



NOTA TÉCNICA 1/2004 (rev.01)

RECORDATORIO SOBRE ELEMENTOS BÁSICOS RELACIONADOS CON EL ALCANCE DE LAS SEÑALES LUMINOSAS

Una ayuda a la navegación marítima visual siempre tiene dos tipos de señales: la señal diurna y la señal nocturna, ambas igualmente importantes desde el punto de vista teórico, aunque, por tener menos referencias visible disponible en el entorno, para el navegante la señal nocturna (señal luminosa) es más crítica.

Para que un observador identifique una luz es necesario que éste se encuentre dentro del cono de luz generado por ella y que la ritmicidad pueda ser claramente percibida. Los parámetros básicos para ello son:

- La divergencia vertical (además del ángulo de oscilación del flotador, en caso de boyas, la sensibilidad de la enfilación en estos caso y el ángulo de incertidumbre en el caso de las luces de sectores)
- El retardo del encendido y duración del destello
- El alcance luminoso

En todos los casos el navegante dirá que **no ve** la luz. Antes de hacer cualquier valoración sobre el asunto y tomar acciones deben analizarse las posibles causas de ello. Estas pueden ser propias del equipamiento, de su instalación y mantenimiento, de su configuración, del propio observador y de las condiciones atmosféricas.

1. Divergencia Vertical

La divergencia vertical (δ_v) es el ángulo de la sección vertical del cono de luz que genera la fuente luminosa. La divergencia horizontal (δ_h) es el ángulo de la sección horizontal del mismo cono anterior.

Si bien la divergencia vertical condiciona la distancia mínima de utilización de la ayuda, la divergencia horizontal está relacionada con el tiempo de retención de la luz en el ojo del observador. Es decir, una mayor divergencia horizontal mejora la percepción de la luz por el observador.



El cálculo de la divergencia es:

$$\delta_v = b / f$$

$$\delta_h = a / f$$

“a” es la anchura de la fuente luminosa (dimensión horizontal)

“b” es la altura de la fuente luminosa (dimensión vertical)

“f” es la distancia focal de la óptica (en ópticas de horizonte es la mitad de su diámetro en el plano del eje óptico de la misma)

Lo mejor es obtener esta información a partir de datos experimentales de parejas estándar de lámpara y óptica o para la baliza de LED's completa. En cualquier caso, el fabricante deberá facilitar este dato para algunas combinaciones estándar.

Debe tenerse en cuenta que este valor de la divergencia corresponde al ángulo completo del cono de luz, pero solamente es de interés la parte hacia el mar, es decir la mitad de ese ángulo. Esto hace que su valor sea, normalmente, de unos pocos grados, por lo que es muy importante asegurarse de que el plano del eje óptico del sistema luminoso esté perfectamente horizontal.

Un error en la horizontalidad del plano del eje óptico puede provocar que la luz no sea identificada por el observador a la distancia esperada, al poder quedar éste fuera del cono de luz.

$$D = H / \operatorname{tg} (\delta_v/2)$$

en donde D es la distancia mínima a la que debe usarse la señal luminosa y H es la altura del eje óptico respecto del nivel del mar; ambos, D y H expresados en las mismas unidades, metros.

Además del aspecto anterior, un caso muy especial ocurre cuando la señal luminosa se instala sobre una boya o elemento flotante. Este tendrá una determinada oscilación que hará que el plano del eje óptico del sistema oscile, por lo que producirá grandes dificultades de identificación por parte del observador.

Para que la señal pueda ser utilizada es imprescindible que el ángulo de oscilación sea menor que el ángulo de divergencia vertical, de no ser así la luz no podrá ser identificada por el observador como una señal marítima.

En el caso de enfilaciones luminosas, además de la propia divergencia vertical y la imprescindible necesidad de que el eje óptico esté totalmente horizontal, es necesario que el parámetro conocido como la “sensibilidad lateral” de la misma debe ser superior al valor 1'5. Una enfilación con una sensibilidad

lateral inferior al valor indicado puede hacer que el navegante no la identifique como tal.

Por último, en las luces de sectores otro elemento a considerar es el ángulo de incertidumbre, que al menos debe determinarse geométricamente y siempre debe ser verificado en la mar, ya que normalmente va ligado a situaciones críticas para la navegación. Las balizas de LED's general, en instalaciones convencionales, ángulos de indeterminación algo elevados, de tal manera que si el sector es estrecho, podría no ser utilizable este tipo de balizas.

