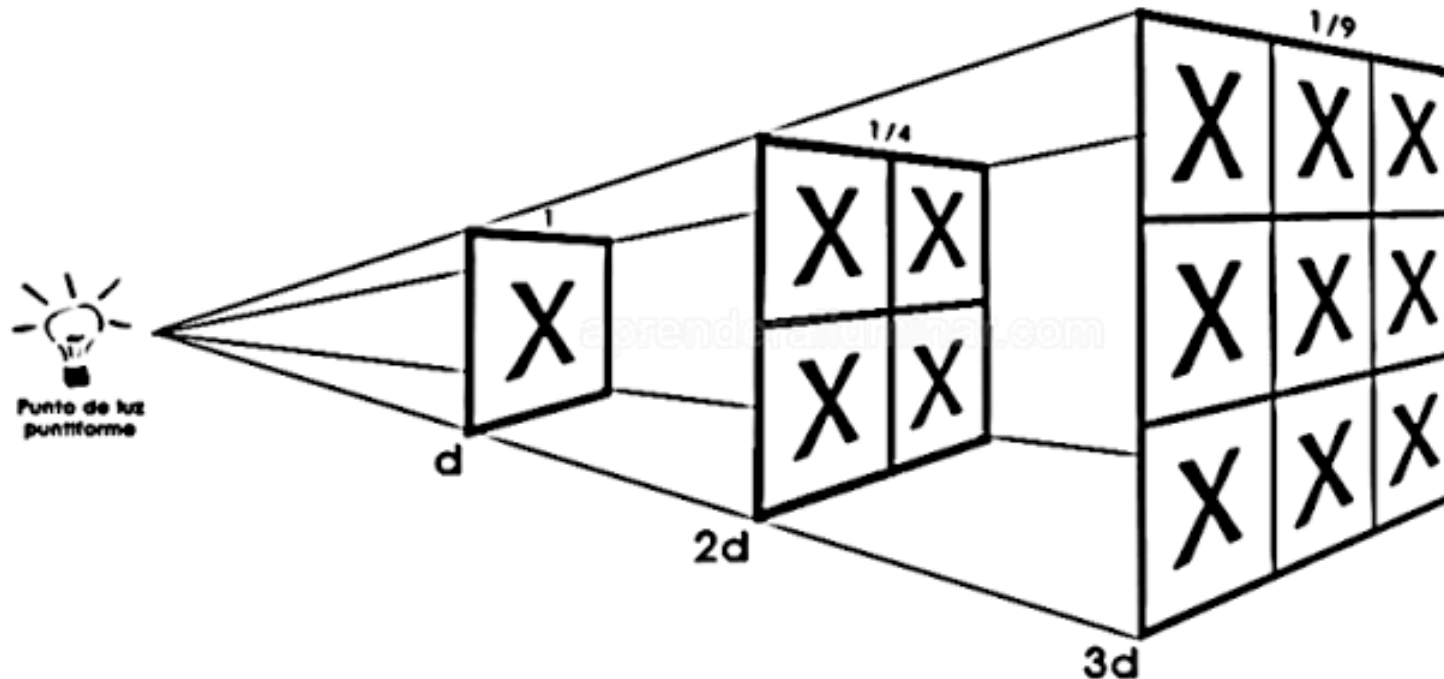
Un cuerpo negro a una determinada temperatura emite radiación; mediante la ley de Plank puede calcularse el reparto espectral de la radiación emitida.

Temperatura de color	Apariencia de color
$< 3300 \text{ K}$	Cálida
$3300 - 5000 \text{ K}$	Intermedia
$> 5000 \text{ K}$	Fría

LUMINOTECNIA. ECUACIONES FUNDAMENTALES

Ley de la inversa del cuadrado:

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



LUMINOTECNIA. ECUACIONES FUNDAMENTALES

Ley de la inversa del cuadrado:

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

Ejemplo

Una fuente de luz con una intensidad luminosa de 100 cd en una determinada dirección da lugar a un nivel de 100 lux sobre un punto situado a 1 m de distancia en dicha dirección.

$$E = \frac{100}{1^2} = 100 \text{ lux}$$

Si el punto se sitúa a una distancia de 2 m tendremos:

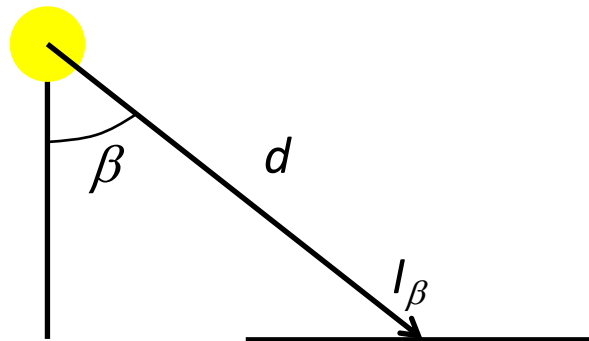
$$E = \frac{100}{2^2} = 25 \text{ lux}$$

LUMINOTECNIA. ECUACIONES FUNDAMENTALES

Ley del coseno:

La ley de la inversa del cuadrado antes planteada realmente sólo es válida en el caso de que la superficie que contiene al punto mencionado sea normal a la dirección de la intensidad considerada. En general tendremos:

$$E = \frac{I_{\beta}}{d^2} \cdot \cos \beta$$



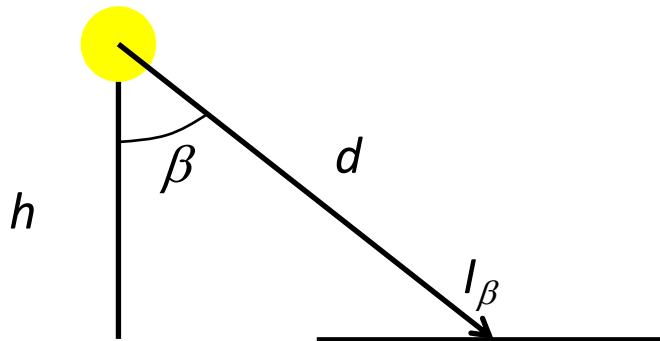
LUMINOTECNIA. ECUACIONES FUNDAMENTALES

Ley del coseno:

