

Francesc Casanellas

Chartered Engineer, Member IEE, Senior Member IEEE

C. Sant Ramon, 5

08591 Aiguafreda - Spain

☎ +34 93 844 2301 – 📠 +34 677 00 00 00

francesc@casanellas.com - www.casanellas.com

FUNDAMENTOS DE ÓPTICA APLICADA A LOS

CUADROS DE INSTRUMENTOS

F.C. Agosto-Oct. 2000, rev. 4, 29-IX-2004

La luz y el color

La luz es una vibración electromagnética del mismo tipo que las ondas de radio, pero de longitud de onda mucho más corta. La vista es capaz de captar un reducido rango de la radiación electromagnética y este rango coincide con el máximo de energía de la luz solar. Como comparación, el oído es capaz de captar sonidos (vibraciones del aire) que difieren en longitud de onda en la proporción de más de 700 a 1, mientras que la vista capta vibraciones electromagnéticas en una gama que no llega a 2 a 1.

Vemos la luz de color diferente según sea su longitud de onda. Las longitudes de onda más largas que pueden captarse con la vista empiezan a partir del infrarrojo (que podemos captar con la piel como sensación de calor) y son de unos 700 nanómetros, es decir 0,7 milésimas de milímetro. Corresponden al rojo cereza. Las longitudes más cortas que podemos ver son de unos 400 nm y las luces correspondientes las vemos de color violeta. A partir de aquí empieza el ultravioleta, que no podemos ver ni notar (lo que notamos del sol como calor son los infrarrojos) pero que llena hoy día los consultorios de los dermatólogos con clientes con cáncer de piel.

La ciencia del color es bastante complicada, ya que no sólo es un asunto de física sino de fisiología. El ojo es mucho más sensible en el centro del espectro visible que en los extremos. La sensibilidad máxima la tenemos en los 555 nm, que corresponde al amarillo verdoso. A partir de aquí, la sensibilidad decae mucho tanto al aumentar como al disminuir la longitud de onda. Cuando la iluminación es muy baja, la mayor sensibilidad se mueve hacia el verde azulado (o al azul verdoso): de noche los tonos parecen más azulados y la sensibilidad en el rojo decrece. Ver figura 1.

La tabla siguiente da una idea de los colores para diferentes longitudes de onda:

Longitud de onda color

400 nm	violeta (límite)
420 nm	violeta
475 nm	azul
505 nm	azul verdoso
530 nm	verde
555 nm	amarillo verdoso
573 nm	amarillo
590 nm	ámbar
605 nm	naranja
650 nm	rojo
700 nm	rojo oscuro (límite)

De la fig. 1 se deduce que precisamos una potencia unas 10 veces mayor de luz azul que de verde-amarillo para producir la misma sensación de luminosidad. No es de extrañar los problemas para producir buenas luces pilotos azules.

Un color amarillo puede ser muy saturado (muy puro) y ser muy claro. Un azul puro es muy oscuro: es interesante observar la paleta de un pintor o recordar la dificultad que hayamos tenido a veces en distinguir un azul marino de un negro. Un azul claro ya no es puro: tiene una mezcla de blanco (es decir de todos los demás colores). El color rosa es un rojo poco saturado, es decir con blanco: ver figura 3.

Con el oído podemos notar que hay dos sonidos de longitudes de ondas distintas que suenan a la vez: un acorde de dos notas incluso al que no tiene experiencia musical le suena distinto que cualquier nota por separado. Si embargo el sistema visual es incapaz de separar longitudes de ondas distintas y vemos exactamente de la misma manera colores puros (una sola longitud de onda) que una mezcla de varios colores. Por ejemplo, la mezcla de luz amarilla y azul la vemos verde y no podemos distinguir este verde de un verde que sólo tenga luz verde. Cuando dos colores juntos producen luz blanca se dicen que son complementarios, por ejemplo el azul ultramar y el amarillo verdoso, el rojo vivo y el verde esmeralda. No podemos ver que constituyentes tiene la luz blanca: puede estar formada de solo dos colores complementarios o de una mezcla de todos los colores, como es el caso de la luz solar.

Cuando se ve un color con luz blanca, o se quiere filtrar ésta, sí que tiene importancia cómo está formada ésta. Si se ve un color rojo a la luz blanca solar se verá bien, pero si se ve a la luz blanca formada por un amarillo y un azul, se verá muy mal ya que no hay componentes rojos en esta luz: éste es el motivo por el que se ven distintos algunos colores a la luz de lámparas fluorescentes o a la luz solar.

El ojo se adapta a las condiciones medias del ambiente. Tiene dos sistemas de ajustes de luminosidad: uno rápido, mediante la variación del diámetro de la abertura del iris y otro más lento (varios minutos), modificando la sensibilidad de la retina. Este sistema complejo nos permite ver en condiciones de iluminación extraordinariamente diferentes, del orden de los 2 millones de veces de diferencia. Menos sabido es que también se adapta al color medio de la iluminación. Vemos los colores de modo similar bajo la iluminación solar que al cabo de un tiempo de estar en una iluminación con luz de lámparas de incandescencia, que como sabe cualquier aficionado a la fotografía es anaranjada.

Una curiosidad: Al mirar un color vivo, el ojo tiende a agrisarlo para mitigar la excesiva excitación, “creando” su complementario. Para saber cual es el complementario de un color, observarlo fijamente con mucha luz durante un buen rato y luego cerrar los ojos o mirar una pared blanca poco iluminada.

