



GUÍA DE LA IALA

G1065

DIVERGENCIA VERTICAL DEL HAZ DE LA SEÑAL LUMINOSA DE LAS AYUDAS A LA NAVEGACIÓN

Edición 4

Diciembre de 2018



Puertos del Estado



HISTORIAL DEL DOCUMENTO

Las revisiones realizadas a este documento de la IALA se anotarán en el siguiente cuadro antes de la puesta en circulación de un documento revisado.

Fecha	Detalles	Aprobación
Mayo de 2009	1ª edición	Consejo 45
Diciembre de 2013	Editado el apartado 5, añadidos el apartado 7 y el anexo 3: Orientación añadida sobre la divergencia vertical de fuentes luminosas fijas.	Consejo 56
Diciembre de 2017	Documento entero: Revisión de contenidos y formato actualizado a la nueva estructura de los documentos de la IALA.	Consejo 65
Diciembre de 2018	Editado el apartado 4.2: Armonización con otros documentos de la IALA de la secuencia de reconocimiento de la característica.	Consejo 68

La revisión de la traducción de este documento ha sido realizada por el grupo de trabajo de Puertos del Estado en el que han participado:

*Luis Martínez (Autoridad Portuaria de Vigo);
Enrique Abati (Autoridad Portuaria de Marín);
Juan Manuel Vidal (Autoridad Portuaria de Gijón);
Carlos Calvo (Autoridad Portuaria de Santander);
Cristina García-Capelo (Autoridad Portuaria de Bilbao);
Jose Luis Nuñez (Autoridad Portuaria de Pasajes);
Juan Antonio Torres (Autoridad Portuaria de Huelva);*

*Septimio Andrés (Autoridad Portuaria de Sevilla);
German Gamarro (Autoridad Portuaria de Algeciras);
Santiago Tortosa (Autoridad Portuaria de Ceuta);
Jaime Arenas (Autoridad Portuaria de Baleares);
Antonio Cebrián y Guillermo Segador (Autoridad Portuaria de Barcelona);
José Carlos Díez (Puertos del Estado).*

Coordinación de la edición en español y edición final:

José Carlos Díez (Puertos del Estado)

NOTA: Puertos del Estado no se responsabiliza de los errores de interpretación que puedan producirse por terceros en el uso del contenido de este documento, que corresponde a una traducción del documento original de la Asociación Internacional de Ayudas a la Navegación Marítima y Autoridades de Faros (IALA) denominado según aparece en la carátula.



ÍNDICE DE CONTENIDOS

1. OBJETIVO.....	7
2. ANTECEDENTES – LINTERNAS DE BOYA	7
3. ÁMBITO DE APLICACIÓN	8
4. FACTORES QUE AFECTAN AL RECONOCIMIENTO DE UNA SEÑAL LUMINOSA	8
4.1. Reconocimiento de la señal luminosa	8
4.2. Secuencia de reconocimiento de la característica.	8
4.3. Tiempo necesario para el reconocimiento de la característica de la luz.....	9
5. ALCANCE GEOGRÁFICO	9
5.1. Alcance geográfico de las ayudas flotantes a la navegación	10
5.2. Alcance geográfico de las luces en plataformas fijas	11
6. EFECTOS DINÁMICOS EN UNA AYUDA FLOTANTE A LA NAVEGACIÓN.....	11
6.1. Descripción de los movimientos de una ayuda flotante a la navegación.....	11
6.2. Efectos del oleaje y la oscilación vertical de la ayuda flotante a la navegación en el alcance geográfico.....	12
6.2.1. Efecto del oleaje y la oscilación vertical de la ayuda flotante a la navegación en el reconocimiento de la luz	12
6.3. Efectos del ángulo de balanceo de la ayuda flotante a la navegación en el reconocimiento de la luz.	12
7. DIVERGENCIA VERTICAL DE FUENTES LUMINOSAS FIJAS	13
7.1. Introducción.....	13
7.2. El requisito de la divergencia	14
8. DESARROLLO DE PERFILES DE INTENSIDAD VERTICAL ÚTILES	14
8.1. Perfiles básicos	14
8.2. Perfiles complejos.....	15
8.3. Otras consideraciones	16
9. PLANTEAMIENTOS PARA EL DISEÑO DE LA DIVERGENCIA VERTICAL DE LA LINTERNA.....	17
9.1. Plataformas flotantes	18
9.1.1. Un conjunto típico de necesidades navegacionales y el funcionamiento que se exige a la linterna de boya (ejemplo).....	18
9.1.2. Significado del ejemplo.....	20
9.2. Plataformas fijas	21
10. ACRÓNIMOS	23
11. REFERENCIAS	23
ANEXO A ESTUDIO	¡Error! Marcador no definido.
ANEXO B ESPECIFICACIONES DE EJEMPLO	¡Error! Marcador no definido.
ANEXO C ANÁLISIS DE LA DIVERGENCIA VERTICAL DE LUCES FIJAS.....	¡Error! Marcador no definido.
APPENDIX 1 CONFIRMACIÓN DE LOS VALORES UTILIZADOS CON ESTA GUÍA DE LA IALA ...	¡Error! Marcador no definido.
APPENDIX 2 CÁLCULO DE LAS COORDENADAS DEL OBSERVADOR.....	¡Error! Marcador no definido.
APPENDIX 3 CÁLCULO DEL ÁNGULO AL OBSERVADOR	¡Error! Marcador no definido.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

Índice de tablas

Tabla 1	Alcance geográfico	10
Tabla 2	Alcance del observador – de noche	18
Tabla 3	Parámetros de funcionamiento	19
Tabla 4	Funcionamiento de la linterna	20
Tabla 5	Intensidades fotométricas nominal y mínima de luces de distintos colores	35
Tabla 6	Perfiles de divergencia vertical mínima para los distintos colores	37