Ejemplo

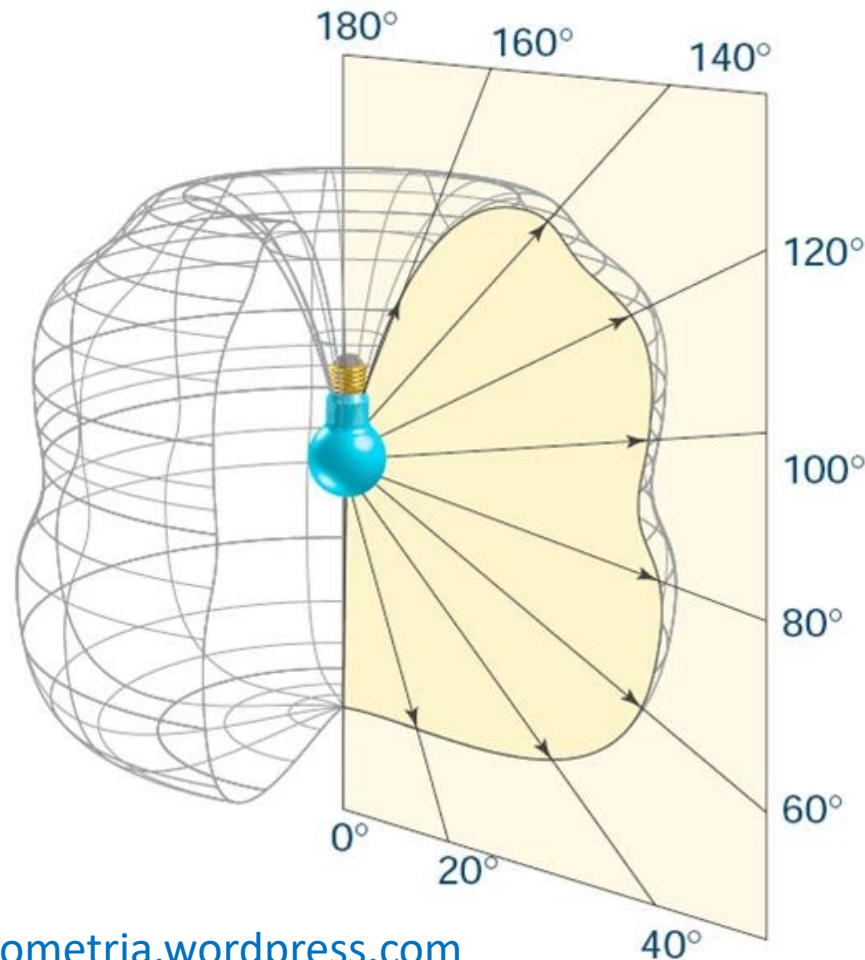
Se conoce la altura de un punto de luz y se quiere calcular el nivel de iluminación en un determinado punto situado en el suelo.

$$h = d \cdot \cos \beta \quad \Rightarrow \quad E = \frac{I_{\beta}}{h^2} \cdot \cos^3 \beta$$



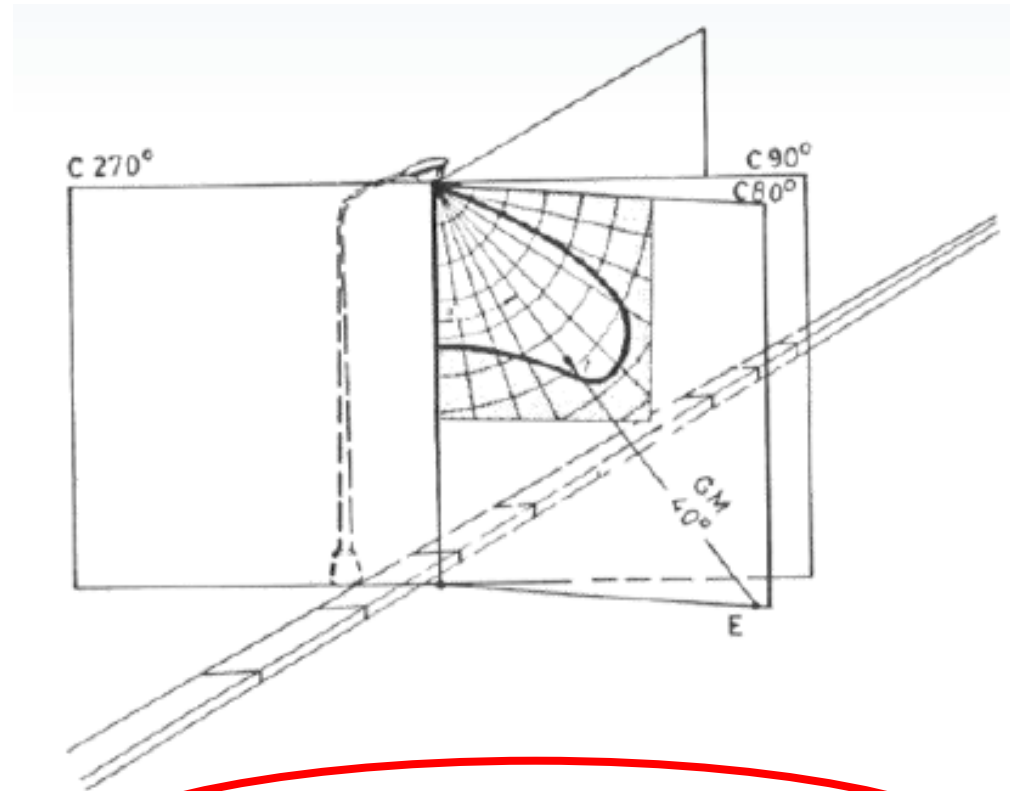
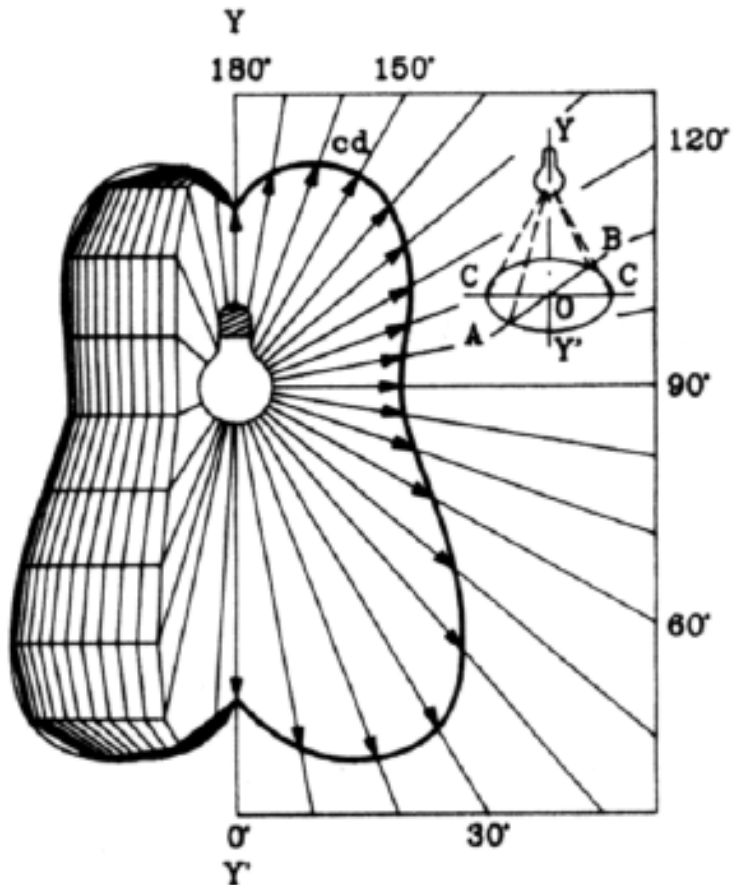
SÓLIDO FOTOMÉTRICO

Muestra vectores de intensidad luminosa en el espacio, por lo que resulta poco práctico...