Las figuras 2 y 3 muestran la distribución espectral de varios colores. El caso más corriente de luz pura lo constituyen los LEDs (ver fig. 4) pero aún es más pura la luz de una lámpara neón que radia predominantemente en el anaranjado de 630 nm: todos los intentos de filtrar una luz monocromática para cambiar su color son inútiles.

Medida de la iluminación

La cantidad de luz emitida (por ejemplo por una bombilla o un LED), se mide en **lúmenes (lm)**. Un lumen corresponde a la potencia luminosa de 1.46 miliwatts a 555 nm (amarillo verdoso). Para otros colores, la misma potencia dará una cantidad de lúmenes corregida según el gráfico de la figura 1. Un manantial de 555 nm con rendimiento del 100% produciría $1\text{lm} / 1.46\text{ mW} = 685\text{ lúmenes por watt}$. La potencia total de un foco luminoso se suele llamar flujo y se expresa por Φ_v .

A continuación se indican rendimientos típicos en lúmenes por watt de algunos focos luminosos:

De incandescencia normal: 12 a 15 lm/W

Halógena: 22 lm/W

Fluorescente: 25 (4W) a 73 lm/W (65W, blanco súper)

Lámpara de vapor de sodio: 78 a 110 lm/W (el mayor rendimiento en lámparas de iluminación, pero sólo radian en el amarillo-anaranjado).

Lámpara de vapor de mercurio: 40 a 52 lm/W

LEDs: los últimos LEDs alcanzan los 20 lm/W (pero los hay experimentales con rendimientos mayores, ver el apartado correspondiente.)

La intensidad de luz depende de la cantidad total de luz, pero también del ángulo abarcado. Es decir, la misma potencia luminosa dará más intensidad si se concentra en un ángulo estrecho que en uno ancho. La intensidad de luz se mide en **candelas (cd)**, que para el que tenga formación matemática diremos que es un lumen por estereoradián (sr). (Así pues un foco puntual con intensidad de una candela emite 4π lúmenes. De hecho la definición ISO es la candela y de ella se deduce el lumen.)

La iluminación sobre una superficie se mide en **lux** que es la iluminación producida por una candela a 1 metro de distancia, o bien la intensidad de un lumen por metro cuadrado.

Ejemplos aproximados de iluminación:

Luz solar verano, si nubes: 100.000 lux

Luz solar, día nublado: 10.000 lux

Interior junto a ventana: 1000 lux

Habitación con buena luz: 500 lux

Noche de luna llena: 0.2 lux

Noche estrellada sin luna: 0.0003

En USA, que siguen sin acabarse de normalizar, todavía se usa el “foot-candle” que es la iluminación que da una candela a la distancia de 1 pie. Como un pie = 0.3048 m:

$$1 \text{ fc} = 1/(0.3048)^2 = 10.76 \text{ lux}$$

Si en vez de manantiales puntuales consideramos fuentes de luz con cierta superficie, introducimos el concepto de brillo, o intensidad por unidad de superficie, que nos interesa especialmente por ser la magnitud que apreciamos en los pilotos luminosos de los instrumentos. Se puede medir en cd/m^2 (nit) o cd/cm^2 (stilb - sb). También se usa el lambert (lam) = $1 \text{ sb} / \pi$.

La iluminación producida por un manantial puntual sobre un plano es pues:

$$E = \frac{I}{d^2} \cos \alpha \quad (1)$$

donde I es la intensidad (cd), d la distancia y α el ángulo formado por la perpendicular al elemento de superficie con la recta que lo une al punto de luz.

Si se trata de un manantial circular de radio r, brillo B i área S:

$$E = \frac{B \cdot S}{r^2 + d^2} \cos \alpha \quad (2)$$

si $r \ll d$ esta ecuación se reduce a

$$E = \frac{B \cdot S}{d^2} \cos \alpha \quad (2a)$$

Ejemplos:

Papel blanco al sol: 25000 cd/m^2

Lámpara fluorescente: 6000 cd/m^2

Cielo despejado: 3200 cd/m²
Luna: 2900 cd/m²

Mínimo aceptado en panel de automóvil 5 - 10 cd/m²

Lámparas de incandescencia y otros focos de luz

La lámpara de incandescencia produce principalmente calor. Un rendimiento lumínico normal es del orden del 8% con 12-15 lm/W.

Las lámparas de incandescencia producen luz en toda la banda del espectro (ver fig. 4), pero con predominancia de luz roja y anaranjada.

En automoción, las lámparas piloto están subalimentadas para que no se fundan: baja temperatura, bajo rendimiento. Además, si bien se suelen especificar a 13.5 V, deben ser capaces de trabajar a 15 e incluso 16 V. En cambio, las de los faros están sobrealimentadas para obtener el máximo rendimiento. Según el reglamento internacional de la N.U. nº 37 los valores de rendimiento lumínico mínimo a 13.5 V son los siguientes:

Faro	45 W	860 lm	19 lm/W
Faro halógeno	55 W	1550 lm	28 lm/W
Señalización roja	4 W	35 lm	8.75 lm/W
Intermitente	10 W	125 lm	12.5 lm/W
Piloto instrumento	1.4 W	8 lm	5.7 lm/W
Piloto de 100000 horas de vida (ejemplo):	0.65	2.2 lm	3.4 lm/W

Las lámparas de automoción deben poder soportar vibraciones. Al aumentar la tensión, el filamento debe ser más fino, por lo que las lámparas de 24 V duran menos que las de 12 V y éstas menos que las de 6 V. Por esto, en los automóviles del futuro con la nueva tensión de 36 V, las lámparas seguirán siendo de 12 V, lo que obligará a mantener dos tensiones de alimentación.

