

Aumento de cobertura de faros y balizas cerca de la costa

Increased lighting of lighthouses and beacons near the coast

Rafael Soler Gayá. Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
solergaya@hotmail.com

Resumen: Se trata de un estudio realizado para la Autoridad Portuaria de Baleares –con vistas a su publicación– cuyo objeto es el de dimensionar unos dioptrios complementarios de los paneles giratorios de ópticas de faros o balizas cuyo plano focal se encuentre relativamente elevado o su fuente de luz sea más bien reducida, al objeto de sustraer, si es posible, una parte del flujo luminoso del haz principal para dedicarlo al aumento de cobertura en las inmediaciones frecuentadas por barcos de pesca de bajura o de recreo.

Palabras Clave: Mayor cobertura en el mar litoral; Mantenimiento del alcance requerido para la navegación comercial; Utilización de la actual instalación óptico-luminosa; Aplicación de prismas dióptricos complementarios; Divergencia vertical; Detracción de flujo del haz principal; Nuevos haces secundarios yuxtapuestos

Abstract: This article describes a study carried out for the Balearic Islands Port Authority with the object of installing supplementary dioptrics on the revolving lenses of lighthouses or beacons with relatively high focal planes or where the source of light was somewhat reduced. This was conducted with the aim of rerouting part of the luminous flow of the main beam, where possible, to use this to increase lighting in the immediate vicinity to aid fishing vessels or pleasure craft.

Keywords: Greater lighting of coastal area; Maintenance of range required for commercial shipping; Use of current optic-luminous installations; Application of supplementary dioptric prisms; Vertical divergence; Flow detracting of the main beam; New juxtaposed secondary beams

En el estudio publicado en la Revista de Obras Públicas de diciembre de 2007 titulado "Visibilidad de los faros y balizas en sus inmediaciones" se expuso el inconveniente que ofrecen por su pérdida de cobertura algunos faros y balizas, no ha mucho solarizados, para su uso en la navegación de embarcaciones menores y, en particular, para las de recreo. Se contempló como eventual modo de resolver este inconveniente la sustitución o elevación de las lámparas aportando unas tablas para tantear posibles soluciones.

Pero también se apuntó la posibilidad de complementar la instalación óptico-luminosa existente, si va sobrada de intensidad para conseguir el alcance requerido para la señal, y dedicar el remanente, o parte de él, a un haz luminoso complementario que "barrá" el mar litoral en las inmediaciones de la señal. Cabe obviamente también actuar conjuntamente en

los tres sentidos: cambiar de lámpara, cambiar la óptica y complementar la instalación.

El presente estudio se dedica a esta tercera posibilidad en base a la utilización del mismo sistema óptico dióptrico o catadióptrico giratorio direccional (*pencil beam*) del faro, aún cuando también es de aplicación a las ópticas de horizonte (*fan beam*). Se trata, en todo caso de acoplar sobre el panel existente uno o más prismas dióptricos que desvíen parte del haz luminoso hacia las inmediaciones del faro.

Deducción del ángulo de los prismas

Sea (ver figura 1) GHIJ la sección trapezoidal del prisma a adicionar sobre el dióptrio LM de la instalación en servicio (es igualmente válido sobre un catadióptrio) y A el punto donde incide el rayo luminoso del