SÓLIDO FOTOMÉTRICO. SIMPLIFICACIÓN

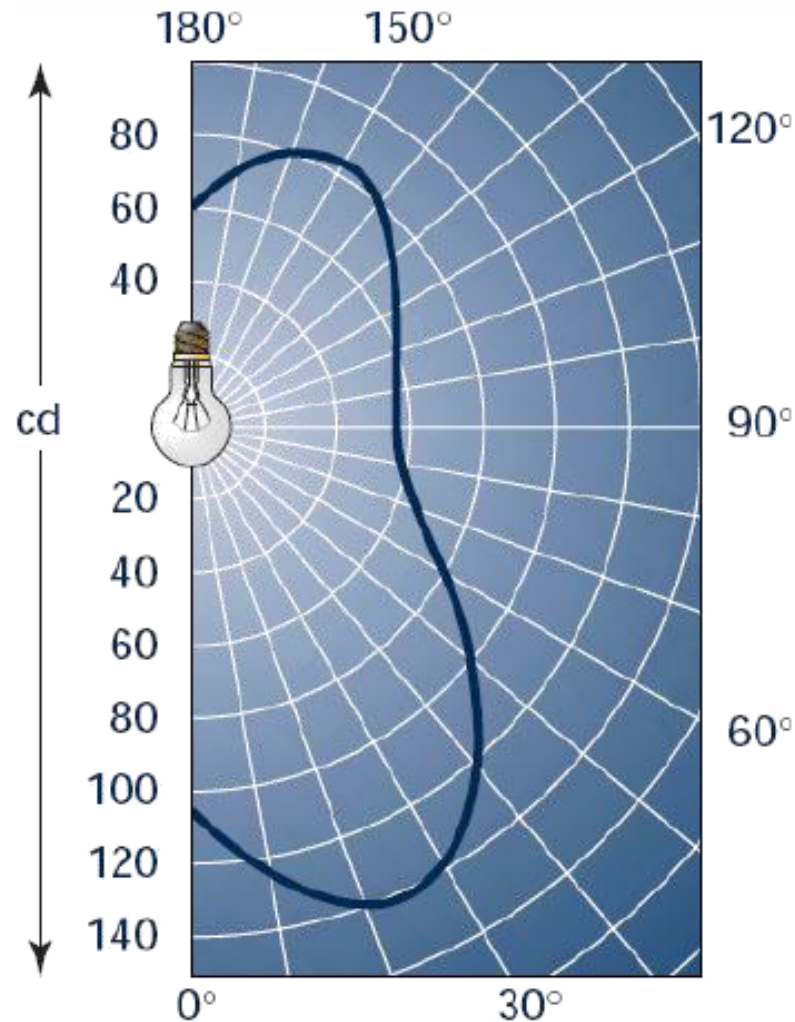
Curva de distribución de intensidades



$$I_{\text{real}} = \Phi_{\text{lámpara}} \times I_{\text{gráfico}} / 1000$$

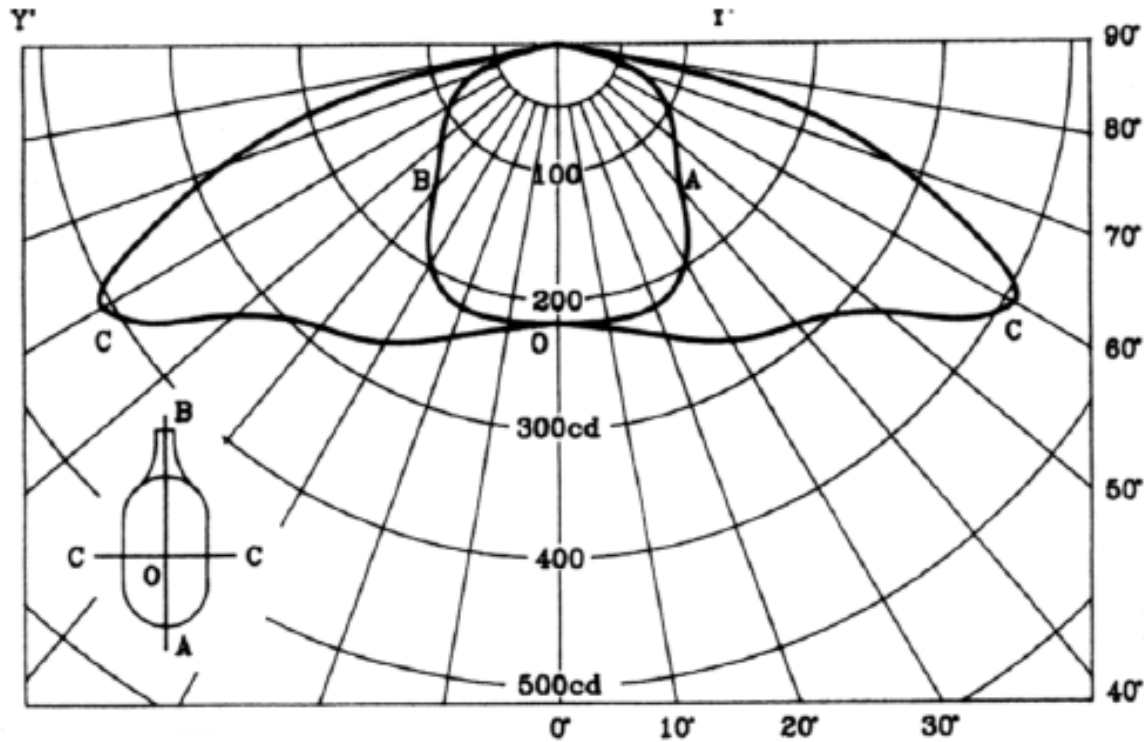
SÓLIDO FOTOMÉTRICO. SIMPLIFICACIÓN

Ejemplo



SÓLIDO FOTOMÉTRICO. SIMPLIFICACIÓN

Ejemplo



LUMINARIA

Aparato que filtra, distribuye o transforma la luz emitida por una o varias lámparas y que contiene los accesorios necesarios para alimentarlas.