Las siguientes ecuaciones dan una buena aproximación para lámparas de incandescencia alimentadas a $\pm 20\%$ de la tensión nominal:

$$\text{Duración} = \text{Duración nominal} (\text{Tensión nominal} / \text{Tensión})^{12}$$

$$\text{Flujo luminoso} = \text{Flujo nominal} (\text{Tensión} / \text{Tensión nominal})^{3.5}$$

$$\text{Corriente} = \text{Corriente nominal} (\text{Tensión} / \text{Tensión nominal})^{0.55}$$

LEDs

Contrariamente a la lámpara de incandescencia, el LED produce luz de un color determinado en detrimento de todos los demás. Ver fig.4. Por tanto no podemos filtrar la luz de un LED amarillo para extraerle azul, porque no emite prácticamente nada de energía en el azul.

Los LEDs con los que es más fácil conseguir un rendimiento elevado son el rojo y rojo-anaranjado. Los primeros LEDs rojos en GaAsP con sustrato de GaAs, radiaban en los 660 nm con rendimientos muy bajos para los estándares actuales: < 0.1 lm/W. Los primeros LEDs de alto rendimiento originales alcanzaban 1 lm/W en 1976. Hoy día (2005) llegan a rendimientos de casi 50 lm/W y más de 100 lm/W en LEDs en fase de laboratorio, pero lo más normal (a precios normales) serían unos 9 lm/W.

Datos de LEDs de alta potencia, 2005:

Blanco: 37 lm/W
Verde: 44 lm/W
Cyan: 37 lm/W

Rojo: 53 lm/W

Nota: al comparar el rendimiento de LEDs con lámparas, hay que tener en cuenta que si éstas llevan un filtro de color, su rendimiento decae, al menos a la mitad.

Los LEDs verde-azules son usados principalmente en semáforos (los daltónicos los ven mejor que los puramente verdes) y son también nuevos, pero al tener un uso tan intensivo han mejorado rápidamente. Los de Lumiled (HP+Philips) alcanzan 20 lm/W.

Los LEDs azules son bastante recientes, sobretodo los que tienen un rendimiento (y un precio) aceptable.

Un caso particular lo constituyen los LEDs de luz blanca. Inicialmente, los LEDs blancos formados por chips de diferentes colores resultaban muy complicados ya que hay que estabilizar en temperatura cada chip para que el color no cambie al cabo de un rato de funcionar. Los LEDs blancos se basan en una patente de Nichia y están formados por un LED azul al que se añade una sustancia fluorescente de amplio espectro que, excitada por el azul, produce luz predominantemente amarilla: la suma de los dos colores complementarios la vemos blanca (fig. 4). Nótese el estrecho espectro del LED comparado con el espectro mucho más ancho de la radiación secundaria. La temperatura de color está en los 6000-6500 °K. Como la sustancia fluorescente reemite luz en zonas donde el ojo es más sensible, el rendimiento lumínico es mucho más elevado que el LED azul de base. El rendimiento de los mejores LEDs blancos ha pasado de 7.5 lm/W en 1997 a 40 lm/W hoy.

LEDs violeta: parecía imposible producirlos hace poco pero ya existen. Tienen un espectro amplio, con longitud de onda dominante de 466 nm.

Existen incluso LEDs que emiten en el ultravioleta próximo (370-375 nm)

Los LEDs "Super Flux", llamados popularmente "pirañas" ("prianha"), llevan un reflector interno (todos los nuevos LEDs de alto rendimiento llevan algún tipo de reflector) y una mejor refrigeración del chip a través de sus 4 patas, que permite alcanzar unas 2.5 (5 veces el "SNAP150") la intensidad de los LEDs de 5 mm.

Los LEDs más potentes actuales (Lumileds, Prolight, etc.), de 1 a 5 W, llevan el chip montado sobre sustrato de cobre refrigerante, sobre el que se ha grabado una parábola de reflexión.

Nota sobre el uso de LEDs: los LEDs más sofisticados actuales, como los azules y otros a base de nitruro de galio, nitruro de galio-indio, etc. son muy delicados. Se destruyen con tensiones inversas de más de 5 V o picos de corriente. Hay que considerarlos susceptibles de daño a las descargas electrostáticas.

En el caso particular de los LEDs es importante poder comparar la cantidad de luz de LEDs con diferentes ángulos de emisión. En efecto, de dos LEDs que emitan la misma cantidad de luz, el de ángulo más estrecho tendrá más intensidad de luz. Si usamos una óptica de difracción adecuada que iguale los ángulos de emisión, lo que nos importará será comparar la cantidad de luz de distintos LEDs (los lúmenes), dato que no suele venir en los catálogos, si bien algunos fabricantes empiezan ya a indicarlo.

De entrada hay que aclarar si el ángulo de visión es el ángulo total o el ángulo a partir de la vertical, dato que no queda siempre claro en los catálogos. Tomaremos como ángulo el ángulo a partir de la vertical θ , o sea el semiángulo del cono de luz.

El ángulo sólido (α_s) está relacionado con el ángulo de apertura (θ) por la expresión:

$$\alpha_s = 2 \cdot \pi \cdot (1 - \cos\theta)^{-1} \quad (\text{en estereoradianes}). \quad (3)$$

¹ En efecto, el área de un casquete esférico es $2 \pi r h$, donde r es el radio y h la altura del casquete. Como

Por tanto, el flujo total de un LED sería aproximadamente:

$$\Phi_v = I_M \cdot \alpha_s = I_M \cdot 2 \cdot \pi \cdot (1 - \cos\theta); \quad (4)$$

donde I_M es la intensidad de luz máxima en dirección vertical.