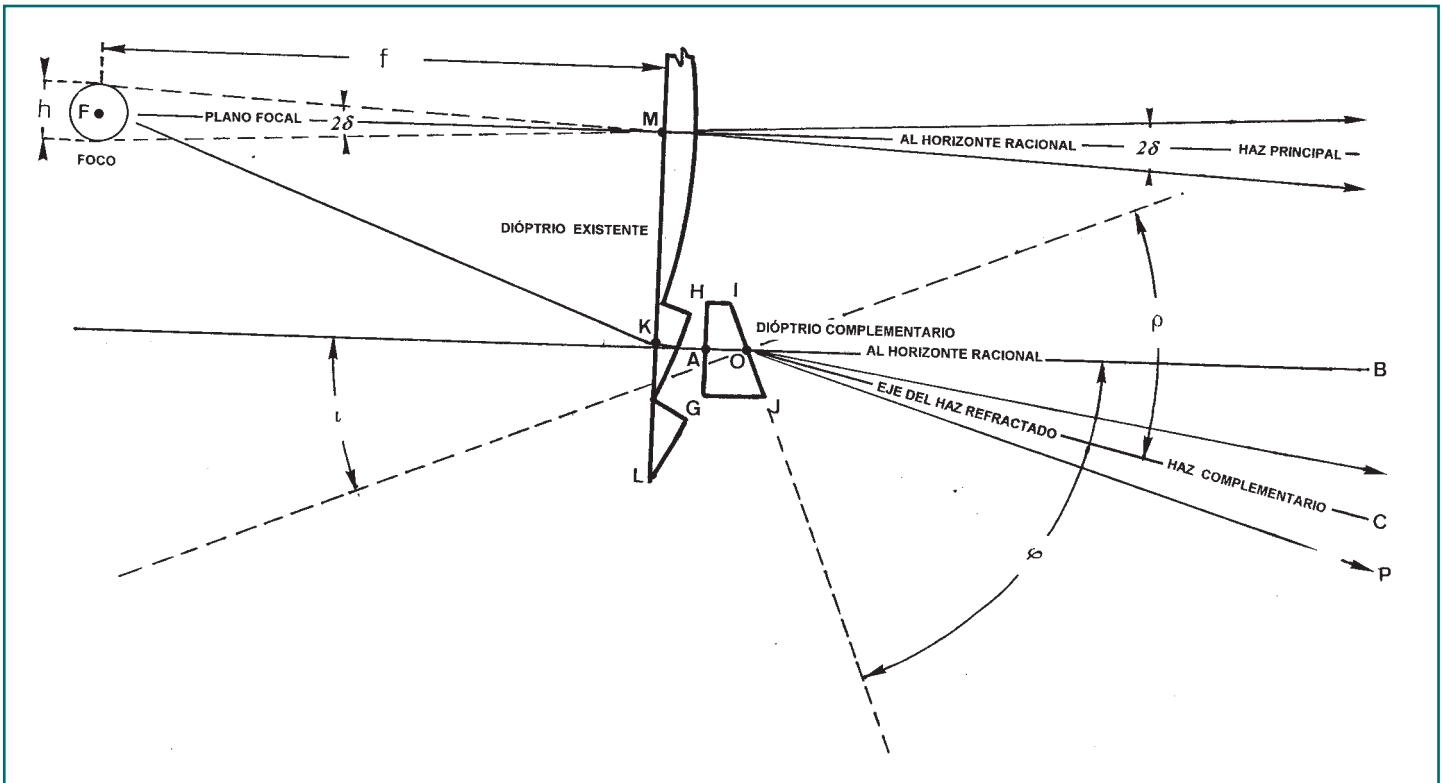


Fig. 1.

centro de un haz elemental tras recorrer la óptica existente, el cual, por construcción, tanto si es dióptrica o catadióptrica, emerge horizontal; este rayo emergente AB será el central del haz elemental emergente correspondiente al punto A que, por las razones que se explican en el epígrafe III.1.7 de las "Normas Técnicas sobre Obras e Instalaciones de Ayuda a la Navegación" publicadas en 1986 por el Centro de Publicaciones del MOPU, tiene en el dióptrico una divergencia sensiblemente constante a lo largo del radio LM del dióptrico; si el prisma se aplicara frente a un catadióptrico la divergencia disminuiría en función de la distancia focal f y del ángulo KFM.

Al incidir el citado rayo FK en A, en la cara vertical GH del prisma, lo hará ortogonalmente por lo que no se refractará el rayo AO emergente de la óptica (dióptrico en la figura), el cual, atravesando el prisma, alcanzará el punto O de su cara inclinada IJ, formando un ángulo i con su normal y se refractará después en OC con el ángulo r con dicha normal; si φ es el ángulo IJG del prisma evidentemente es $i = 90^\circ - \varphi$.

Se tendrá pues:

$$BOC = \rho - i \quad \text{sen } \rho = n \text{ sen } i$$

$n = \text{índice de refracción del prisma}$

$$k = \text{sen } BOC = \text{sen } (\rho - i) = \text{sen } \rho \text{ cos } i - \text{cos } \rho \text{ sen } i =$$

$$= n \text{ sen } i \text{ cos } i - (1 - n^2 \text{ sen}^2 i)^{1/2} \text{ sen } i = n \text{ sen } \varphi \text{ cos } \varphi -$$

$$(1 - n^2 \text{ cos}^2 \varphi)^{1/2} \text{ cos } \varphi$$

y operando:

$$((1 - n^2)^2 + 4k^2 n^2) \text{ cos}^4 \varphi - 2k^2 (1 + n^2) \text{ cos}^2 \varphi + k^4 = 0$$

ecuación de 2º grado en $\text{cos}^2 \varphi$ que se resuelve en la fórmula operativa:

$$\text{cos } \varphi = k ((1+n^2+2n(1-k^2)^{1/2}) / ((1-n^2)^2 + 4k^2 n^2))^{1/2}$$

que permite conocer cual ha de ser el ángulo j del prisma para que el rayo emergente final refractado OC coincida con el OD (ver figura 2) definido por el ángulo $\gamma = BOD - \delta$ correspondiente a la mínima cobertura pretendida representada por el parámetro k . En la tabla recogida más adelante se exponen valores de φ en función de n y de k que permiten fáciles tanteos por interpolación.