Índice de figuras

Figura 1	Reconocimiento de la característica	9
Figura 2	Alcance geográfico	9
Figura 3	Descripción del movimiento de un buque	11
Figura 4	Descripción de símbolos, boya en reposo en posición vertical	12
Figura 5	Boya en reposo, inclinada	13
Figura 6	Boya, movimiento angular	13
Figura 7	Trazado de intensidad en función del ángulo vertical con los puntos del 50% de la intensidad marcados en rojo	14
Figura 8	Perfil de intensidad básico	15
Figura 9	Aplicación de corto alcance	16
Figura 10	Perfil de intensidad complejo	16
Figura 11	Perfil suave	17
Figura 12	Ejemplo de un perfil máximo y mínimo	17
Figura 13	Curvas de intensidad desarrolladas (valores mínimos)	20
Figura 14	Influencia de la altura de observación	21
Figura 15	Compensación de la curvatura terrestre	22
Figura 16	Divergencia para un ajuste horizontal	22
Figura 17	Ángulos verticales necesarios en función de la distancia	22
Figura 18	Efecto combinado del movimiento de boyas y luces de destellos	24
Figura 19	Efecto combinado del balanceo y la inclinación (escora)	25
Figura 20	Efecto del movimiento de boyas (inclinación) en una serie de luces de ayudas a la navegación (de la ponencia de la USCG)	25
Figura 21	Efecto de la divergencia en la intensidad luminosa y el alcance nominal de las linternas de boya típicas (de la ponencia de la Administración Federal Alemana de Vías Navegables)	26
Figura 22	Datos de la linterna utilizada en el estudio de Trinity House - Divergencia vertical de 7º	27
Figura 23	Inclinación de la boya y alcance de la linterna en el oleaje, basado en el estudio de Trinity House	27

ÍNDICE DE CONTENIDOS

Figura 24	Efecto del movimiento de boyas en el reconocimiento de la característica, a una distancia de 4 millas, de una linterna con una divergencia vertical de 7°, del estudio de Trinity House	28
Figura 25	Datos de linterna empleados en el estudio de Trinity House - Divergencia vertical de 21°	29
Figura 26	Efecto del movimiento de boyas en el reconocimiento de la característica, a una distancia de 4 millas, de una linterna con una divergencia vertical de 21°, del estudio de Trinity House	29
Figura 27	Efecto del movimiento de boyas en el reconocimiento de la característica, a una distancia de 3 millas, de linternas con 7° (gráfico superior) y 21° (gráfico inferior) de divergencia vertical, del estudio de Trinity House	30
Figura 28	Efecto del movimiento de boyas en el reconocimiento de la característica, a una distancia de 3 millas, de linternas con 7° (gráfico superior) y 21° (gráfico inferior) de divergencia vertical, del Estudio de Trinity House (complementa a la Figura 25).....	30
Figura 29	Efecto del movimiento de boyas en el reconocimiento de caracteres cardinales, del estudio de Trinity House.....	31
Figura 30	Distribuciones objetivas de intensidad vertical	32
Figura 31	Perfil propuesto de intensidad vertical.....	33
Figura 32	Gráfico de estabilidad de una boya iluminada	33
Figura 33	Planos verticales según la Recomendación serie E-200 de la IALA.....	34
Figura 34	Perfil de intensidad mínimo para el blanco	35
Figura 35	Perfil de intensidad mínimo para el rojo y el verde	36
Figura 36	Perfil de intensidad mínimo para el amarillo	36
Figura 37	Perfiles máximo y mínimo resultantes	38
Figura 38	Intensidades mínimas en los ángulos de observación Fuente a una altura de 30 m y observador a una altura de 10 m	39
Figura 39	Ejemplo de un fallo de divergencia.....	40
Figura 40	Requisitos de intensidad para varios escenarios de alturas.....	41
Figura 41	Ángulo de observación aumentando con el alcance	42
Figura 42	Ángulo de observación disminuyendo con el alcance	42
Figura 43	Tangente de la curva de la tierra a distintas distancias	43
Figura 44	Efecto de la altura de la fuente sobre cómo el ángulo varía con el alcance	43
Figura 45	Distancia al horizonte	44
Figura 46	Cálculo de las coordenadas del observador	46
Figura 47	Ángulo al observador.....	47



ÍNDICE DE CONTENIDOS

Lista de ecuaciones

<i>Ecuación 1</i>	<i>Alcance geográfico</i>	<i>9</i>
<i>Ecuación 2</i>	<i>Cálculo del valor de la divergencia vertical necesario</i>	<i>21</i>
<i>Ecuación 3</i>	<i>Cálculos adicionales para el ángulo de divergencia</i>	<i>22</i>
<i>Ecuación 4</i>	<i>Cálculo de intensidad fotométrica.....</i>	<i>38</i>
<i>Ecuación 5</i>	<i>Valores para la Ecuación 6</i>	<i>38</i>
<i>Ecuación 6</i>	<i>Aproximación de la distancia al horizonte (M).....</i>	<i>45</i>

1. OBJETIVO

El objeto de este documento es ayudar al usuario con la especificación de la divergencia vertical de una linterna elegida para una ayuda a la navegación (AtoN) en concreto, que podría ser una plataforma fija o una flotante como, por ejemplo, una boya o un buque faro.

La utilidad de una luz de ayuda a la navegación marítima depende, en gran medida, de la proporción de tiempo en que se pueda percibir a cualquier distancia necesaria. En aguas confinadas, la distancia máxima a la que se requiere que se vea la luz puede parecer limitada, pero es de interés garantizar, dentro de las posibilidades económicas disponibles, este alcance en condiciones de mala visibilidad.

El objetivo es orientar al usuario sobre la divergencia de la linterna para una ayuda a la navegación dada. Esta podría ser una aplicación para ayudas flotantes que considerase el movimiento de respuesta de la plataforma. Si fuera una plataforma fija se considerarían la altura del plano focal, el alcance máximo y mínimo de visibilidad necesario y la altura del puente del buque que utiliza dicha ayuda.