Ahora bien esto sería cierto si la luz del LED fuera constante en todo el ángulo θ y parara luego abruptamente. De hecho no es así. La intensidad decrece de modo gradual a partir de la vertical y se define el ángulo de iluminación aquel en que la intensidad decae a un 50%. La fig. 5 muestra la intensidad en función del ángulo para dos LEDs distintos de 15°.

Como la ecuación (4) no tiene en cuenta el decrecimiento de intensidad pero por otra parte tampoco incluye la luz que sobrepasa el ángulo θ , un efecto compensa el otro y la ecuación (4) no da resultados excesivamente erróneos (puede haber diferencias hasta del 60% con la realidad).

Para ciertos LEDs, una mejor aproximación que (4) la podremos obtener si asimilamos la curva *a* de la fig. 5 a un triángulo. La derivada del área del casquete esférico la obtenemos de (3): $d\alpha_s = 2 \cdot \pi \cdot \sin\theta \cdot d\theta$ y esta función la multiplicamos por la intensidad relativa al ángulo, o sea $1 - \theta/(2 \cdot \theta)$. La integración nos da el flujo total:

$$\Phi_v = 2 \pi I_M [1 - \sin(2\theta)/(2\theta)] \quad (5)$$

Para $\theta \leq 45^\circ$

(El ángulo debe expresarse en radianes)

Si el LED tiene una distribución parecida a la *b* de la fig.5, podemos aproximar la intensidad relativa a una función cosinoidal $I = I_M (1/2 + 1/2 \cos(\theta / \theta_n \times 90^\circ))$ e integrando resulta:

$$\Phi_v = \pi I_M (2 - [\cos(2\theta) + 1] [\theta/(180^\circ - 2\theta) + (180^\circ + \theta)/(180^\circ + 2\theta)]) \quad (6)$$

$\theta \leq 45^\circ$

En algunos casos no nos interesa el flujo total sino el flujo útil dentro del ángulo θ . Entonces las ecuaciones (5) y (6) se transforman en

$$\Phi_v = 2 \pi I_M [1 - \cos\theta/2 - \sin\theta/(2\theta)] \quad (5 a)$$

$$\Phi_v = \pi I_M (1 - \cos\theta - \sin\theta [\theta/(180^\circ - 2\theta) + \theta/(180^\circ + 2\theta)] - \theta/(180^\circ - 2\theta) + \theta/(180^\circ + 2\theta)) \quad (6 a)$$

Led difuso:

En el caso de una superficie perfectamente difusa, podemos considerar que la intensidad de luz sigue la ley de Lambert $I = I_M \cos \theta$. En este caso, la superficie se verá con el mismo brillo bajo el mismo ángulo. Como se muestra en la figura 6, al inclinarse el plano la intensidad de luz disminuye en función de $\cos \theta$ pero la superficie abarcada con el mismo ángulo de visión aumenta en la misma proporción, por lo que el brillo se mantiene. La luna llena tiene el mismo brillo cerca de los bordes, que están muy inclinados respecto a nosotros, que en el centro. Pues bien, en este caso obtenemos una expresión muy sencilla:

$$\Phi_v = \pi I_M \quad (7)$$

(r-h) / r = $\cos \theta$, el área del casquete es $2 \pi r^2 [1 - \cos\theta]$ y el ángulo abarcado en esteroradianes es el área dividida por r^2

Comparación entre LEDs de distinto ángulo

Si deseamos comparar el flujo total de diferentes LEDs con diagrama de emisión similar, la ecuación sencilla (4) da un error de la misma proporción sea cual sea el ángulo del LED. Por tanto puede usarse esta ecuación para funciones de comparación.

Comparación entre LEDs y lámparas

Como ejemplo deseamos saber cuantos LEDs "piraña" de 3 lm precisamos para sustituir la iluminación producida por una lámpara de 1.2 W. Nótese que en este caso el fabricante nos indica ya el flujo total, si no habría que aplicar la fórmula anterior.

La lámpara de 1.2 W producirá aprox. $1.2 \text{ W} \times 5.7 \text{ lm/W} = 6.84 \text{ lm}$. Harán falta entre 2 y 3 LEDs.

Ahora bien, si debemos producir un color determinado, hay que filtrar la lámpara con lo que la luz de esta bajará y el resultado será más favorable al LED. Si la luz debe ser verde o azul, el resultado es más desfavorable para la lámpara ya que esta radia poca luz de estos colores.

Si deseamos emplear una lámpara como piloto, ¿cuantas candelas produce? Suponemos que los 6.84 lm de la lámpara son en todas direcciones, por lo que la intensidad $6.84 / (4 \pi) \text{ cd} = 0.544 \text{ cd}$. Si hay que filtrar la luz, esta intensidad bajará considerablemente, por ejemplo un filtro rojo intenso bajará a la mitad aproximadamente, un filtro azul intenso bajará la intensidad aún más. Hay que tener en cuenta que si la lámpara está encerrada en un recinto blanco, la intensidad será mayor que la calculada, debido a la luz reflejada. Ver el anexo II.

LEDs orgánicos (OLEDs)

Novedad en desarrollo. Realizados en polímeros conductores, tendrían la ventaja de la regularidad de los paneles electroluminescentes con una mayor duración, la facilidad de aplicación de los LEDs y un bajo coste. Recordemos que los inventores de los plásticos conductores recibieron el premio Nobel el 2002. Se están desarrollando pantallas a base de OLEDs.