Número de prismas a disponer

Los prismas a disponer, de diferentes ángulos φ , serán los necesarios para cubrir, con los haces emergentes de cada prisma, debidamente yuxtapuestos, el ángulo BOD del límite interior de la cobertura (ver figu-

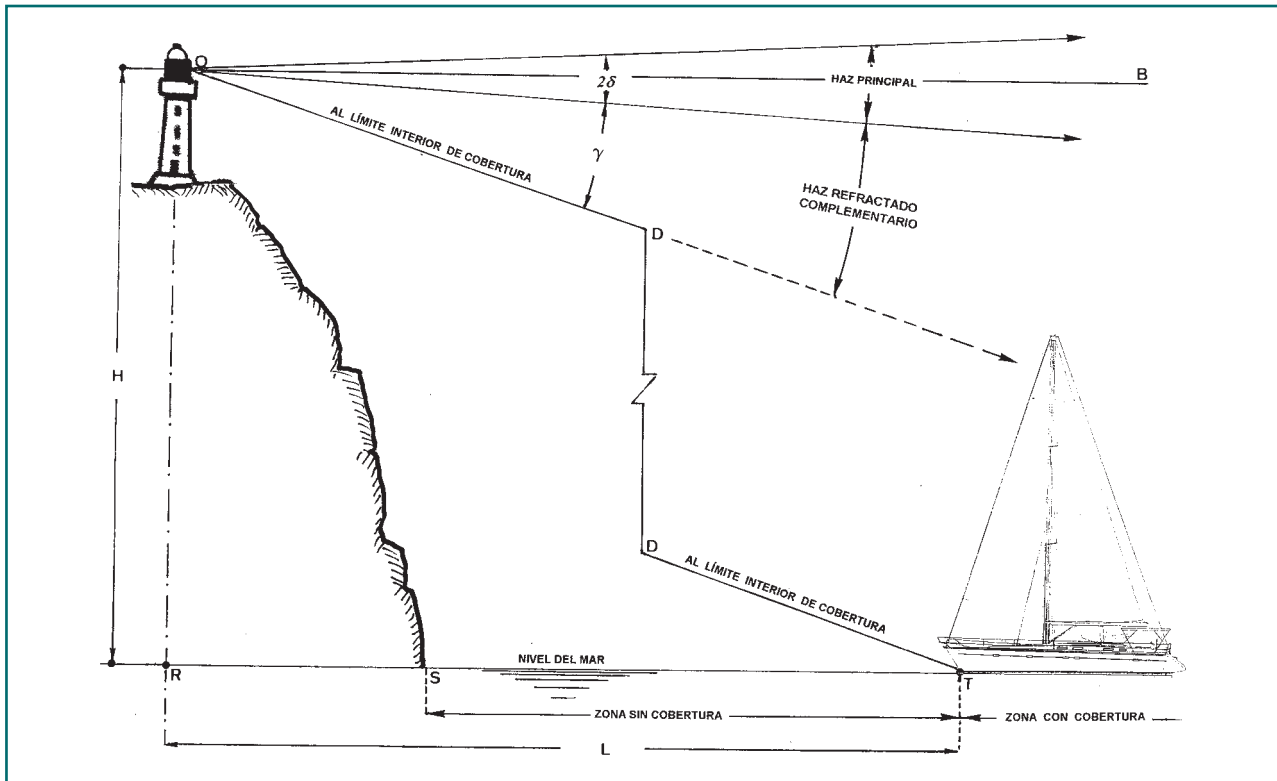


Fig. 2.

ra 2) y obviamente dependerán de la divergencia vertical 2δ del haz del faro. Una estimación primaria del número necesario de prismas diferentes puede consistir en dividir el ángulo γ por el de la divergencia:

$$N = \gamma / (2\delta)$$

N = número de prismas, siendo:

$$\text{tg}(2\delta) = h/f$$

si el prisma se enfrenta a un dióptrio o bien

$$\text{tg}(2\delta) = (h/f) \cos KFM$$

si el prisma se enfrenta a un catadióptrio

cada uno con el ángulo $BOC = \gamma + \delta = m(2\delta)$
con m = ordinal hasta el último de N .

El ángulo γ resulta del radio L del límite interior de la cobertura pretendida (ver figura 2) y de la altura H del faro, restando la semidivergencia vertical δ del haz principal. Debe tenerse en cuenta que si la cobertura se establece en base al accidente geográfico más

saliente de la costa para el valor L ha de considerarse ST y no RT sumando RS al radio de la cobertura pretendida.

Pero este cómputo, para valores altos de N , resulta conservador pues, correspondiendo 2δ a $i = 0^\circ$ con $\varphi = 90^\circ$, al disminuir φ y aumentar i , el ángulo de emergencia ρ crece más rápidamente que el de incidencia i . En efecto, si a un incremento Δi corresponde un $\Delta \rho$, como $n \text{sen} i = \text{sen} \rho$

diferenciando se tiene:

$$n \cos i (\Delta i) = \cos \rho (\Delta \rho)$$

$$\Delta \rho / \Delta i = n \cos i / \cos \rho$$

y en función de $\varphi = 90^\circ - i$:

$$\Delta \rho / \Delta i = n \text{sen} i / (1 - n^2 \cos^2 \varphi)^{1/2}$$

Ahora bien, la divergencia del haz elemental que, dentro del prisma, procede de A experimenta una reducción en relación con la del haz emergente de la óptica del faro, precisamente con la misma ley inversa, función de n , pues el rayo de dicho haz emergente de la óptica principal entrando en el prisma corresponde al incidente saliendo de él. El aumento relativo R (coeficiente de mayoración) de la divergencia sustituyendo el ángulo por el seno será pues:

$$R = (\Delta\rho/\Delta i) / n = \text{sen}\varphi / (1 - n^2 \cos^2\varphi)^{1/2}$$

con una relación R igual a la unidad para $\varphi = 90^\circ$ (el prisma no cambia la divergencia del haz) hasta uno infinito para $\cos\varphi = 1/n$, siendo en:

$$\begin{aligned} \text{metacrilato: } n = 1,49 & \quad \varphi = 47,84^\circ \\ \text{cristal Saint Gobain: } n = 1,53 & \quad \varphi = 49,19^\circ \end{aligned}$$