2. ANTECEDENTES – LINTERNAS DE BOYA

A principios del siglo XX, las linternas eléctricas para boya no existían y, generalmente, la fuente luminosa era de acetileno o de una mezcla de propano y butano, que se quemaban en una camisa incandescente o en el aire. En ambos casos, el tamaño de la fuente luminosa era aproximadamente de un centímetro o más. Las linternas de la época empleaban lentes de vidrio prensado o, a veces, de vidrio tallado. El efecto de la fuente luminosa grande daba una divergencia vertical amplia que, junto con la estabilidad proporcionada por las boyas de acero utilizadas en aquel entonces, garantizaba que se podía ver la luz en la mayoría de las condiciones de funcionamiento.

Cuando el uso de las linternas eléctricas en las boyas empezó a generalizarse a mediados del siglo pasado, se empleaban, en la mayoría de los casos, paquetes de baterías primarias de grandes dimensiones como fuente de alimentación. En algunos casos, dichos paquetes estaban provistos de pilas de despolarización por aire. Se fabricaban los paquetes de baterías de forma que encajasen en un bolsillo de la boya diseñado para acomodar cuatro cilindros de acetileno AK-50. Dichos paquetes de baterías pesaban mucho y eran caros, por lo que se desarrollaron las nuevas linternas eléctricas para obtener suficiente luz con un consumo eléctrico mínimo.

Esto dio como resultado un estrechamiento de la curva de divergencia vertical de las linternas, que lograban unas buenas cifras de alcance nominal, pero con menor divergencia que las de gas a las que sustituyeron. Posteriormente, aparecieron en el mercado las boyas sintéticas; primero las de plástico reforzado con fibra de vidrio (GRP, del inglés, *Glass Reinforced Plastic*), que resultaron más dinámicas que los diseños de acero más antiguos. Hacia finales del siglo, y a fin de ahorrar en los costes de capital de la adquisición de boyas, algunas autoridades comenzaron a emplear boyas más reducidas que las que se utilizaban anteriormente.

En 1980, cuando el sistema de balizamiento marítimo de la IALA se implantó en todo el mundo, los expertos en la materia se dieron cuenta de que las complejas características de las marcas cardinales del sur y el oeste necesitarían más divergencia vertical que la que podían proporcionar las linternas eléctricas empleadas hasta entonces. Y así, algunas autoridades comenzaron a usar una divergencia más amplia (tomaron esta decisión porque entendieron que el reconocimiento de los ritmos más largos y complejos de las marcas cardinales sur y oeste se verían afectadas, en mayor medida, por el movimiento de boyas). A pesar de ello, las divergencias utilizadas seguían siendo estrechas en comparación con los ángulos a través de los cuales la mayoría de las boyas, incluso las más estables, se movían en las condiciones de viento y oleaje predominantes.

Aunque los ingenieros de ayudas a la navegación llevan más de cien años considerando cómo adaptar las características ópticas de una linterna de boya a las características dinámicas ahí donde se encuentra instalada la boya, sólo en los últimos años la IALA ha empezado a encontrar maneras de dar orientación sobre esta cuestión.

3. ÁMBITO DE APLICACIÓN

Esta guía se limita a la discusión de la divergencia vertical, el alcance y la altura focal de la fuente luminosa. No da consejos sobre cómo seleccionar el tamaño o la forma de una plataforma flotante para que se adapte mejor a un emplazamiento geográfico determinado.

Generalmente, las luces que van a instalarse en una ayuda a la navegación son linternas, para las cuales existen datos fotométricos suficientes. A la hora de determinar el alcance nominal, son parámetros muy útiles la intensidad luminosa y la distribución espacial de la luz emitida. Los principales factores que inciden sobre su alcance visual son ajenos a la instalación y pueden agruparse de la siguiente manera:

- La transmisión atmosférica de luz (visibilidad meteorológica);
- La percepción humana (umbral);
- La iluminación de fondo producida por otras luces;
- El alcance geográfico (altura del observador y de la luz);
- Los efectos dinámicos (para las ayudas flotantes):
 - Los movimientos de la plataforma flotante, así como la distribución espacial de la luz de la linterna;
 - La variación del alcance geográfico debido al oleaje y el oscurecimiento por las crestas de las olas.

Otros documentos de la IALA consideran los primeros tres factores, sobre todo la serie E-200 de Recomendaciones¹ y, por lo tanto, no se tratan aquí de manera pormenorizada. Este documento considerará los siguientes factores.

- Los factores que inciden sobre el reconocimiento de la señal por el observador;
- El alcance geográfico;
- Los efectos dinámicos en las ayudas flotantes.

4. FACTORES QUE AFECTAN AL RECONOCIMIENTO DE UNA SEÑAL LUMINOSA

4.1. RECONOCIMIENTO DE LA SEÑAL LUMINOSA

Para identificar, durante la noche, una ayuda a la navegación con una luz de destellos, el navegante puede observar dos propiedades de la señal proporcionadas por la linterna:

- El color de la luz;
- El ritmo de la luz.

En la mayoría de las circunstancias, observa primero el color: blanco, rojo, verde, amarillo, azul, o incluso una combinación. Así que el color le dará los primeros datos de utilidad para la navegación. Por ejemplo, si el navegante observa que una luz roja o verde procede de una ayuda flotante, sabrá que es una marca lateral. Para obtener más información, debe reconocer la característica de la luz. En el caso de las marcas fijas y flotantes con luces blancas, es imprescindible que el navegante reconozca también el ritmo de la luz para obtener información de utilidad para la navegación.

4.2. SECUENCIA DE RECONOCIMIENTO DE LA CARACTERÍSTICA.

Existen tres fases en el proceso de reconocer el carácter de la luz:

- 1 **Detección** de la luz de una ayuda a la navegación: el observador es consciente de la luz.