La aplicación de los OLEDs no es la de sustituir a los LEDs en los pilotos sino sustituir a los displays y a la iluminación. Ya han aparecido este año teléfonos móviles en Japón que los utilizan.

De momento su principal desventaja actual es la duración de vida corta.

Refracción. Guías de luz.

La luz que incide oblicuamente sobre el plano de una sustancia transparente sufre una desviación y se cumple la ley

$$\sin \theta_1 / \sin \theta_2 = \text{constante} = n. \quad (8)$$

La constante n se llama índice de refracción respecto al vacío de la sustancia transparente (fig. 7). El índice del aire es prácticamente 1. El índice de refracción varía con la longitud de onda y la variación depende del material, por ejemplo es mayor para el vidrio *flint* que para el vidrio *crown* y varía muy poco en el cuarzo. Esta variación es la que causa el arco iris. Como ejemplo el vidrio *flint* tiene $n = 1,632$ en el azul y $n = 1,613$ en el rojo y el vidrio *crown* tiene $n = 1,513$ y $1,504$ en estos colores. Normalmente se indica n en el centro del espectro.

Supongamos un rayo de luz dentro de un medio transparente con $n > 1$ que incide a un plano al aire (fig. 8). Parte del rayo sale al aire refractado, con un ángulo dado por la ley anterior, y parte se refleja. Cuando el ángulo de refracción le correspondería ser 90° , y para todo ángulo mayor que éste, toda la luz se refleja.

El ángulo límite se deduce de (8) haciendo $\theta_1 = 90^\circ$:

$$\theta_L = \arcsin (1/n) \quad (9)$$

Para el metilmetacrilato, $n = 1.49$ y $\theta_L = 42.16^\circ$

Para el policarbonato, $n = 1.59$ y $\theta_L = 39^\circ$

Este fenómeno permite reflejar rayos de luz sin usar espejos. Como el ángulo límite tanto para el cristal como en los dos plásticos citados, es menor que 45° el sistema se ha usado desde hace mucho tiempo en los prismáticos para reflexiones sobre superficies a 45° .

La figura 9 muestra un sistema para girar la luz de un LED 45° , tal como lo hacemos en los sistemas de iluminación de las agujas de los instrumentos. Se observa en la figura que el rayo 1 incide a 45° , pero el rayo 2 incide con un ángulo menor. Es ventajoso pues usar policarbonato en vez de metilmetacrilato.

La fig. 10 muestra el principio de una guía óptica. La luz incide en las paredes con ángulo superior al límite y se refleja totalmente, avanzando por la fibra mediante rebotes de un lado a otro.

Lentes.

Como no siempre es posible encontrar el LED con el ángulo de abertura ideal, puede ser necesario modificar este ángulo usando lentes, convergentes para disminuir el ángulo, divergentes para aumentarlo. A continuación exponemos un breve resumen del cálculo de lentes.

En la fig. 12, la relación entre los ángulos de entrada y salida y la distancia focal de una lente es:

$$\tan \theta_1 / \tan \theta_2 = -f / x \quad (10)$$

Esta fórmula es válida para el foco de luz a la derecha o al izquierda del foco F, a condición de poner el signo apropiado en x. También es válida para las lentes divergentes. Las dioptrías son la inversa de la distancia focal en metros.

Una vez obtenida la distancia focal necesaria, la curvatura de la lente se calcula mediante la expresión:

$$\frac{1}{f} = K \left[(n-1) \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) + \frac{(n-1)^2 \cdot e}{n \cdot R_1 \cdot R_2} \right] \quad (11)$$

Donde R_1 , R_2 son los radios y e el espesor de la lente (fig. 11). El signo de los radios se toma, siguiendo la dirección de la luz, como positivo el que tiene el centro después de la superficie. K es un factor de corrección, que para ángulos de incidencia pequeños respecto al eje puede tomarse como 1, pero que para ángulos grandes no es despreciable. Esto es debido a que la lente ideal no debería ser esférica. Por ejemplo para unos $\pm 30^\circ$, $K = 1.35$.

Para lentes delgadas (diámetro $> 6 e$), y ángulos estrechos puede simplificarse la fórmula:

$$\frac{1}{f} = (n-1) \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) \quad (12)$$

que es la "ecuación del constructor" más conocida.

Procúrese repartir la curvatura de modo que la inflexión de los rayos sea similar en ambas superficies. En el caso de lentes divergentes para LEDs, un resultado aceptable es una lente cóncava-plana. Para un cálculo exacto ver el anexo I.

Dispersión de la luz de un piloto.

Suponemos que ya tenemos iluminada el área de un piloto, sea directamente con un LED (o lámpara) o a través de una lente. A través de la ventana transparente veríamos el LED, o el filamento de la lámpara. Hace falta difundir la luz para dar una apariencia homogénea.

Una solución simple sería un difusor mate que radie en todas direcciones, tal como el difusor lambertiano ideal objeto de la ecuación (7). Supongamos que el área iluminada tenga un lumen. La intensidad en dirección vertical será, según (7) $= 1/\pi$ candelas.

Normalmente no hace falta que la luz del piloto se vea en un ángulo superior a los 45° . De 45° a 90° puede considerarse que la luz es desperdiciada. Un sistema que limite el cono de luz a 45° , con tendría una intensidad vertical, según (4) de $1/2.1$ cd, o sea cerca de un 50% superior. Otro problema del difusor simple es que se notan las irregularidades de la iluminación de los LEDs.