Normalmente se le encomienda la labor de evitar deslumbramientos y dirigir la luz hacia donde interesa. Antiguamente se utilizaba para colorear la luz.



LÁMPARA o FUENTE DE LUZ

Dispositivo capaz de producir luz a partir de energía eléctrica.

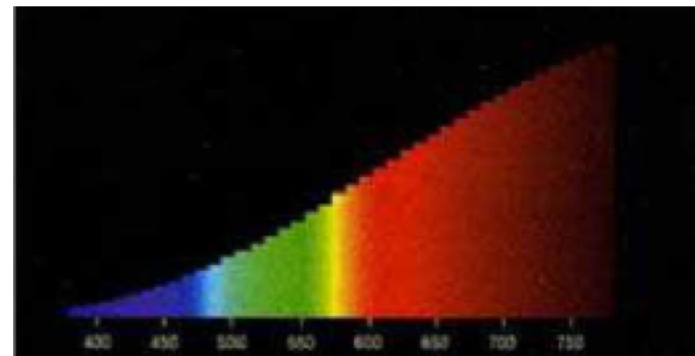
Año 1879. Swan (UK) y Edison (USA)

Principales tipos:

- Incandescencia
- Descarga a través de un gas
- Electroluminiscencia (LED)

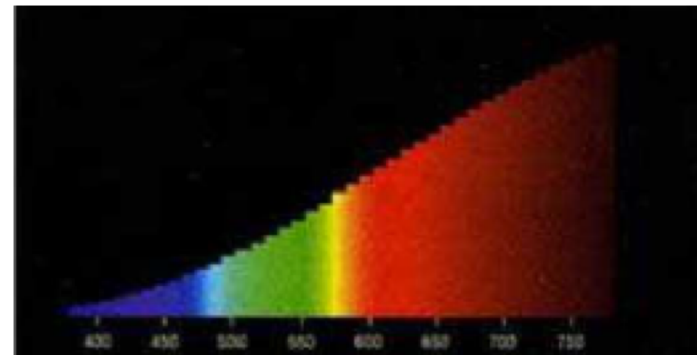
Lámpara incandescente convencional:

- No necesita equipo auxiliar
- Buen IRC (aprox. 100)
- Fácil regulación
- Bajo coste
- Encendido instantáneo
- Baja eficacia ($< 20 \text{ lm/W}$)
- Generan calor
- Vida útil corta (1.000 h)



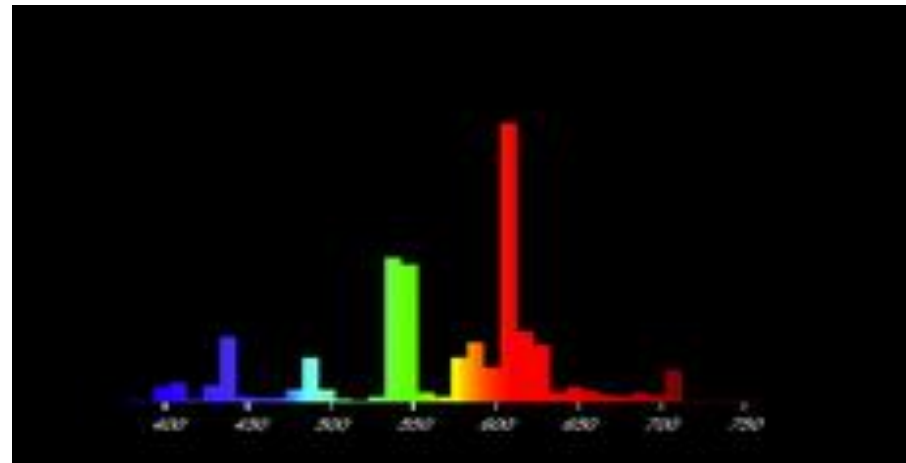
Lámpara incandescente halógena:

- Buen IRC (aprox. 100)
- Fácil regulación
- Haz focalizado
- Encendido instantáneo
- Baja eficacia ($< 30 \text{ lm/W}$)
- Generan calor
- Vida útil corta (2.000 h)
- En BT requieren transformador a 12 V



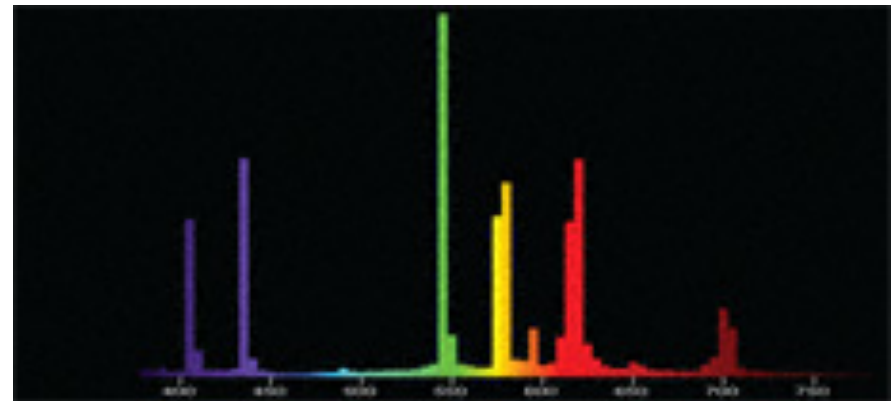
Lámpara de vapor de mercurio a baja presión:

- Alta eficacia (80 lm/W)
- Buen IRC (60 – 90)
- Vida media elevada (15.000 h)
- Generan poco calor
- Necesitan equipo auxiliar
- Elevado coste regulación
- Volumen elevado



Lámpara de vapor de mercurio a alta presión:

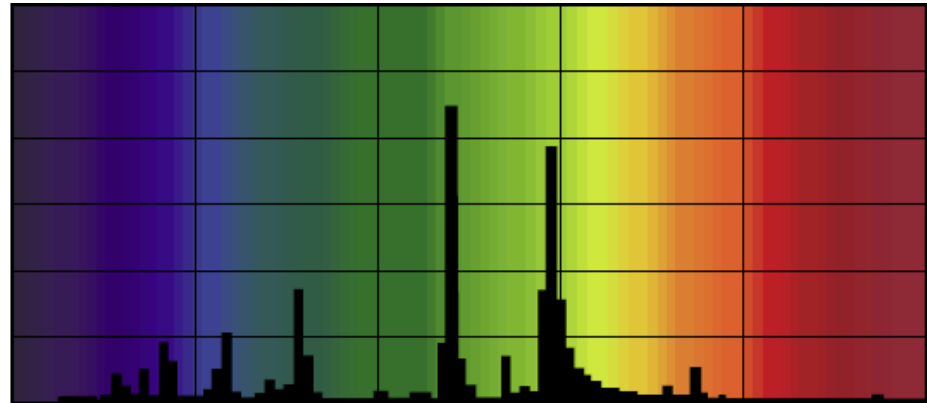
- Eficiencia aceptable (60 lm/W)
- IRC bajo (40)
- Vida media media-alta (12.000 h)
- No necesita arrancador
- Necesita equipo auxiliar
- Tiempo encendido y reencendido
- Residuo sólido