¹ En la actualidad (diciembre de 2017), la serie E-200 se encuentra bajo revisión y algunas de sus Recomendaciones se han revisado y publicado con un formato numérico R020x (E-200-x).

- 2 **Reconocimiento** de una luz de ayuda a la navegación: el observador es consciente de que la luz es la de una ayuda a la navegación.
- 3 **Identificación** de una luz de ayuda a la navegación: el observador es consciente de que la luz pertenece a una ayuda a la navegación determinada.

NOTA Ésta es una secuencia temporal y se supone que durante ella la señal no se encuentra oscurecida en ningún momento de esta secuencia. Se supone que los efectos de la percepción humana, la transmisividad atmosférica y los demás factores no inciden en la visibilidad de la señal en el ojo del navegante.

4.3. TIEMPO NECESARIO PARA EL RECONOCIMIENTO DE LA CARACTERÍSTICA DE LA LUZ

Existen dos factores temporales de importancia que definen el tiempo necesario para reconocer la característica, que son:

- 1 La duración del periodo (T_c)
- 2 La duración de la observación (T_o)

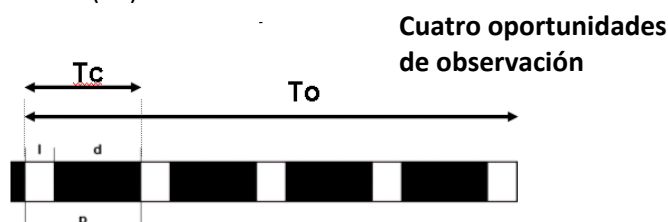


Figura 1 Reconocimiento de la característica

Por lo tanto, el navegante necesita al menos dos periodos ($2 \times T_c$) para poder reconocer la característica de la luz.

5. ALCANCE GEOGRÁFICO

El alcance geográfico es “la mayor distancia a la que un objeto o fuente luminosa se puede percibir bajo condiciones de perfecta visibilidad, limitada tan sólo por la curvatura de la tierra, la refracción de la atmósfera y la elevación del observador y del objeto o la luz”.

A medida que el observador se aleja de la fuente, habrá un punto en que la luz se verá oscurecida por la tierra, tal y como se muestra en la Figura 2.

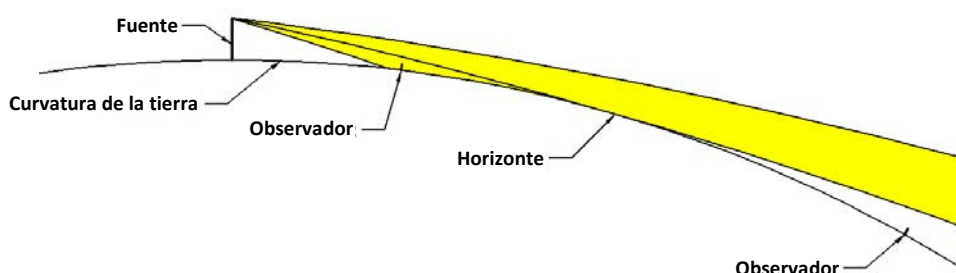


Figura 2 Alcance geográfico

La distancia máxima se determina mediante la ecuación:

$$R_g = 2.03 \times \sqrt{h_0 + H_m}$$

Ecuación 1 Alcance geográfico

Donde:

R_g es el alcance geográfico (en millas náuticas) (M)

h_0 es la elevación del ojo del observador (en metros) (m)

H_m es la elevación de la marca (m)

El factor 2,03 tiene en cuenta la refracción de la atmósfera, que causa una ligera curvatura en la trayectoria de la luz entre su fuente y el observador, y asimismo tiene en cuenta la conversión de las unidades entre las alturas en metros y el alcance en millas náuticas. Las variaciones climáticas en diferentes partes del mundo dan lugar a que se recomienden diferentes factores. En general, los factores oscilan entre 2,03 y 2,12.

5.1. ALCANCE GEOGRÁFICO DE LAS AYUDAS FLOTANTES A LA NAVEGACIÓN

La elevación de la linterna instalada en una ayuda flotante incide directamente sobre el alcance geográfico de la luz. No obstante, si la linterna está más alta, suele ser necesaria una ayuda flotante más grande, que supondría un precio más elevado y más gastos de mantenimiento. Por consiguiente, la altura funcional de una luz en una plataforma flotante dependerá del criterio de diseño que adoptemos.

Dichos criterios a menudo consideran las condiciones de funcionamiento y permiten que las plataformas flotantes se clasifiquen en distintas categorías. Un ejemplo del sistema de clasificación de una autoridad es la siguiente:

- Boyas de mar abierto – alturas focales que oscilan entre 4 y 6 metros;
- Boyas de aguas semi abrigadas – alturas focales que oscilan entre 2,5 y 4 metros;
- Boyas de aguas costeras y canales – alturas focales que oscilan entre 1,5 y 2,5 metros;
- Boyas de aguas restringidas – alturas focales de 1,5 metros o menos.

La clasificación citada es sólo un ejemplo, y otras autoridades y fabricantes tendrán diversos criterios de clasificación, en función de sus parámetros de diseño y de las condiciones ambientales.

La fórmula de alcance geográfico (Ecuación 1) se empleó para calcular los alcances geográficos mostrados en el cuadro que figura a continuación. Se demuestra que para todas las categorías de ayudas flotantes y para alturas del ojo de un observador por encima de aproximadamente 5 metros, es probable que el alcance geográfico sea superior a 5 millas, incluso para las boyas más pequeñas. Por tanto, el alcance geográfico calculado no suele ser el principal factor que limite el alcance de una ayuda flotante.

El cuadro que se muestra a continuación se ha reproducido de la NAVGUIDE de la IALA, pero con una elevación de la luz de hasta 6 metros. Cabe resaltar que es posible que algunas ayudas flotantes grandes, como los buques faro, tengan una elevación de luz de hasta 12 m o más.