Un método estético y eficaz para dispersar la luz consiste en el uso de microlentes plano-convexas o plano-cóncavas tales como se muestra en la fig. 13, con este sistema, no solamente se consigue un mejor aprovechamiento de la luz, sino que se disimulan las irregularidades del foco luminoso. Una ventaja importante es que se crean multitud de pequeños focos virtuales cuyo brillo es mayor que el brillo medio. Se observa en la figura que el sistema funciona con lentes convexas o cóncavas: en este caso los focos son virtuales (como si existieran detrás de la lente).

Paneles electroluminescentes

La electroluminescencia tiene ya unos 40 años de antigüedad. Cuando se empezó a comercializar, se creyó que iba a sustituir todos los otros tipos de iluminación (los techos se recubrirían con láminas electroluminescentes). Sin embargo, a pesar de los perfeccionamientos aportados no se ha conseguido una relación intensidad/duración a un precio razonable para su uso como lámpara de uso general.

Una sustancia fosforescente (Sulfuro de Zinc) en capa delgada, es excitada por un campo eléctrico. Al cesar el campo, la energía acumulada en los átomos se libera en forma de luz. Por principio pues hay que usar una fuente de tensión alterna (unos centenares de Hz) y una tensión bastante elevada (más de 100 V). Esto significa un coste extra de la electrónica necesaria para obtener esta alta tensión alterna a partir de la tensión de la batería. Como se intuye, a más frecuencia y a más tensión, mayor emisión de luz, pero la vida útil disminuye. Existen circuitos integrados especiales que incorporan casi todo el convertidor.

La ventaja principal de estos paneles es la uniformidad de luz. Pueden ser muy delgados (hasta 0.1 mm) y flexibles. El color básico, con el que se consigue la máxima luminosidad, es el verde-azulado. El espectro es mucho más amplio que el de los LEDs, y con diferente composición del fósforo pueden conseguirse colores entre unos 520 a 620 nm, como azul-verdoso, amarillo-verde, amarillo, naranja y el blanco. Al ser el espectro amplio puede filtrarse para conseguir azul o rojo, pero con un rendimiento bajo.

El brillo inicial es del orden de 15 a 50 cd/m² lo que lo hace inviable para aplicaciones a pleno sol pero muy indicado para retroiluminar LCDs o paneles de instrumentos por la noche. Puede conseguirse brillos mayores, pero en detrimento de la

duración. Puede considerarse que al cabo de unas 2000 horas el brillo (partiendo de nos 50 cd/m²) se ha reducido al 60%. La duración de vida es aproximadamente logarítmica y depende mucho de la tensión y frecuencia aplicadas, es decir podemos decidir entre mucha luz y vida corta (50% a las 1000 horas) o luz débil y larga vida (10000 horas).

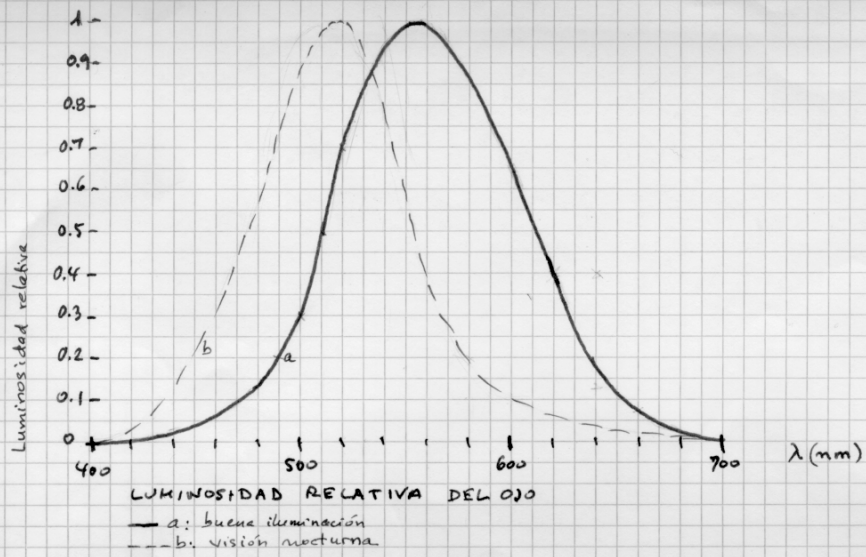
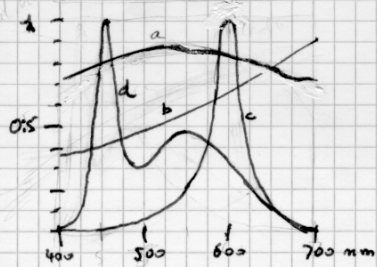


Fig. 1



a: luz solar
b: bombilla
c: LED manija
d: LED blanco

Fig. 4

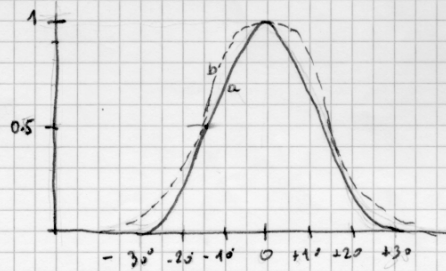
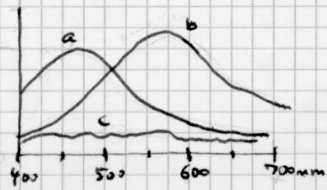
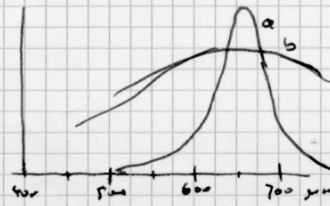