Este cada vez mayor aumento relativo del ángulo ρ puede permitir disponer menos prismas con el proceso de calcularlos uno a uno partiendo del valor de BOC anterior hasta rebasar el valor del ángulo γ , es decir hasta que el ángulo BOP (figura 1), siendo OP el límite del último haz, sea superior al BOD (figura 2). Dado que el flujo luminoso se conserva en un cada vez mayor ángulo sólido, de un prisma a otro, esta circunstancia habrá de tenerse en cuenta para el cálculo de superficies de la cara GH del prisma según el alcance requerido.

En la adjunta tabla se recogen los valores de φ y de R para tantear posibles soluciones conforme a la hipótesis de variación de k que se adopte.

Superficie de prismas

Depende de la intensidad luminosa que deba detraerse del haz principal; será discreta en los faros de modesta altura y de alguna consideración en los de mucha cota y puede exigir detraer gran parte de la superficie de óptica haciendo inviable la solución si llega a dejar al haz principal totalmente insuficiente en relación con el alcance requerido en el horizonte racional.

Para determinar la superficie se parte de la intensidad luminosa de cálculo necesaria para el máximo alcance en cada prisma, definido por el ángulo BOC , siendo de aplicación la metodología y fórmulas contenidas en los epígrafes III.2.2.4.2, III.2.5.1 y III.3.1 de las Normas Técnicas de 1986 antes citadas. Se expondrá un ejemplo para mejor definir el proceso.

Ejemplo de aplicación

Se aplicará al Faro de Formentor, cuya óptica, dióptrica y catadióptrica, se define en el adjunto plano, con disposición de los prismas complementarios frente al ca-

tadióptrio superior y entendiendo que se pretende una cobertura que se extienda hasta 1/4 de milla del faro. Los datos necesarios para entrar en el cálculo son:

Altura del plano focal sobre el nivel del mar	..210 m
Ancho de fuente de luz4 mm
Alto de fuente de luz7 mm
Luminancia de la fuente de luz762 cd/cm ²
Distancia focal300 mm
Revoluciones por minuto3
Ángulo del catadióptrio (retrasado)52°

El mayor ángulo BOC será:

$$\text{tg } BOC = 210 \cdot 4/1852 = 0,454 \quad BOC = 24,393^\circ$$

Número y ángulo de prismas

Estimación primaria

De los datos que anteceden y de la forma de la fuente de luz vista desde el catadióptrio, con el ángulo de 52° resulta:

$$\begin{aligned} h &= (16 + 49)^{1/2} \text{sen}(180^\circ - 60^\circ - 52^\circ) = 7,47 \text{ mm} <> 7,5 \text{ mm} \\ \text{tg}(2\delta) &= (7,5/300) \cos 52^\circ = 0,0153 \quad 2\delta = 0,88^\circ \quad \delta = 0,44^\circ \\ \gamma &= 24,393 - 0,44 = 23,953^\circ \end{aligned}$$

y un número de prismas N con la divergencia original constante de:

$$N = 23,953^\circ/0,88^\circ = 27,23$$

número que se ofrece excesivo y apunta a la conveniencia de proceder al cálculo con la estimación ajustada.

Estimación ajustada

Primer prisma.

$$\begin{aligned} BOC &= 2 \cdot 0,44 = 0,88^\circ \\ k &= 0,0154 \text{ y de las tablas:} \\ \varphi &= 87,081 + (90 - 87,081)(0,025 - 0,0154)/0,025 = \\ &= 88,202^\circ \\ R &= 1,000 \end{aligned}$$

Segundo prisma.-

$$\begin{aligned} BOC &= 0,88 + 0,88 \cdot 1,0001 = 0,88 + 0,88 = 1,760^\circ \\ k &= 0,0307 \text{ y de las tablas:} \end{aligned}$$