Tabla 1 Alcance geográfico

Alcance geográfico, en millas náuticas (M)							
Altura del ojo del observador (m)	Elevación de la luz (m)						
	0	1	2	3	4	5	6
1	2,0	4,1	4,9	5,5	6,1	6,6	7,0
2	2,9	4,9	5,7	6,4	6,9	7,4	7,8
5	4,5	6,6	7,4	8,1	8,6	9,1	9,5
10	6,4	8,5	9,3	9,9	10,5	11,0	11,4
20	9,1	11,1	12,0	12,6	13,1	13,6	14,1
30	11,1	13,2	14,0	14,6	15,2	15,7	16,1

Una preocupación prioritaria es la capacidad del navegante de ver la luz desde cerca, cuando los ángulos de visión se encuentran muy por encima del plano focal. Cuando la altura del puente del buque es muy elevada, es un factor importante para las ayudas flotantes que marcan los límites de canales estrechos. Hasta cierto punto, se puede solucionar el problema eligiendo una fuente luminosa con la divergencia vertical adecuada, o utilizando una linterna diseñada específicamente para dichas condiciones. Esta consideración es de aplicación tanto para las luces en las plataformas fijas como para las luces en las plataformas flotantes.

5.2. ALCANCE GEOGRÁFICO DE LAS LUCES EN PLATAFORMAS FIJAS

Para una fuente luminosa sobre una plataforma, el parámetro H_m se mide desde la superficie del agua hasta el plano focal de la linterna. Se emplea la Ecuación 1 para calcular la elevación de cada luz por separado, en función de la altura más baja del observador y del alcance geográfico necesario.

6. EFECTOS DINÁMICOS EN UNA AYUDA FLOTANTE A LA NAVEGACIÓN

6.1. DESCRIPCIÓN DE LOS MOVIMIENTOS DE UNA AYUDA FLOTANTE A LA NAVEGACIÓN

En general, se emplean los términos utilizados a continuación, en la Figura 3, para referirse a los movimientos de un buque. Lo que no se incluye en este diagrama es una escora permanente hacia un lado, ni los efectos de un sistema de amarre.

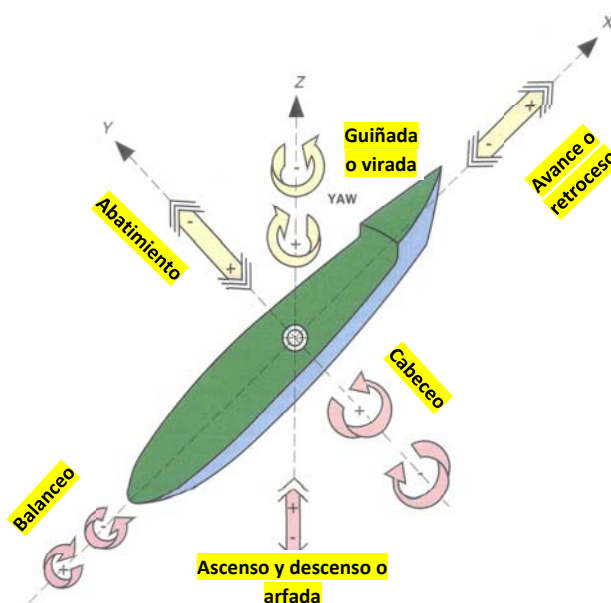


Figura 3 Descripción del movimiento de un buque

NOTA La Figura 3 se reproduce con la autorización de la Royal Institute of Navigation.

Dichos términos son válidos cuando la ayuda flotante es un buque faro, pero para la mayoría de las boyas sólo se emplea el siguiente conjunto de términos:

- Escora;
- Balanceo;
- Oscilación vertical (Arfada);
- Avance.

La escora, el balanceo y la arfada inciden directamente en el funcionamiento de la luz de la señal, mientras que el avance no lo hace. Las fuerzas del oleaje sobre la ayuda a la navegación son la causa principal del balanceo y la

arfada. La escora suele ser consecuencia de los efectos de un viento casi estable y los efectos de las corrientes, además de la carga del fondeo. En general, cambia con más lentitud que el periodo de la ola.

La escora, el balanceo y la arfada inciden sobre el alcance visible y el reconocimiento de la luz, porque disminuyen la altura focal y/o inclinan el plano focal de la linterna en el sentido contrario al ojo del observador. La disminución de la altura focal reduce el alcance geográfico. La inclinación del plano de la luz en el sentido contrario al observador reduce la intensidad del haz y el alcance luminoso.

La naturaleza del movimiento de una ayuda flotante constituye un reto para los que diseñan los sistemas de ayuda a la navegación y la solución puede encontrarse en dos planteamientos mutuamente complementarios:

- El diseño de la ayuda flotante a la navegación – elección de la plataforma flotante y el fondeo más adecuados, sobre todo para minimizar los ángulos de escora y balanceo;
- El diseño de la linterna – para que sea adecuado para los ángulos de balanceo que se esperan del diseño de la ayuda flotante a la navegación y del fondeo elegidos.

6.2. EFECTOS DEL OLEAJE Y LA OSCILACIÓN VERTICAL DE LA AYUDA FLOTANTE A LA NAVEGACIÓN EN EL ALCANCE GEOGRÁFICO

La oscilación vertical y la posición de la ayuda flotante a la navegación en el perfil de la ola (p.ej. cresta o seno) tendrán el efecto de cambiar el alcance geográfico. En la mayoría de los casos prácticos, el efecto es muy pequeño y, en general, los diseñadores de sistemas de ayuda a la navegación no lo tienen en cuenta.