Fig. 5



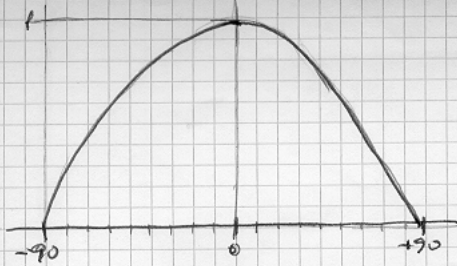
a: azul
b: amarillo
c: gris

Fig. 2



a: rojo
b: rosa

Fig. 3



Distribution of the Lambert

Fig. 6

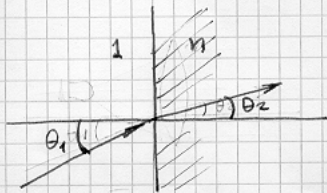
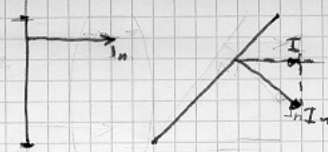


Fig. 7

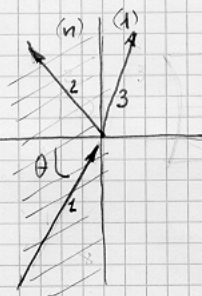


Fig. 8

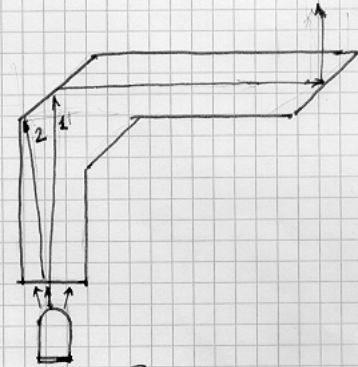


Fig. 9

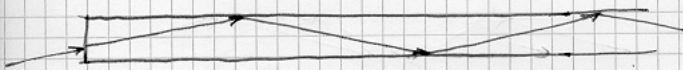


Fig. 10

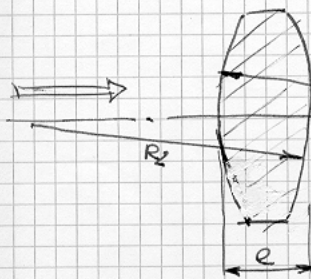


Fig. 11

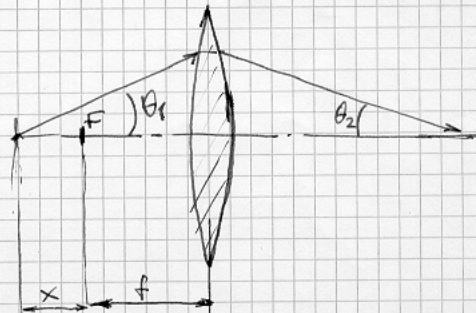


Fig. 12

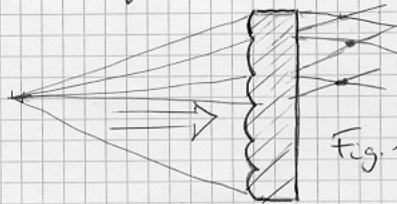
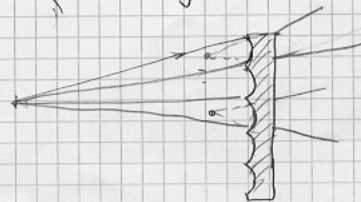


Fig. 13



Anexo I

Cálculo de la trayectoria exacta de un rayo luminoso

Como se ha indicado en el cálculo de las lentes, las ecuaciones clásicas (llamadas ecuaciones del constructor (11) y (12) son aproximadas ya que de hecho una lente esférica no se comporta como una lente ideal. En óptica de calidad se usan combinaciones de lentes y lentes no esféricas.

En nuestra aplicación para pilotos luminosos no nos podemos permitir tanto lujo pero en cambio los radios suelen ser muy grandes respecto al diámetro y los ángulos de incidencia también son elevados. Si se aplica (11), habría que tener una tabla de factores de corrección K para cada caso. Es preferible calcular la trayectoria exacta del rayo luminoso extremo aplicando la simple relación fundamental (8). Tal como nos encontramos al calcular el flujo total de los LEDs, no se encuentran (o al menos no he podido encontrar) estos cálculos en los libros de física habituales por lo que no nos queda más remedio que deducirlo.

Haremos el caso que más nos interesa, una lente esférica divergente, plano cóncava, para un LED, como se muestra en la figura 14.

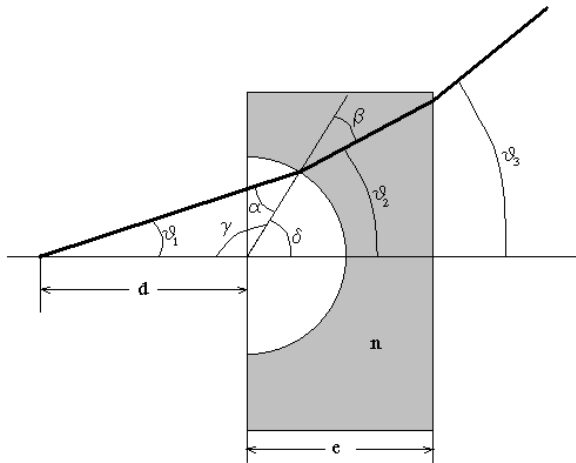


Fig. 14

Teorema de los senos de un triángulo:

$$R / \sin\theta_1 = d / \sin\alpha \quad \text{de donde:} \quad \sin\alpha = d / R \sin\theta_1 \quad (13)$$