Lámpara de halogenuros metálicos:

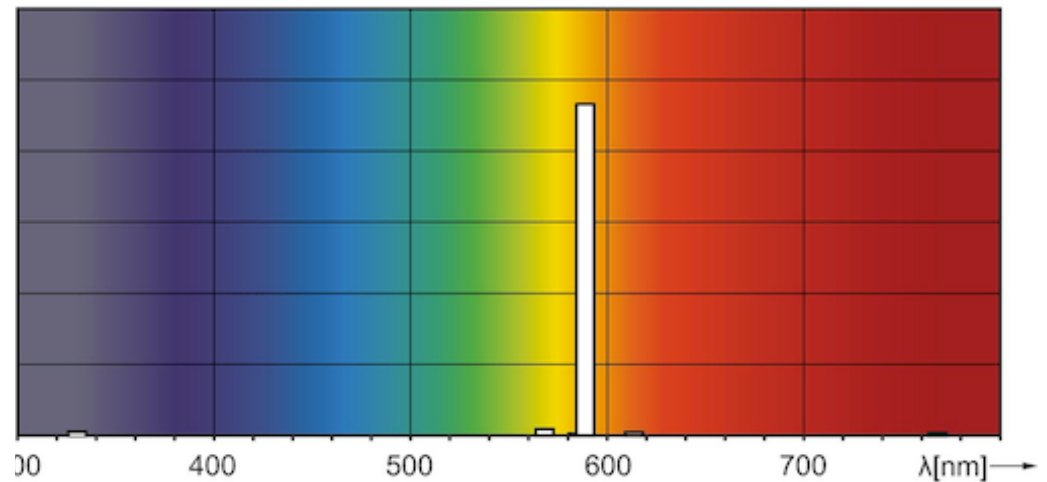
Son una variante de VMAP

- Eficacia elevada (90 lm/W)
- Buen IRC (60 – 90)
- Vida media moderada (10.000 h)
- Necesitan equipo auxiliar
- Coste elevado
- Necesita tiempo encendido y reencendido
- Estabilidad del color



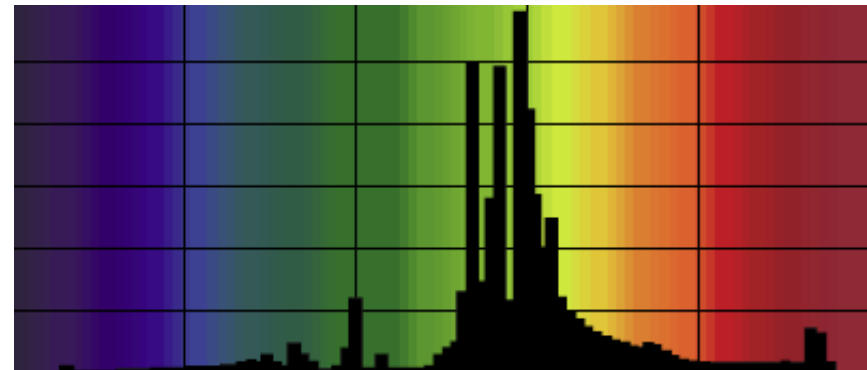
Lámpara de vapor de sodio de baja presión:

- Eficacia muy elevada (180 lm/W)
- No necesita arrancador
- Vida media elevada (15.000 h)
- Necesita equipo auxiliar
- IRC bajo (casi cero)
- Tiempo encendido y reencendido
- Gran tamaño



Lámpara de vapor de sodio de alta presión:

- Eficacia elevada (100 lm/W)
- Amplio rango de potencias
- Vida media elevada (15.000 h)
- IRC bajo (25)
- Necesita equipo auxiliar
- Necesita tiempo encendido y reencendido
- Gran tamaño