Es imprescindible conocer:

- Divergencia vertical del sistema óptico
- Ángulo de error del plano del eje óptico del sistema respecto de la horizontal.
- Ángulo de oscilación de las boyas.
- Sensibilidad lateral de las enfilaciones.
- El ángulo de incertidumbre en las luces de sectores.

2. El retardo del encendido y la duración del destello

Tanto el alcance luminoso como la identificación de los destellos están condicionados por la duración del destello y, en los casos de lámparas eléctricas de incandescencia, del retardo del encendido.

El retardo del encendido/apagado de la luz en cada destello es función de la intensidad de la corriente que pasa por la lámpara de incandescencia, de tal manera que todos y cada uno de los periodos de oscuridad deben ser superiores al valor correspondiente a la recta del 90% de la gráfica de la página 124 de la publicación "Normas Técnicas sobre Obras e Instalaciones de Ayudas a la Navegación-1986".

En caso contrario el observador no identificará los destellos individuales y por lo tanto no identificará la señal marítima.

Por otro lado, la duración del destello afecta al valor de la intensidad eficaz, de tal manera que para la misma fuente luminosa, mayores periodos de luz generan mayor intensidad eficaz y, por lo tanto, mayor alcance luminoso.

El efecto anterior del retardo del encendido/apagado se debe tener en cuenta para considerar la duración real del destello y utilizar el valor corregido (usar el valor de la recta del 50% de la gráfica mencionada anteriormente) de dicha duración en el cálculo de la intensidad eficaz. Periodos más cortos producen alcances más cortos.

El efecto del retardo en el encendido/apagado no existe en el caso de la tecnología de LED's, como tampoco ocurría en el caso de los destelladores de gas.

La intensidad de la corriente de filamento tiene importancia para el efecto comentado, pero también tiene importancia para el alcance luminoso, al estar directamente relacionada con la intensidad luminosa. Esta intensidad de corriente de filamento es función de la tensión de alimentación (se supone que la resistencia eléctrica del circuito no varía), por lo que la regulación de la tensión de alimentación es otro factor que puede afectar al alcance luminoso.

3. Alcance luminoso

El alcance luminoso de una señal luminosa es la distancia a la que un observador percibe dicha señal. Esta distancia depende, básicamente, de las alturas relativas entre la fuente luminosa y el ojo del observador, de la intensidad luminosa de dicha fuente y de las condiciones atmosféricas entre la fuente luminosa y el observador.

Los puntos anteriores, divergencia vertical, divergencia horizontal, retardo del encendido/apagado y duración del destello, son factores limitativos del alcance luminoso.

La línea de visión directa entre la fuente luminosa y el observador puede estar limitada por la curvatura de la Tierra. Así aparece el concepto de alcance geográfico, que es función de la altura de la fuente luminosa y de la altura del ojo del observador, en ambos casos respecto del nivel medio del mar. Por ello, la distancia máxima a la que puede verse una señal luminosa es su alcance geográfico.

En todos los casos, el alcance geográfico debe ser superior al alcance luminoso.

Ahora consideraremos el efecto de la intensidad luminosa. La intensidad luminosa es la parte del flujo luminoso en una determinada dirección, su unidad es la "candela, cd" y es equivalente a lúmen/esterorradian. Los valores de intensidad, a nuestros efectos, siempre los consideraremos en las direcciones del plano del eje óptico y en particular en la dirección entre el foco luminoso y el observador. En principio, se considerara que el sistema óptico es isótropo y la intensidad es la misma en todas las direcciones del plano del eje óptico.

Tendremos que considerar tres tipos de intensidad:

- Intensidad estacionaria
- Intensidad eficaz
- Intensidad de cálculo



El paso de una a otra se realiza por factores que siempre son menores que la unidad, es decir para una intensidad estacionaria dada, la intensidad eficaz es menor y a su vez la intensidad de cálculo es menor.

El alcance luminoso se calcula a través de la fórmula de Allard:

$$E_0 * D^2 = I_c * c^D$$

En donde E_0 es el umbral de percepción de la luz, expresado en Lux (iluminancia o nivel de iluminación), D es el alcance luminoso expresado en metros, I_c es la intensidad de cálculo, expresada en candelas y " c " es el coeficiente de transparencia atmosférica, cuya relación con el valor de transmisibilidad atmosférica " T " es: $T = c^{1852}$.

Esta función se presenta en ábacos que están diseñados para la condición de fondo oscuro, por lo que el umbral de percepción toma el valor $E_0 = 0'2 \cdot 10^{-6}$ Lux, Este ábaco es suficientemente conocido y está en la publicación "Normas Técnicas sobre Obras e Instalaciones de Ayudas a la Navegación- 1986". Este ábaco relaciona la **intensidad de cálculo** (I_c , en candelas) con el **alcance luminoso** (D , en millas náuticas) en función de la transmisibilidad atmosférica (T).