6.2.1. EFECTO DEL OLEAJE Y LA OSCILACIÓN VERTICAL DE LA AYUDA FLOTANTE A LA NAVEGACIÓN EN EL RECONOCIMIENTO DE LA LUZ

La oscilación vertical y la posición de la ayuda flotante a la navegación en el perfil de la ola (p.ej. cresta o seno), pueden dar lugar a que el observador no vea la luz cuando la ayuda flotante a la navegación se encuentre en el seno de una ola. Como consecuencia, puede provocar que no se vea la señal luminosa, o que se altere el ritmo observado.

6.3. EFECTOS DEL ÁNGULO DE BALANCEO DE LA AYUDA FLOTANTE A LA NAVEGACIÓN EN EL RECONOCIMIENTO DE LA LUZ

Para mostrar el efecto del movimiento de boyas, es necesario imaginar una boya que lleva una linterna marina instalada, que se mueve bajo los efectos de las corrientes el viento y el oleaje, pero a la vez dichos movimientos se ven limitados por su fondeo. Las figuras siguientes muestran algunos efectos típicos y el asiento de la boya como consecuencia de dichos efectos. Con el fin de simplificar, no se muestra el fondeo y la linterna sólo emite luz en disco; es decir, tiene una divergencia vertical de cero.

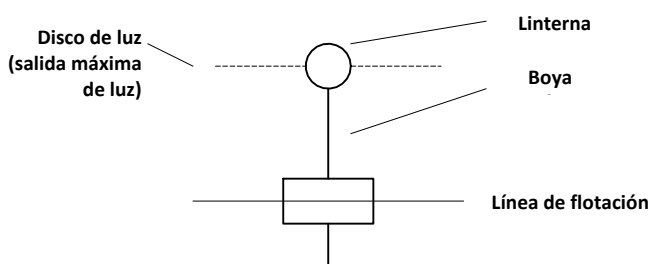


Figura 4 Descripción de símbolos, boya en reposo en posición vertical

En la Figura 4, la boya se encuentra en reposo. Si se ha fabricado correctamente, y con la fuerza de amarre actuando en posición vertical a través del centro de gravedad y el centro de carena de la boya, la boya permanece erguida. El disco de luz, indicado por la línea de trazos, queda en horizontal.

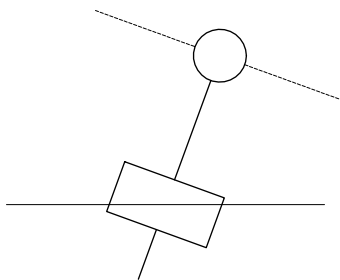


Figura 5 *Boya en reposo, inclinada*

En la Figura 5, los efectos de la marea han desplazado la boya de su posición inicial y, además, bajo las fuerzas del agua y el amarre, han provocado que se incline a un ángulo de α . Es evidente que el disco de luz ya se inclina al mismo ángulo α_x .

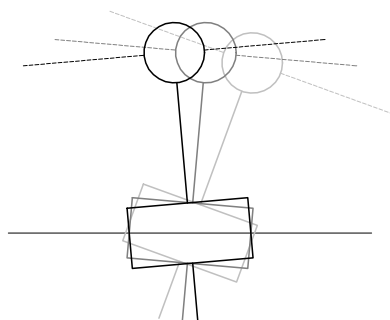


Figura 6 *Boya, movimiento angular*

En la Figura 6, se suman los efectos del viento y el oleaje, y la inclinación de la boya se ve modulada por el movimiento dinámico de $\pm\beta_x$, lo que significa que la boya, y por lo tanto el disco de luz, se mueven por un ángulo de $\alpha_x \pm \beta_x$. Hay que señalar que este efecto varía en función de la posición del observador respecto a los planos en que se encuentran los ángulos α y β .

7. DIVERGENCIA VERTICAL DE FUENTES LUMINOSAS FIJAS

7.1. INTRODUCCIÓN

Se especifica la divergencia vertical del haz como el ángulo del haz entre los puntos donde la intensidad ha disminuido a una fracción de la intensidad máxima dentro del haz.

La divergencia vertical suele especificarse entre los primeros puntos donde la intensidad cae por debajo del 50% de su valor máximo. Figura 7, se muestra un gráfico de la intensidad trazada en función del ángulo vertical. La divergencia vertical de este haz sería dada como un máximo de $+1,03^\circ$, un mínimo de $-1,35^\circ$ y un total de $2,38^\circ$.

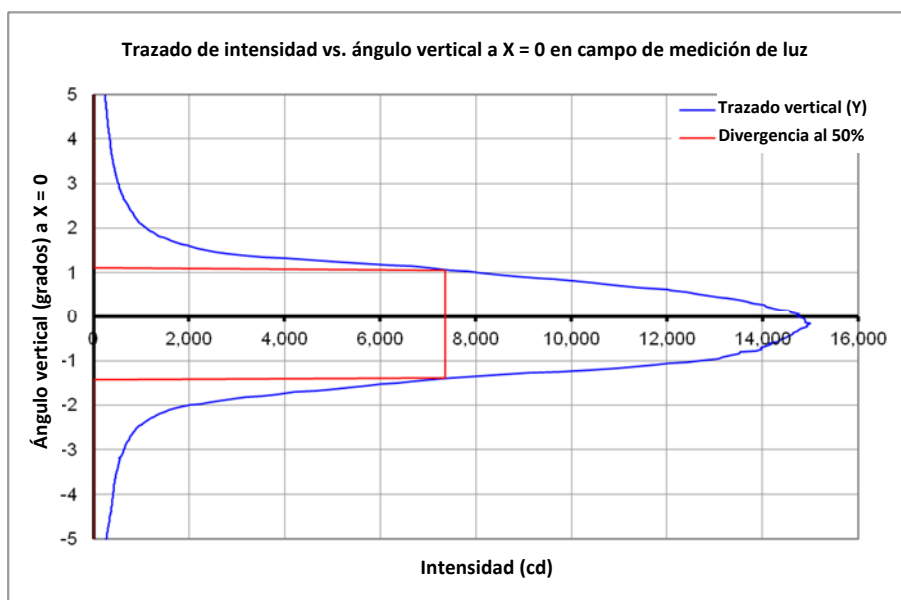


Figura 7 *Trazado de intensidad en función del ángulo vertical con los puntos del 50% de la intensidad marcados en rojo.*

Cuando se utiliza la linterna en una boyas o buque faro, su ángulo cambia constantemente debido a la acción de oleaje y, por lo tanto, no siempre estará apuntando al horizonte. Debido a este motivo, es evidente que una divergencia vertical amplia aporta ventajas.