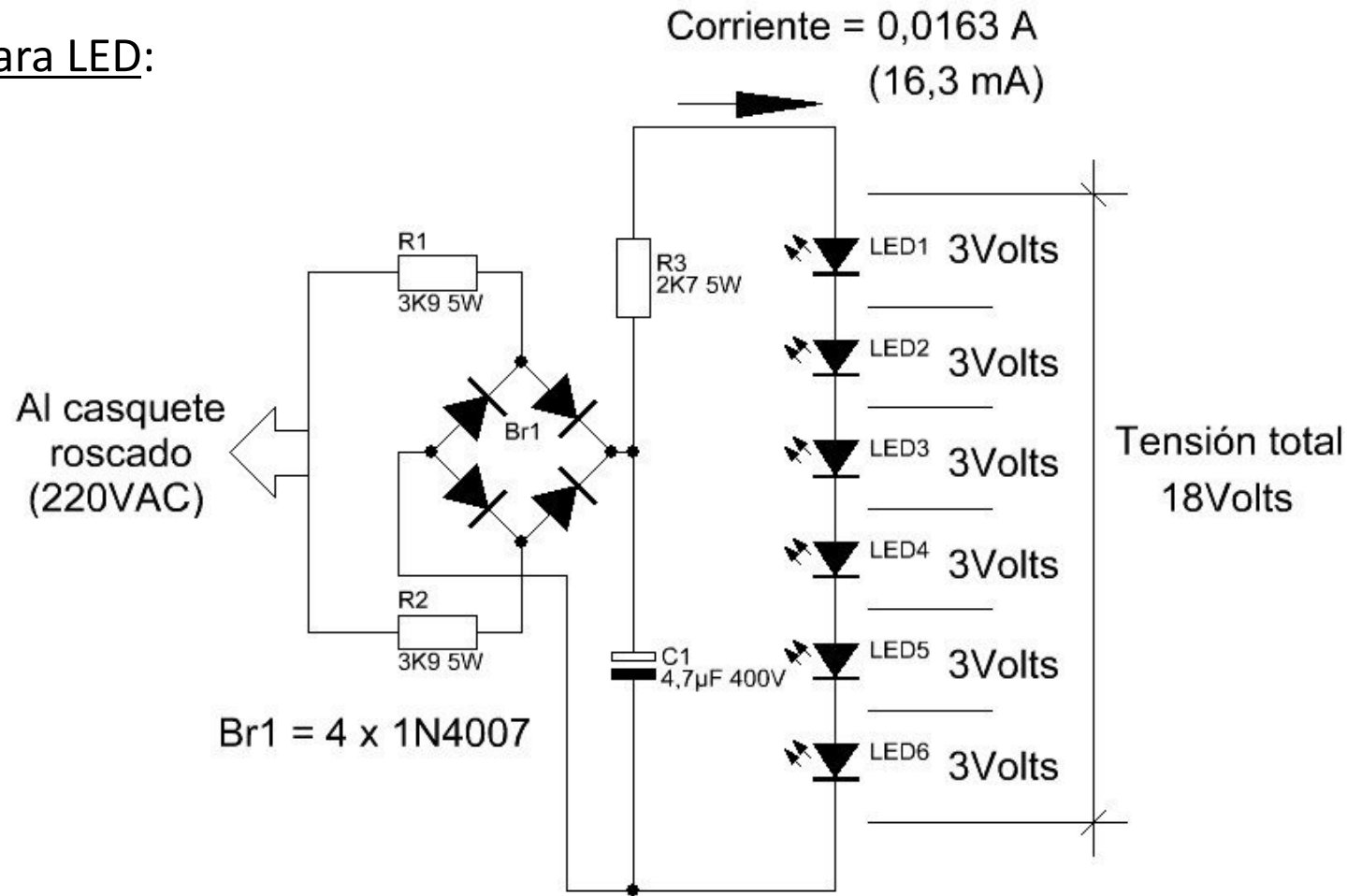


Lámpara LED:

- Buen IRC (90)
- Vida media alta (50.000 h)
- Tamaño muy compacto
- Bajo consumo
- Regulación y control del haz de luz
- Necesita equipo auxiliar
- Coste elevado
- «Baja» eficacia (90 lm/W)



Lámpara LED:



NORMATIVA

Aspectos normativos que condicionan el diseño:

- Nivel de iluminación
- Uniformidad
- Eficiencia energética

CTE. HE - 3 y SUA – 4

UNE EN 12464

UNE EN 12464

Tabla 5.26 – Oficinas

Nº ref.	Tipo de interior, tarea y actividad	$\bar{E}_m$ lx	UGR_L –	U_o –	R_a –	Requisitos específicos
5.26.1	Archivo, copias, etc.	300	19	0,40	80	
5.26.2	Escritura, escritura a máquina, lectura, tratamiento de datos	500	19	0,60	80	Trabajo en EPV, véase el apartado 4.9
5.26.3	Dibujo técnico	750	16	0,70	80	
5.26.4	Puestos de trabajo de CAD	500	19	0,60	80	Trabajo en EPV, véase el apartado 4.9
5.26.5	Salas de conferencias y reuniones	500	19	0,60	80	La iluminación debería ser controlable
5.26.6	Mostrador de recepción	300	22	0,60	80	
5.26.7	Archivos	200	25	0,40	80	

CTE SUA - 4

1 Alumbrado normal en zonas de circulación

- 1 En cada zona se dispondrá una instalación de alumbrado capaz de proporcionar, una iluminancia mínima de 20 lux en zonas exteriores y de 100 lux en zonas interiores, excepto aparcamientos interiores en donde será de 50 lux, medida a nivel del suelo.

El factor de uniformidad media será del 40% como mínimo.

- 2 En las zonas de los establecimientos de *uso Pública Concurrencia* en las que la actividad se desarrolle con un nivel bajo de iluminación, como es el caso de los cines, teatros, auditorios, discotecas, etc., se dispondrá una iluminación de balizamiento en las rampas y en cada uno de los peldaños de las escaleras.

CTE HE – 3

Valor de la eficiencia energética de la instalación VEEI

$$VEEI = \frac{P \cdot 100}{S \cdot E_m}$$

siendo

P la potencia de la *lámpara* más el *equipo auxiliar* [W];

S la superficie iluminada [m²];

E_m la *iluminancia media horizontal mantenida* [lux]

CTE HE – 3

<i>Zonas de actividad diferenciada</i>	VEEI límite
administrativo en general	3,0
andenes de estaciones de transporte	3,0
pabellones de exposición o ferias	3,0
salas de diagnóstico ⁽¹⁾	3,5
aulas y laboratorios ⁽²⁾	3,5
habitaciones de hospital ⁽³⁾	4,0
recintos interiores no descritos en este listado	4,0
zonas comunes ⁽⁴⁾	4,0
almacenes, archivos, <i>salas técnicas</i> y cocinas	4,0
aparcamientos	4,0
espacios deportivos ⁽⁵⁾	4,0
estaciones de transporte ⁽⁶⁾	5,0
supermercados, hipermercados y grandes almacenes	5,0