Para un valor de visibilidad atmosférica de 10 millas náuticas, el valor de la transmisibilidad atmosférica toma el valor de $T=0'74$ y el alcance resultante se denomina "Alcance Nominal", nocturno y para condición de fondo oscuro ($E_0=0'2 \cdot 10^{-6}$ Lux)

A la vista de todo lo anterior, la visibilidad atmosférica y la condición del fondo son dos elementos muy importantes a considerar a los efectos del alcance luminoso de una señal marítima.

La intensidad de cálculo se obtiene como producto de la intensidad eficaz y los siguientes factores:

- Pérdida de intensidad a través del acristalamiento: $F_1 = 0'85$ (sólo en el caso en que exista una linterna exterior al propio sistema óptico: fuente de luz más óptica)
- Pérdida de intensidad por condiciones del servicio: $F_2 = 0'75$. Este valor es para un estado medio de limpieza y degradación, pero podría ajustarse a otro valor, si se dispone de información para ello. En los casos de balizas LED's debería evaluarse este factor.
- Pérdida por efecto del filtro de color: $F_{3R} = 0'20$ (Rojo) ,, $F_{3V} = 0'30$ (Verde) ,, $F_{3A} = 0'6$ (Ambar). Estos valores son aproximados, ya que cada el valor correcto debe ser proporcionado por el fabricante del filtro y debe proporcionarse en función de la temperatura de color de la fuente luminosa. En el caso de las balizas de LED's, no existe filtro de color, por lo que este factor F_3 tomará el valor 1.

- Pérdida por efecto de la luminancia del fondo: $F_4 = 1$ para fondo oscuro y $F_4 = 0'20$ para luminancia de fondo muy alta. El valor F_4 tomará valores intermedios según la luminancia de fondo respecto de la dirección visual fuente-observador.

Así la intensidad de cálculo: $I_c = F_1 * F_2 * F_3 * F_4 * I_e$, en donde I_e es la intensidad eficaz.

La intensidad eficaz está relacionada con la intensidad estacionaria (propia del sistema luminoso) y la duración del destello, de manera que se aumenta su valor, aumentando la duración del destello y/o aumentando la intensidad estacionaria. Ambos parámetros tendrán, en algunas ocasiones, la limitación para optimizar el consumo eléctrico de la instalación.

El cálculo de la intensidad eficaz se hará a través de la expresión correspondiente al método III Blondel-Rey-Douglas, que es equivalente al método I de Schmidt-Clausen con factor de forma igual a la unidad ($F=1$) para los casos de balizas de LED's:

$$I_e = I_o \frac{t}{t + a}$$
 en donde "t" es la duración del destello (supuestamente todos iguales, en caso contrario deberá usarse la situación más desfavorable, es decir, el destello más corto) y "a" toma el valor de 0'2 (constante de Blondel-Rey, ligada al umbral de retención de las imágenes en la retina). I_o es la intensidad pico del destello, que será equivalente a la intensidad estacionaria o propia del sistema luminoso.

Debe tenerse en cuenta el método de cálculo recomendado por la IALA es el método I (Schmit-Clausen), pero requiere ensayos de laboratorio para establecer el factor de forma (F) para cada conjunto de óptica y lámpara. El método II (Allard) no tiene un uso generalizado y el método III (Blondel-Rey-Douglas) es el recomendado en la Normas Técnicas sobre Obras e Instalaciones de Ayudas a la Navegación (España), por resultar de más fácil aplicación, siendo también más conservador. Algunos fabricantes indican la intensidad eficaz de sus sistemas ópticos, pero debe conocerse el método de cálculo empleado.

En los casos de las balizas de LED's debería estudiarse, posiblemente, una nueva expresión para el cálculo de la intensidad eficaz, teniendo en cuenta la forma del destello de este tipo de balizas. No obstante, mientras tanto se seguirán aplicando los métodos indicados (I, con $F=1$; III)

Ahora la intensidad estacionaria es la que genera el propio sistema óptico, considerado como fuente luminosa más óptica. Aunque se va a presentar una forma de cálculo, este valor debe obtenerse por resultados de ensayos de laboratorio y, en los casos de balizas LED's o sistemas encapsulados y herméticos en los que la fuente luminosa y la óptica forman un conjunto, debe ser facilitado por el fabricante.