7.2. EL REQUISITO DE LA DIVERGENCIA

Si se utiliza la linterna en un faro, donde su posición es fija, el ángulo desde el cual el observador percibe la fuente luminosa depende de la altura de la fuente, la altura del observador y la distancia entre los dos. Si se eligen las alturas de la fuente y el observador, puede calcularse y trazarse el ángulo de observación para unas distancias determinadas. La referencia [1] y la 0 presentan la intensidad mínima necesaria para una distancia en concreto.

En el análisis de la divergencia vertical de las luces fijas que figura en el ANNEX C, puede apreciarse que la especificación típica de la divergencia vertical de una linterna no confirma necesariamente que se pueda ver a todas las distancias previstas. Para confirmar su idoneidad, el trazado de la divergencia vertical de una linterna medida debe abarcar todos los trazados del “ángulos al observador”.

Este análisis también indica que los requisitos mínimos de una linterna con una divergencia vertical de $\pm 0,25^\circ$ al 50% de la intensidad cumpliría la mayoría de los requisitos, aunque se debe aplicar un margen para compensar los errores debidos a los supuestos y para ofrecer un factor de seguridad.

8. DESARROLLO DE PERFILES DE INTENSIDAD VERTICAL ÚTILES

Los estudios citados en los anexos indican que las divergencias de las linternas de boya suelen ser demasiado estrechas para los ángulos de escora y balanceo que experimentan.²

8.1. PERFILES BÁSICOS

Ahora, imaginemos una linterna más convencional, con una divergencia no nula. Si un observador a cierta distancia de la boya va a ver la luz, la linterna de boya debería emitir una luz con una divergencia vertical de $\pm(\alpha+\beta)$.

² Brown, D. M. “Probabilities of Detection and Recognition of Flashing Lights on Rolling Buoys”, U.S. Coast Guard Research and Development Center”, Informe n.º CG-D-10-88, agosto de 1987.

Si el observador se encuentra cerca del límite del alcance visual de la luz de la linterna de boya, queda claro que la curva de divergencia vertical de la luz debería ser una función cuadrada, tal y como puede apreciarse en la Figura 8.

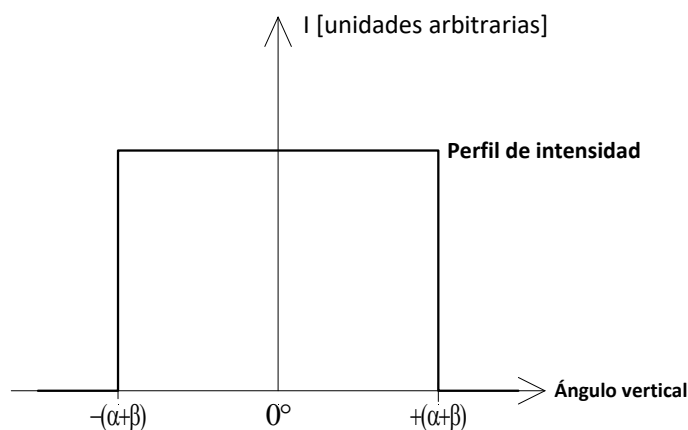


Figura 8 *Perfil de intensidad básica*

Observación El ángulo 0° corresponde al plano horizontal de referencia según la Recomendación R0203(E-200-3) de la IALA - Señales luminosas marítimas - Medición.

En la práctica, podría resultar difícil conseguir un perfil similar, con límites tan nítidos, pero debería ser posible conseguirlo con la ayuda de las técnicas modernas de diseño óptico. No obstante, es posible que no sea aconsejable tener un corte tan abrupto en los límites de los ángulos.

8.2. PERFILES COMPLEJOS

Ahora, llevemos el análisis un paso más allá. En el pasado, el alcance máximo de una luz era una consideración primordial para los ingenieros de ayudas a la navegación. En la actualidad, las linternas de boya (y de baliza) suelen emplearse para la navegación a distancias moderadas, como, por ejemplo, en canales confinados y a distancias reducidas, para cuando pasa un buque al lado de una boya y el navegante desea comprobar la cercanía a la que pasa, lo que añade dos consideraciones adicionales a la hora de tomar una decisión sobre la divergencia vertical.

Los tres requisitos de diseño para el ingeniero de ayudas a la navegación ahora son, por ejemplo:

- Requisito 1 - A largo alcance, la luz de boya debería ser visible a pesar de sus movimientos, incluso en condiciones de mar gruesa, aunque puede que no sea visible en condiciones de mar muy gruesa;
- Requisito 2 - A medio alcance, la luz de boya debería ser visible, incluso en condiciones de mar muy gruesa, por lo que el ángulo β será mayor que en el requisito 1 arriba;
- Requisito 3 - A muy corto alcance, la luz de boya debería ser visible desde un buque con una altura considerable de puente, que pasa cerca de la boya.

En este caso, la altura del puente y la proximidad del buque a la boya significan que el observador esté viendo la luz con un gran ángulo, véase la Figura 79.