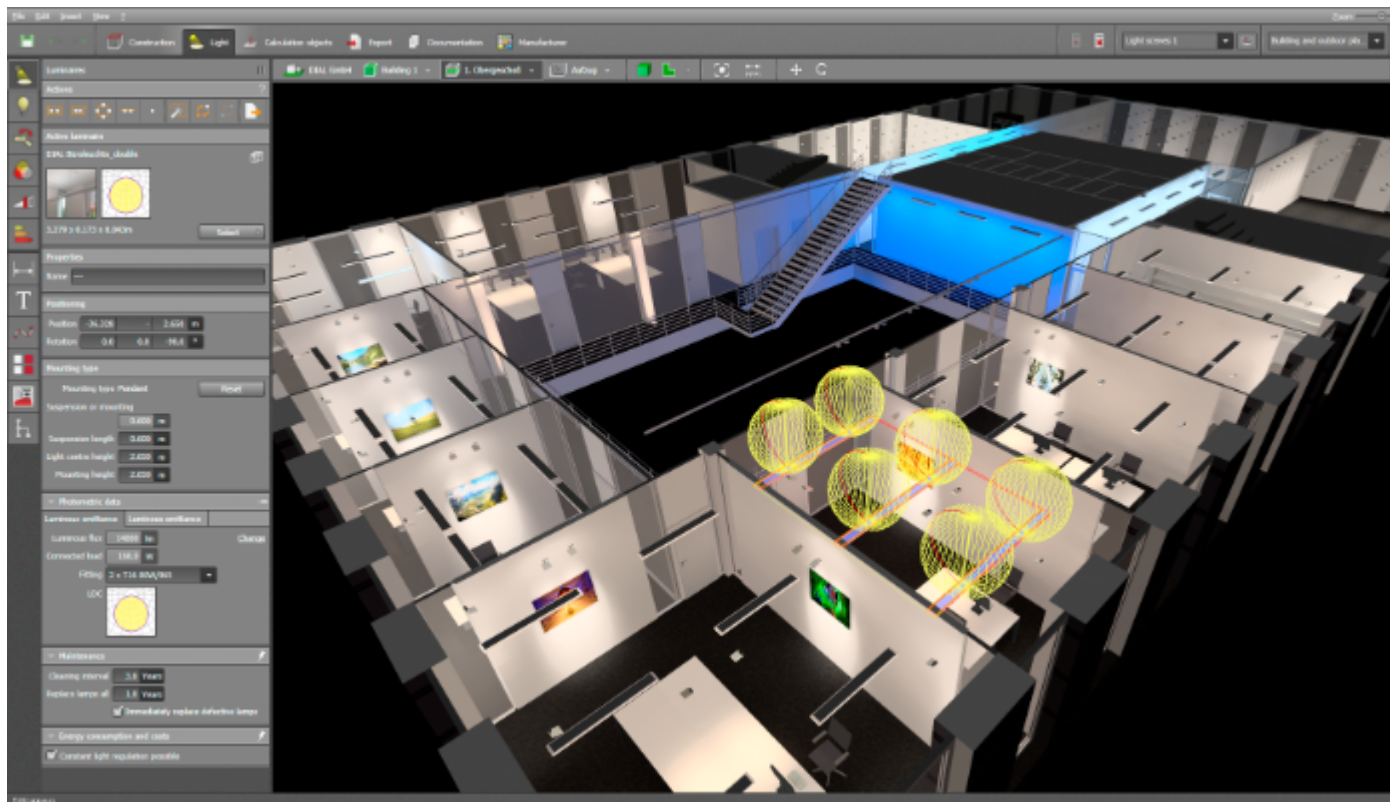
CTE HE – 3

La potencia instalada también está limitada.

Uso del edificio	Potencia máxima instalada [W/m ²]
Administrativo	12
Aparcamiento	5
Comercial	15
Docente	15
Hospitalario	15
Restauración	18
Auditorios, teatros, cines	15
Residencial Público	12
Otros	10
Edificios con nivel de iluminación superior a 600lux	25

CÁLCULOS

DIALux



EJEMPLO DE CÁLCULO. ALUMBRADO INTERIOR

En resumen, se trata de calcular el número de puntos de luz a instalar y su ubicación.

El número de puntos a instalar depende del flujo total necesario y el flujo emitido por cada luminaria.

$$N = \frac{\Phi_T}{\Phi_P}$$

El flujo lumínico total necesario depende del nivel de iluminación deseado y de dos coeficientes llamados «coeficiente de utilización» y «coeficiente de depreciación».

$$\Phi_T = \frac{E_m \cdot S}{C_u \cdot C_d}$$

EJEMPLO DE CÁLCULO. ALUMBRADO INTERIOR

El coeficiente de utilización depende de otros parámetros como el «índice del local» y los coeficientes de reflexión de paredes y techos. Se obtiene a partir de tablas.

El índice del local se define como:

$$K = \frac{L \cdot A}{h \cdot (L + A)}$$

Donde:

- L es la longitud del local
- A es la anchura del local
- H es la altura de las luminarias respecto al plano de cálculo

EJEMPLO DE CÁLCULO. ALUMBRADO INTERIOR

A efectos de cálculo se consideran los siguientes índices del local:

Valor de K	Índice del local
< 0,7	0,6
0,7 a 0,9	0,8
0,9 a 1,12	1
1,12 a 1,38	1,25
1,38 a 1,75	1,50
1,75 a 2,25	2
2,25 a 2,75	2,50
2,75 a 3,50	3
3,50 a 4,50	4
> 4,50	5

EJEMPLO DE CÁLCULO. ALUMBRADO INTERIOR

Tipo de aparato de alumbrado	Índice del local k	Factor de utilización (η)								
		Factor de reflexión del techo								
		0.7			0.5			0.3		
		Factor de reflexión de las paredes								
		0.5	0.3	0.1	0.5	0.3	0.1	0.5	0.3	0.1
 	1	.28	.22	.16	.25	.22	.16	.26	.22	.16
	1.2	.31	.27	.20	.30	.27	.20	.30	.27	.20
	1.5	.39	.33	.26	.36	.33	.26	.36	.33	.26
	2	.45	.40	.35	.44	.40	.35	.44	.40	.35
	2.5	.52	.46	.41	.49	.46	.41	.49	.46	.41
	3	.54	.50	.45	.53	.50	.45	.53	.50	.45
	4	.61	.56	.52	.59	.56	.52	.59	.56	.52
	5	.63	.60	.56	.63	.60	.56	.62	.60	.56
	6	.68	.63	.60	.66	.63	.60	.65	.63	.60
	8	.71	.67	.64	.69	.67	.64	.68	.67	.64
10	.72	.70	.67	.71	.70	.67	.71	.70	.67	

EJEMPLO DE CÁLCULO. ALUMBRADO INTERIOR

Consideremos un local de dimensiones 11,5 m x 26 m y altura 2,8 m en el que se quiere disponer de un nivel de iluminación de 750 lux.

Si el plano de trabajo está a 0,8 m sobre el suelo se tiene:

$$K = \frac{11,5 \cdot 26}{2 \cdot (11,5 + 26)} = 3,98$$

Por lo tanto se considera un índice del local igual a 4.

Si los coeficientes de reflexión de paredes y techo son del 50% y se utilizan tubos fluorescentes convencionales dispuestos en luminaria directa empotrable tendremos un $C_u = 0,56$