El valor aproximado de la Intensidad estacionaria obtenido mediante cálculo es: $I_o = K * L * b * h$, en donde

$K = 0'89 \cos \alpha$

L = Luminancia o brillo de la fuente luminosa (cd/cm^2)

B = altura o dimensión vertical de fuente luminosa (cm)

h = altura (proyección vertical) del dióptrico (cm)

α = ángulo entre el eje óptico y el elemento dióptrico más alejado

Habitualmente, los fabricantes de lámparas facilitan el flujo luminoso expresado en lúmenes que es necesario pasar a cd/cm^2 , ello dependerá del tipo de distribución del flujo (esférica, toroide, etc.). Para simplificar el procedimiento, se considerará distribución esférica y por lo tanto, para una lámpara de dimensiones b , a : en donde “ a ” es el ancho o proyección horizontal de la fuente luminosa (filamento) y “ b ” la dimensión vertical de dicha fuente y el flujo total es ϕ (lúmenes):

$$L = \frac{\phi}{4\pi ab}$$

El procedimiento de cálculo para determinar la intensidad estacionaria necesaria para un conjunto óptico, para un determinado alcance nominal, es:

- 1) Se entra en el ábaco alcance luminoso-intensidad de cálculo, de aplicación de la fórmula de Allard. Se obtiene el valor de I_c para el valor de $T = 0'74$.
- 2) Se calcula el valor de la intensidad eficaz, I_e , aplicando la expresión

$$I_e = I_c / (F_1 * F_2 * F_3 * F_4)$$
- 3) Se calcula el valor de la intensidad estacionaria, I_o , aplicando la expresión:

$$I_o = I_e \frac{t + a}{t}$$

El valor de I_o (**cd**) es el valor que debe proporcionar el sistema luminoso (**fuente luminosa más óptica**) y debe garantizarse por el suministrador del mismo o calcularse en función de la lámpara y óptica a emplear.

Para terminar se expone un ejemplo en el que se indica para un caso habitual, una baliza de color verde para un alcance nominal de 5 millas náuticas, cual debería ser la intensidad luminosa del sistema óptico necesario para cumplir esos requisitos



Ejemplo:

Alcance nominal = 5 millas náuticas

Color verde; alta luminancia de fondo; duración del destello 0'5 segundos (se desprecia el retardo del encendido/apagado)

$I_c = 80 \text{ cd}$ (sobre el ábaco de la fórmula de Allard)

$F_1 = 1$, no hay linterna exterior (baliza convencional)

$F_2 = 0'75$ (limpieza y degradación medios)

$F_{3V} = 0'30$ (filtro color verde; no LED's)

$F_4 = 0'2$ (alta luminancia de fondo)

$I_e = 80 / 0'75 \cdot 0'30 \cdot 0'2 = 1.778 \text{ cd}$ (533 cd, estimado en el caso de LED's)

$I_o = 1778 (0'5 + 0'2) / 0'5 = 2.489 \text{ cd}$. (746 cd, estimado en caso de LED's)

Es decir, necesitaremos una baliza (lámpara más óptica) cuya intensidad estacionaria debe ser de 2.489 cd. (746 cd estimado en caso de LED's) para tener un alcance nominal de 5 millas náuticas con una baliza de color verde, en un entorno con alta luminancia de fondo y con destellos de 0'5 segundos.

Por último, aunque se hayan cumplido todas las condiciones de cálculo, el alcance luminoso que percibirá el navegante dependerá de la visibilidad atmosférica de la zona entre él y la baliza, ya que toda la instalación responde a la condición de 10 millas náuticas de visibilidad atmosférica.

Por lo tanto, si la visibilidad atmosférica es, normalmente, inferior a ese valor, el navegante no percibirá la señal luminosa a la distancia indicada. Así, el navegante debe conocer la visibilidad atmosférica en su zona y en ese momento, y hacer la corrección necesaria para saber a que distancia será visible la luz cuyo alcance nominal conoce.

La visibilidad atmosférica puede estimarse intentando ver puntos conocidos del entorno y cuya distancia conoce. Así, si la visibilidad atmosférica fuese de 7 millas náuticas, nuestra instalación de ejemplo, con un perfecto alcance nominal de 5 millas náuticas, solo será visible a 4 millas náuticas.

Así pues, el valor real del límite de servicio de una señal luminosa debe ir acompañado del valor de la visibilidad atmosférica en la zona y la dirección (demora) con se ve la baliza desde el observador, ya que, muy probablemente, la visibilidad atmosférica varía según la dirección entre el observador y la baliza.

Febrero, 2004