Aplicamos la relación (11):

$$\sin\beta = 1/n \sin\alpha = d/(n R) \sin\theta_1 \quad (14)$$

$$\gamma = 180^\circ - \theta_1 - \alpha; \quad \delta = 180^\circ - \gamma = \theta_1 + \alpha \quad (15)$$

$$\theta_2 = \delta - \beta \quad (16)$$

y sustituyendo β de (13) por su valor en (12) y el de δ por (13):

$$\theta_2 = \theta_1 + \arcsin\left(\frac{d}{R} \sin \theta_1\right) - \arcsin\left(\frac{d}{n \cdot R} \sin \theta_1\right) \quad (17)$$

$$\theta_3 = \arcsin(n \cdot \sin \theta_2) \quad (18)$$

Se ve que la desviación depende de la relación d/R , no del valor absoluto de R .

Normalmente lo que precisamos es deducir R para conseguir la desviación requerida. Por desgracia, se obtiene una ecuación trascendente. Habrá pues que hacer un proceso iterativo probando distintos valores de R en (17).

Hay más complicación todavía ya que el grueso e también interviene en el diámetro final del haz. Se trata pues de un proceso iterativo para el que resulta necesario el uso de una máquina de calcular programable o un programa de ordenador.

Ib: Lente convexo-plana.

Otro ejemplo cuyo resultado se obtiene por un método similar:

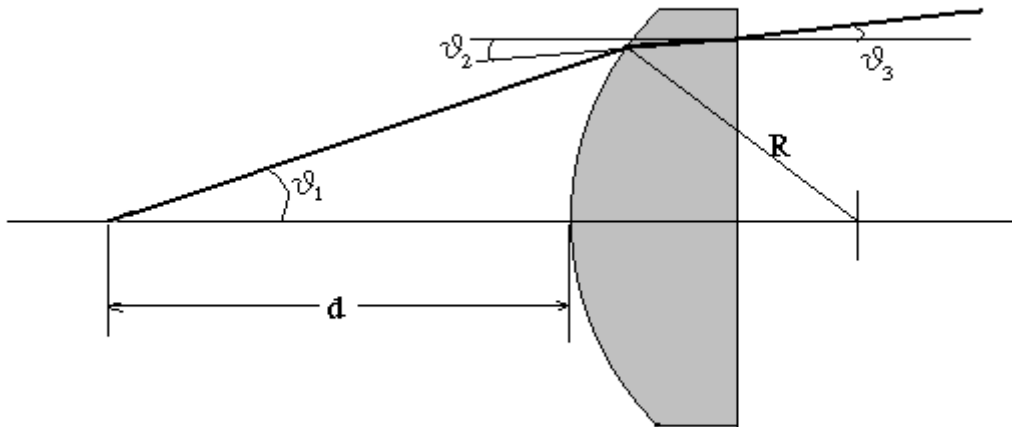


Fig. 15

$$\theta_2 = \theta_1 + \arcsin\left(\frac{d}{R} \sin \theta_1\right) - \arcsin\left(\frac{d}{n \cdot R} \sin \theta_1\right) ** \quad (18)$$

Anexo II

Ejemplo de cálculo de la intensidad de un LED piloto a partir de la iluminación que produce sobre una superficie.

Se desea un piloto luminoso de 14 mm de diámetro que produzca una iluminación de 2 lux a 200 mm de distancia. El LED está situado con su base a 17 mm detrás del difusor.

Aplicando (2a):

$$I = B \cdot S = E \cdot d^2 = 2 \cdot 0.2^2 = 80 \text{ mcd}; \quad S = \pi \cdot [(14/2) \cdot 10^{-3}]^2; \quad B = 520 \text{ cd/m}^2$$

Parece que un LED de 80 mcd fuera suficiente y esto sería cierto si no hubiera el difusor por medio que dispersa la luz. Supondremos el caso más desfavorable de una superficie completamente difusa (lambertiana) y el flujo por unidad de superficie L es

$L = \pi B$; el flujo total es $L \cdot S$ o sea que obtenemos de nuevo (7)

$$\Phi_v = \pi I = \pi \cdot 0.080 = 0.251 \text{ (lm)}$$

El ángulo de visión del LED será $\arctan(7/17) = 22^\circ$. El LED más aproximado que encontramos en el mercado es de $\pm 25^\circ$. El LED seleccionado tiene una distribución aprox. acampanada por lo que aplicamos (6 a) con $\theta = 22^\circ$:

$$I_{LED} = \Phi_v / \dots = 0.251/0.335 \text{ cd} = 750 \text{ mcd}$$

Ahora bien si la mayor parte de la luz que sobrepasa los 22° se aprovecha, por reflexión en las paredes del tubo que envuelve el LED, se puede aplicar (6):

$$I_{LED} = 0.251/0.538 = 467 \text{ mcd}$$

Si aplicamos la ecuación simple (4) obtenemos 549 mcd, lo que nos indica que podemos emplear muchas veces esta ecuación sin mucho error ya de todos modos el cálculo es sólo groseramente aproximado ya que haría falta compensar las pérdidas por reflexiones y transmisión y tener en cuenta las características reales del difractor.

Si en vez de una superficie perfectamente difusa aplicamos microlentes que no difracten a más de 45° , aplicando (4):

$$\Phi_v = 2 \pi I (1 - \cos 45^\circ) = 147 \text{ mlm}$$