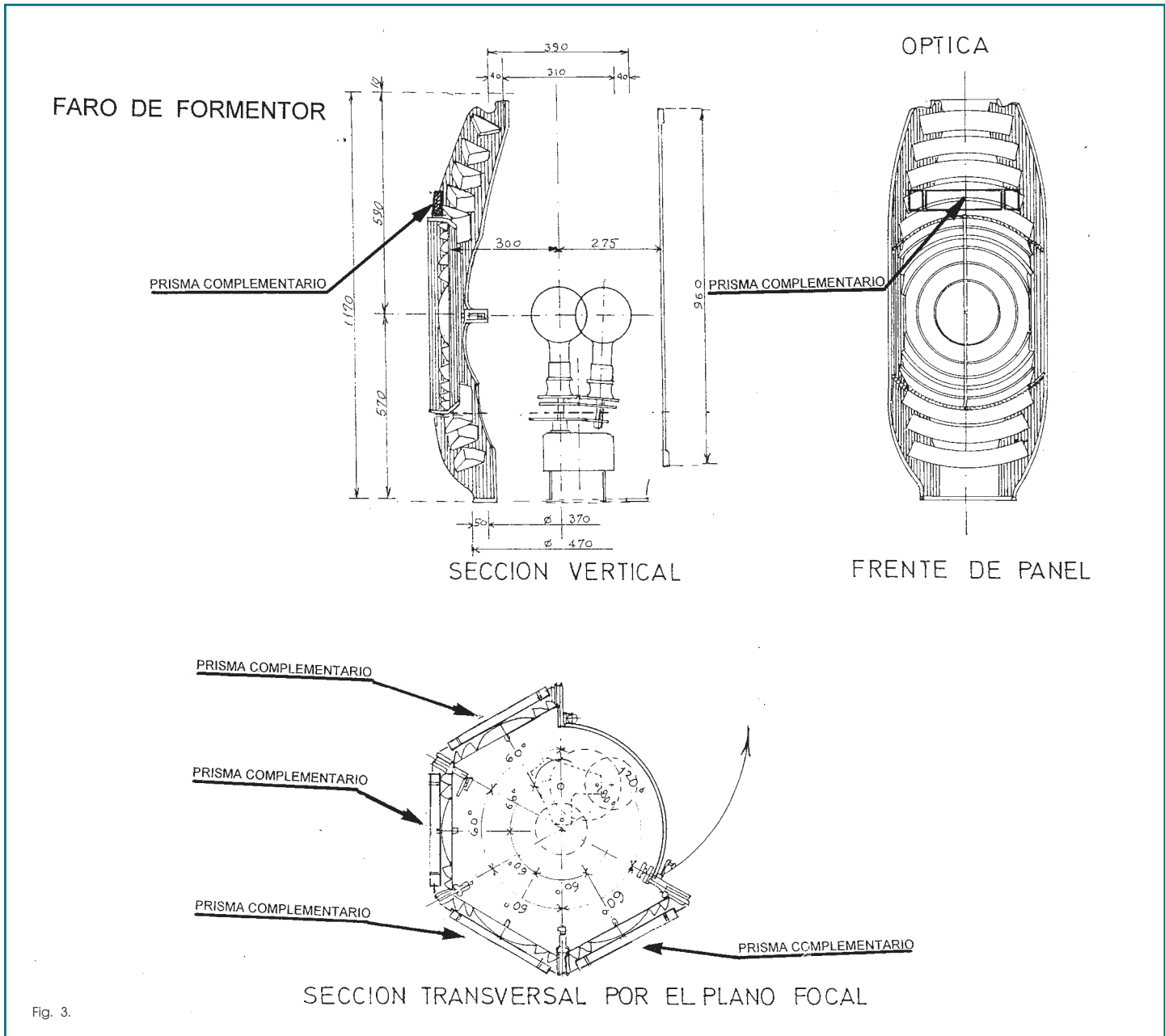


Fig. 3.

$$\varphi = 84,188 + (87,081 - 84,188) (0,05 - 0,0307) / 0,025 = 86,420^\circ$$

$$R = 1,007 - (1,007 - 1,001) (0,05 - 0,0307) / 0,025 = 1,002$$

Tercer prisma

$$BOC = 1,760 + 1,002 \cdot 0,88 = 1,760 + 0,882 = 2,642^\circ$$

$k = 0,0461$ y de las tablas:

$$\varphi = 84,188 + (87,081 - 84,188) (0,05 - 0,0461) / 0,025 = 84,639^\circ$$

$$R = 1,007 - (1,007 - 1,001) (0,05 - 0,0461) / 0,025 = 1,006$$

Cuarto prisma

$$BOC = 2,642 + 1,006 \cdot 0,88 = 2,642 + 0,885 = 3,527^\circ$$

$k = 0,0615$ y de las tablas:

$$\varphi = 81,347 + (84,188 - 81,347) (0,075 - 0,0615) / 0,025 = 82,881^\circ$$

$$R = 1,015 - (1,015 - 1,007) (0,075 - 0,0615) / 0,025 = 1,010$$

Quinto prisma

$$BOC = 3,527 + 1,010 \cdot 0,88 = 3,527 + 0,889 = 4,416^\circ$$

$k = 0,077$ y de las tablas:

Tabla de ángulos φ de prismas y de coeficientes R según ángulo del eje del haz refractado e índice de refracción n

n\k	0	0,025	0,05	0,075	0,1	0,125	0,15	0,175	0,2	0,225	0,25	0,275	0,3
Metracilato													
1,49 φ :	90,000°	87,081°	84,188°	81,347°	78,579°	75,905°	73,342°	70,902°	68,595°	66,426°	64,398°	62,513°	60,767°
1,49 R:	1,49	1,492	1,5	1,512	1,529	1,551	1,579	1,613	1,653	1,701	1,756	1,821	1,896
Cristal													
1,53 φ :	90,000°	87,301°	84,623°	81,988°	79,413°	76,916°	74,512°	72,211°	70,024°	67,955°	66,009°	64,188°	62,490°
1,53 R:	1,53	1,532	1,539	1,551	1,567	1,589	1,615	1,648	1,687	1,732	1,785	1,847	1,918