EJEMPLO DE CÁLCULO. ALUMBRADO INTERIOR

LUMINARIA	Distancia entre luminarias inferior a	Coeficiente de conservación	Techo	80 %			70 %			50 %	50 %	
			Paredes	50 %	30 %	10 %	50 %	30 %	10 %		30 %	10 %
			Indice local	Coeficiente de utilización								
Regleta para tubos fluorescentes standard. Montaje de superficie. Alumbrado SEMIDIRECTO	1,4 X Altura de montaje	Bueno 0,75 Medio 0,65 Malo 0,55	0,60	0,27	0,21	0,17	0,27	0,21	0,17	0,22	0,20	0,17
			0,80	0,35	0,30	0,24	0,35	0,30	0,24	0,34	0,28	0,24
			1	0,43	0,36	0,30	0,41	0,35	0,31	0,40	0,34	0,30
			1,25	0,49	0,42	0,37	0,49	0,42	0,36	0,46	0,40	0,36
			1,50	0,55	0,47	0,42	0,53	0,47	0,41	0,50	0,44	0,40
			2	0,62	0,55	0,50	0,60	0,53	0,49	0,57	0,52	0,47
			2,50	0,67	0,61	0,56	0,66	0,60	0,55	0,62	0,57	0,52
			3	0,71	0,65	0,60	0,70	0,63	0,59	0,65	0,61	0,56
			4	0,76	0,71	0,66	0,74	0,69	0,65	0,69	0,65	0,62
			5	0,81	0,76	0,71	0,78	0,74	0,70	0,73	0,69	0,67
Luminaria para tubos fluorescentes standard provista de cubeta de material plástico. Montaje empotrado. Alumbrado DIRECTO.	1,2 X Altura de montaje	Bueno 0,70 Medio 0,60 Malo 0,50	0,60	0,27	0,22	0,20	0,26	0,22	0,19	0,25	0,22	0,19
			0,80	0,33	0,29	0,26	0,33	0,29	0,25	0,32	0,28	0,25
			1	0,38	0,34	0,30	0,38	0,33	0,30	0,37	0,33	0,30
			1,25	0,43	0,38	0,35	0,42	0,38	0,34	0,41	0,38	0,34
			1,50	0,46	0,42	0,38	0,46	0,41	0,38	0,44	0,41	0,38
			2	0,50	0,47	0,43	0,50	0,46	0,43	0,48	0,46	0,43
			2,50	0,53	0,50	0,47	0,53	0,49	0,47	0,51	0,48	0,46
			3	0,55	0,52	0,50	0,54	0,52	0,49	0,53	0,51	0,49
			4	0,59	0,55	0,53	0,58	0,55	0,53	0,56	0,54	0,52
			5	0,60	0,57	0,55	0,59	0,57	0,55	0,57	0,56	0,54

EJEMPLO DE CÁLCULO. ALUMBRADO INTERIOR

Estimando un mantenimiento de tipo medio, el coeficiente de depreciación es de 0,6.
Por lo tanto:

$$\Phi_T = \frac{E_m \cdot S}{C_u \cdot C_d} = \frac{750 \cdot 11,5 \cdot 26}{0,56 \cdot 0,6} = 667.410 \text{ lm}$$

Si se instalan luminarias de tipo 4x23 W, considerando que cada tubo emite 2.150 lm tendremos:

$$N = \frac{\Phi_T}{\Phi_P} = \frac{667.410}{4 \cdot 2.150} = 77 \text{ ud}$$

EJEMPLO DE CÁLCULO. ALUMBRADO INTERIOR

Dadas las dimensiones del local, se instalaría una cuadrícula de $13 \times 6 = 78$ uds.



EJEMPLO DE CÁLCULO. ALUMBRADO INTERIOR

Consideremos un aula de dimensiones 11,5 m x 10 m y altura 2,8 m en el que se quiere disponer de un nivel de iluminación de 300 lux.

Si el plano de trabajo está a 0,8 m sobre el suelo se tiene:

$$K = \frac{11,5 \cdot 10}{2 \cdot (11,5 + 10)} = 2,67$$

Por lo tanto se considera un índice del local igual a 2,5.

Si los coeficientes de reflexión de paredes y techo son del 50% y se utilizan tubos fluorescentes convencionales dispuestos en luminaria directa empotrable tendremos un $C_u = 0,51$

EJEMPLO DE CÁLCULO. ALUMBRADO INTERIOR

LUMINARIA	Distancia entre luminarias inferior a	Coeficiente de conservación	Techo	80 %			70 %			50 %	50 %	
			Paredes	50 %	30 %	10 %	50 %	30 %	10 %		30 %	10 %
			Indice local	Coeficiente de utilización								
Regleta para tubos fluorescentes standard. Montaje de superficie. Alumbrado SEMIDIRECTO	1,4 X Altura de montaje	Bueno 0,75 Medio 0,65 Malo 0,55	0,60	0,27	0,21	0,17	0,27	0,21	0,17	0,22	0,20	0,17
			0,80	0,35	0,30	0,24	0,35	0,30	0,24	0,34	0,28	0,24
			1	0,43	0,36	0,30	0,41	0,35	0,31	0,40	0,34	0,30
			1,25	0,49	0,42	0,37	0,49	0,42	0,36	0,46	0,40	0,36
			1,50	0,55	0,47	0,42	0,53	0,47	0,41	0,50	0,44	0,40
			2	0,62	0,55	0,50	0,60	0,53	0,49	0,57	0,52	0,47
			2,50	0,67	0,61	0,56	0,66	0,60	0,55	0,62	0,57	0,52
			3	0,71	0,65	0,60	0,70	0,63	0,59	0,65	0,61	0,56
			4	0,76	0,71	0,66	0,74	0,69	0,65	0,69	0,65	0,62
			5	0,81	0,76	0,71	0,78	0,74	0,70	0,73	0,69	0,67
Luminaria para tubos fluorescentes standard provista de cubeta de material plástico. Montaje empotrado. Alumbrado DIRECTO.	1,2 X Altura de montaje	Bueno 0,70 Medio 0,60 Malo 0,50	0,60	0,27	0,22	0,20	0,26	0,22	0,19	0,25	0,22	0,19
			0,80	0,33	0,29	0,26	0,33	0,29	0,25	0,32	0,28	0,25
			1	0,38	0,34	0,30	0,38	0,33	0,30	0,37	0,33	0,30
			1,25	0,43	0,38	0,35	0,42	0,38	0,34	0,41	0,38	0,34
			1,50	0,46	0,42	0,38	0,46	0,41	0,38	0,44	0,41	0,38
			2	0,50	0,47	0,43	0,50	0,46	0,43	0,48	0,46	0,43
			2,50	0,53	0,50	0,47	0,53	0,49	0,47	0,51	0,48	0,46
			3	0,55	0,52	0,50	0,54	0,52	0,49	0,53	0,51	0,49
			4	0,59	0,55	0,53	0,58	0,55	0,53	0,56	0,54	0,52
			5	0,60	0,57	0,55	0,59	0,57	0,55	0,57	0,56	0,54

EJEMPLO DE CÁLCULO. ALUMBRADO INTERIOR

Estimando un mantenimiento de tipo medio, el coeficiente de depreciación es de 0,6.
Por lo tanto:

$$\Phi_T = \frac{E_m \cdot S}{C_u \cdot C_d} = \frac{300 \cdot 11,5 \cdot 10}{0,51 \cdot 0,6} = 112.745 \text{ lm}$$

Si se instalan luminarias de tipo 4x36 W, considerando que cada tubo emite 3.350 lm tendremos:

$$N = \frac{\Phi_T}{\Phi_P} = \frac{112.745}{4 \cdot 3.350} = 9 \text{ ud}$$