$$\varphi = 78,579 + (81,347 - 78,579)(0,1 - 0,077)/0,025 = 81,126^\circ$$

$$R = 1,026 - (1,026 - 1,015) (0,1 - 0,077)/0,025 = 1,016$$

Sexto prisma

$$BOC = 4,416 + 1,016 \cdot 0,88 = 4,416 + 0,894 = 5,310^\circ$$

$k = 0,093$ y de las tablas:

$$\varphi = 78,579 + (81,347 - 78,579)(0,1 - 0,093)/0,025 = 79,354^\circ$$

$$R = 1,026 - (1,026 - 1,015) (0,1 - 0,093)/0,025 = 1,023$$

Pudiera seguirse con este cálculo, expuesto más bien para explicar el proceso; pero conviene ya pasar al de las superficies necesarias de prisma por si no fuera preciso proseguir.

Superficie de prismas

La superficie a_2 resulta del citado epígrafe III.2.2.4.2 y será igual a la que se resta del catadioptrio a_3 de la óptica principal:

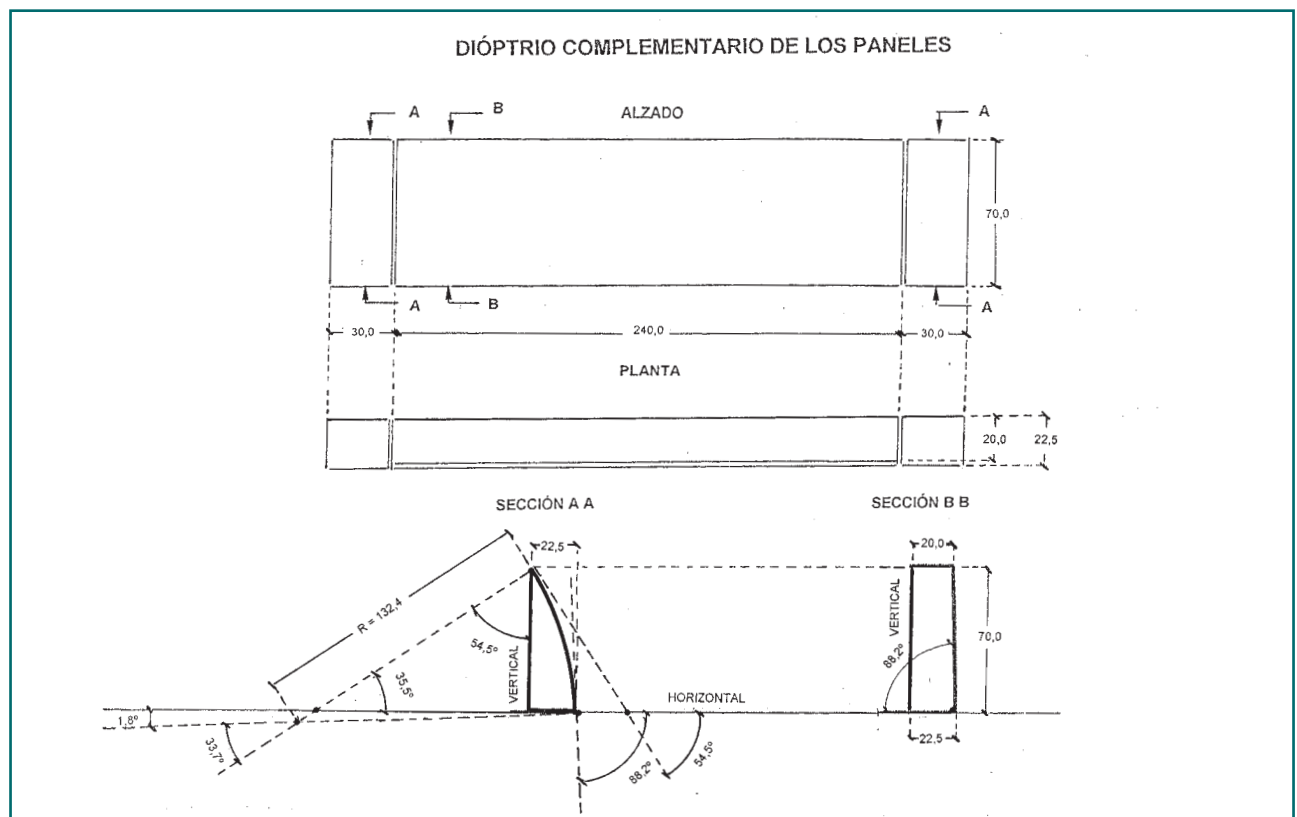


Fig. 4.

	0,325	0,35	0,375	0,4	0,425	0,45	0,475	0,5
	59,158° 1,982	57,682° 2,083	56,332° 2,2	55,105° 2,337	53,993° 2,499	52,991° 2,69	52,093° 2,921	51,294° 3,202
	60,916° 2	59,461° 2,095	58,122° 2,205	56,895° 2,333	55,776° 2,483	54,760° 2,66	53,842° 2,871	53,019° 3,126

$I_O = a_2 L c_2$ para la emergente del nuevo prisma
 $I'_O = a_2 L c_3$ para la intensidad que se toma del catódiptrio

y según los ábacos de los citados epígrafes III.2.2.4.2 y III.2.5.1:

$$f = 300 \text{ mm } T = 20'' \tau_O = 0,0424'' X = f/g = \cos 52^\circ = 0,616$$

$$I_e / I'_O = 0,32 \quad c_2 = 0,88 \quad (\text{para } \theta = 0^\circ) \quad c_3 = 0,85$$

y siendo $L = 1,762 \text{ cd} / \text{cm}^2$

$$I_O = 0,85 \cdot 0,88 \cdot 1,762 a_2 \quad \text{cd}$$

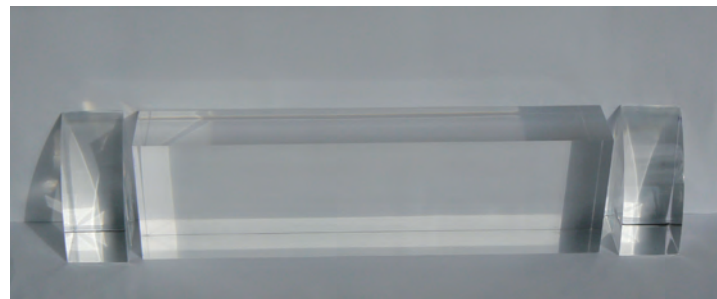
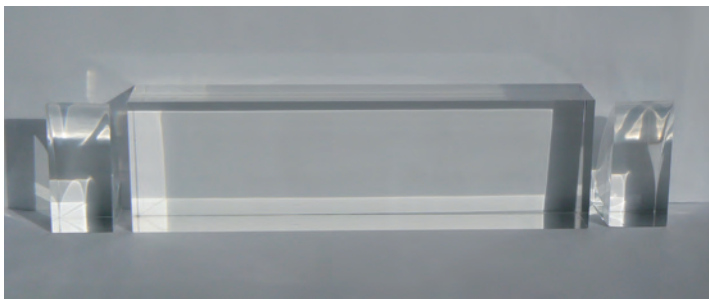
y la intensidad de cálculo I_C resultará de aplicar a la estacionaria I_O los coeficientes de III.3.1 y de la intensidad eficaz de la óptica principal, amén del propio del aumento del ángulo sólido, cifrable con el coeficiente de mayoración R :

$$I_C = (0,32 \cdot 0,85 \cdot 0,75 / R) I_O = 269 a_2 / R \quad \text{cd}$$

$$a_2 = 3,72 \cdot 10^{-3} R I_C \quad \text{cm}^2$$

determinando la I_C conforme al máximo alcance D requerido por cada haz según el epígrafe IV.1.2.1. con la fórmula expuesta en el III.3.3 con el umbral E_0 de percepción de la luz (fondo oscuro) $E_0 = 0,2 \cdot 10^{-6} \text{ lux}$.

Figs. 5 y 6.



$$I_C = 0,2 \cdot 10^{-6} D^2 / c^D \quad \text{cd}$$

($c = 0,999838$ por metro del alcance nominal)

No considerando la esfericidad de la superficie del mar será:

Primer prisma

$$OT = 210 / \text{sen} \delta = 210 / \text{sen}(0,88^\circ - 0,44^\circ) = 27,346 \text{ m}$$

$$R = 1,000$$

$$I_C = 0,2 \cdot 10^{-6} \cdot 747.802.717 / 0,01191 = 12.558 \text{ cd}$$

$$a_2 = 3,72 \cdot 10^{-3} \cdot 1,000 \cdot 12.558 = 46,714 \text{ cm}^2$$

Segundo prisma

$$OT = 210 / \text{sen} \delta = 210 / \text{sen}(1,76^\circ - 0,44^\circ) = 9,116 \text{ m}$$

$$R = 1,007$$

$$I_C = 0,2 \cdot 10^{-6} \cdot 83.102.259 / 0,228342 = 73,2 \quad \text{cd}$$

$$a_2 = 3,72 \cdot 10^{-3} \cdot 1,007 \cdot 73,2 = 0,273 \text{ cm}^2$$

superficie ya muy pequeña que, por conveniencias constructivas, se dispondrá mayor según se verá; como esta circunstancia se dará aún con mayor énfasis en los prismas restantes resulta ocioso seguir con el cálculo.

De lo expuesto resulta que de un primer prisma, con inclinación de $\varphi = 88,20^\circ$ y superficie de $46,714 \text{ cm}^2$ se pasaría a un último prisma con:

$$BOC = 24,393^\circ \quad k = \text{sen } BOC = 0,413 \text{ y de las tablas:}$$

$$\varphi = 53,993 + (55,105 - 53,993)(0,425 - 0,413) / 0,025 = 54,527^\circ$$

$$R = 1,677 - (1,677 - 1,568)(0,425 - 0,413) / 0,025 = 1,625$$

teniendo todos ellos superficies pequeñas; ello sugiere que, en vez de disponer prisma por prisma, se adopte, a partir del segundo prisma, un solo "prisma" complementario con una cara plana correspondiente a la superficie del primero y el resto en forma cilíndrica –como si se tra-

tara de infinitos prismas de superficie nula- de eje horizontal con planos tangentes a sus extremos formando los expresados ángulos –máximo y mínimo- con el horizontal. En el adjunto plano se aplica el sistema al prisma de Formentor.

Se observa que la superficie total necesaria será solo algo superior a la de los dos prismas calculados: $46,714 + 0,273 \text{ cm}^2$ la cual constituye una pequeña parte de la actual superficie neta de todo el panel de la óptica principal, circunstancia que induce a estimar una disminución muy poco significativa del flujo luminoso del haz principal; por ello la solución adoptada en este plano sin perjuicio de comprobar el mantenimiento de los alcances del remanente de intensidad del haz principal- prácticamente cuadruplica la teórica mínima calculada, con unos 190 cm^2 de superficie neta, adaptando la superficie del conjunto de prismas a la armadura de la óptica principal; así no solo se posibilita la visibilidad para la navegación próxima a la costa sino que se potencia pues percibirá la señal con transparencias atmosféricas inferiores a la standard del alcance nominal.

Comprobación del mantenimiento de alcances

Se sabe (si los datos de la instalación no han variado la información puede encontrarse en las tablas contenidas en el Plan de Señales Marítimas 1985/1989 publicado por la, a la sazón, Dirección General de Puertos y Costas en el Servicio de Publicaciones del MOPU, o, en parte, en el Libro de Faros del Instituto Hidrográfico de la Marina) que la actual instalación óptico-luminosa permite un alcance nominal de $23,7 \text{ mn}$ cuando en el Libro de Faros se recogen 21 mn , equivalentes a $38,850 \text{ m}$; habrá de comprobarse, pues, que la sustracción de intensidad luminosa no disminuye el alcance en más de estas $2,7 \text{ mn}$ de margen de que se dispone.

Asumiendo “grosso modo” que la intensidad luminosa es proporcional a la superficie de óptica, suma de la

dióptrica y catadióptrica, con una superficie neta del prisma de 190 cm^2 , si D , d , S y s son :

$$D = \text{alcance existente} = 23,7 \text{ mn} \leftrightarrow 43.892 \text{ m}$$

$$d = \text{alcance reducido por la disposición del prisma en m}$$

$$S = \text{Superficie neta de todo el panel de óptica} = 2.728 \text{ cm}^2$$

$$s = \text{Superficie neta no afectada por el prisma} = 2.538 \text{ cm}^2$$

por la fórmula de Allard (epígrafe IV.1.2.1) resulta:

$$(D^2/d^2) = (S/s)(c^D/c^d)$$

$$43.892^2/d^2 = 1,075 \cdot 0,999838^{43.892-d}$$

$$d = 42.334 / (0,999838^{43.892-d})^{1/2}$$

$$d = 43.544 \text{ m} > 38.850 \text{ m}$$

o sea, el alcance sigue siendo superior al requerido.

Conveniencia de aplicación

Con la general implantación de los sistemas de posicionamiento por GPS los faros y balizas han perdido importancia en la navegación comercial y pesca de altura, para las cuales venían siendo proyectados tradicionalmente, sin que en las condiciones fijadas por la Comisión Permanente de Faros se definiera solo para el alcance mínimo su relación con la transparencia atmosférica. Hoy el mayor número de usuarios viene acaso representado por la navegación de recreo que navega de ordinario en las proximidades de la costa y para la cual los faros y balizas constituyen una apreciable ayuda de la que a menudo se encuentra de facto privada por transcurrir los haces luminosos a mucha mayor altura. No precisa de un posicionamiento por GPS sino del intuitivo que le proporcionan las luces. Para este creciente sector de usuarios es muy conveniente el aumento de cobertura y no solo –como se ha hecho en el ejemplo- para las mismas condiciones de transparencia atmosférica de la navegación comercial sino de otros más pesimistas (si lo permite la sustracción al haz principal) para coadyuvar a la localización de cabos o escollos a los que nunca se acerca la navegación comercial. El coste de la implantación no ha de resultar un inconveniente; los cuatro juegos de piezas de metacrilato para el faro de Formentor, fabricadas en Barcelona, han supuesto, con IVA, 117,87 euros y puede proceder el personal de la Autoridad Portuaria a su sencilla colocación en el bastidor de la óptica con soportes de fácil construcción. ♦

Referencias:

- Los coeficientes de transmisión atmosférica en los cálculos de señales marítimas. ROP 123 (3.139). Rafael Soler Gayá 1976.
- Normas técnicas sobre obras e instalaciones de ayudas a la navegación. Centro de Publicaciones del MOPU. 1986.
- Plan de Señales Marítimas 1985/1989. Dirección General de Puertos y Costas. Servicio de Publicaciones del MOPU. 1985.
- Siglo y medio de la Comisión de Faros. Puertos del Estado. Ministerio de Fomento. Rafael Soler Gayá. 2006.
- Libro de Faros y Señales de Niebla. Instituto Hidrográfico de la Marina. 2007/2008.