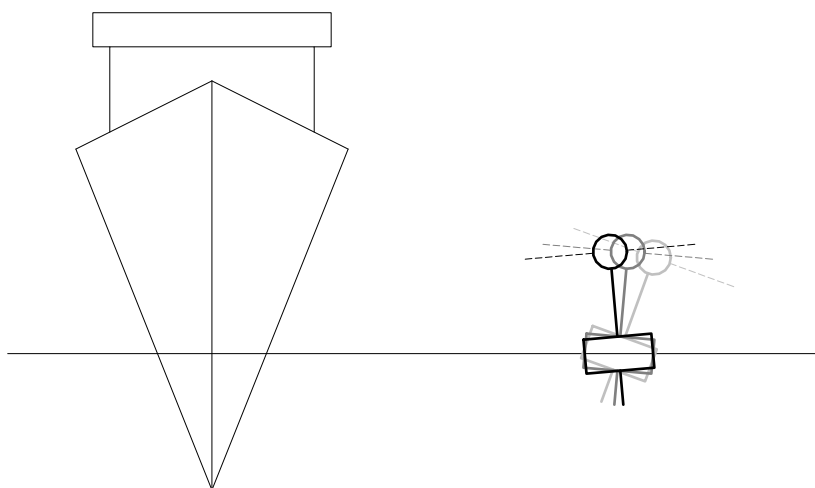


Figura 9 *Aplicación de corto alcance*

Los ejemplos de navegación que originan estos tres requisitos podrían ser:

- 1 Tomando desde larga distancia la entrada a un canal balizado con boyas.
- 2 Navegar por un canal balizado con boyas, donde existe bastante distancia entre ellas.
- 3 Pasar junto a una boya o un par de ellas.

Cada uno de los requisitos distintos genera un perfil básico, y cuando se combinan estos perfiles básicos, se obtiene uno complejo.

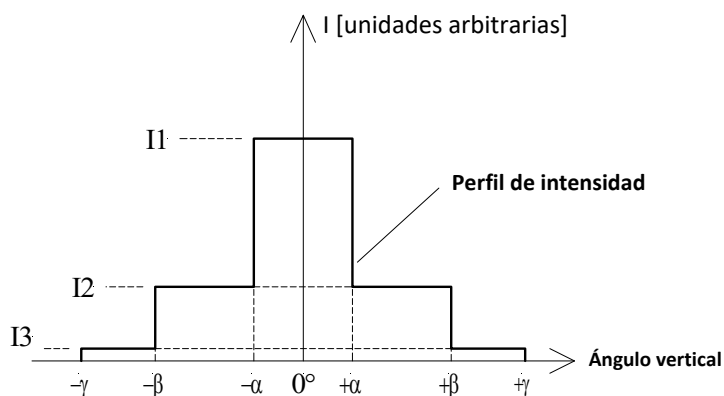


Figura 10 *Perfil de intensidad complejo*

8.3. OTRAS CONSIDERACIONES

En la práctica, es posible que el diseñador de ayudas a la navegación prefiera un perfil más suave que el que se muestra en la 10.

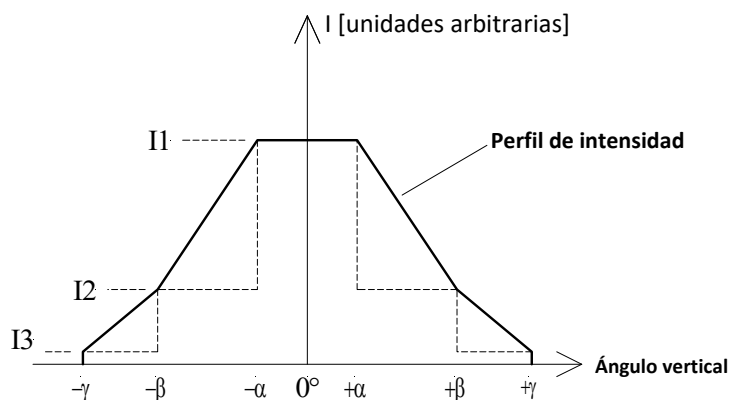


Figura 11 *Perfil suave*

Todos los perfiles anteriores son valores mínimos. Además, es aconsejable definir un valor máximo para la intensidad luminosa, que no debe superarse, para optimizar el funcionamiento de las ayudas a la navegación y minimizar la contaminación lumínica. Por tanto, tiene sentido definir un perfil máximo para algunas aplicaciones, de modo que la distribución de la intensidad medida se encuentre dentro de las dos curvas limitrofes.

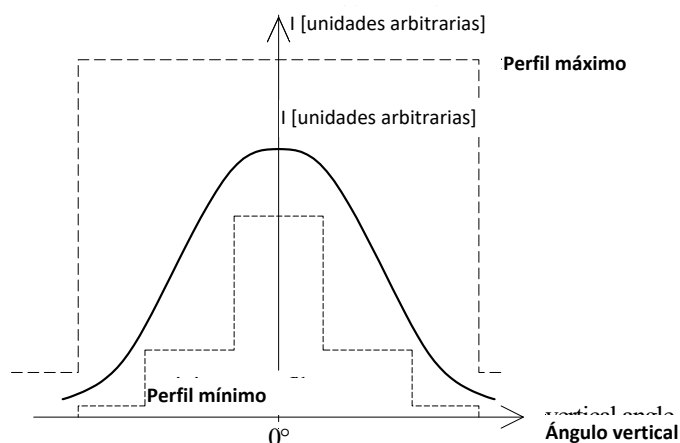


Figura 12 *Ejemplo de un perfil máximo y mínimo*

9. PLANTEAMIENTOS PARA EL DISEÑO DE LA DIVERGENCIA VERTICAL DE LA LINTERNA

En el pasado, la divergencia vertical de las linternas se definía como la anchura de la separación angular a la décima parte (10%) de la altura (FWTM, del inglés, Full Width at Tenth Maximum, anchura total a la décima parte del máximo) en el perfil de la intensidad. En los últimos años, se ha definido la divergencia de la linterna por la intensidad del ancho a la mitad de altura (FWHM, del inglés “Full Width at Half Maximum”); o sea, la anchura de la separación angular a la mitad de la altura en el perfil de intensidad (FWHM, del inglés, “Full Width at Half Maximum”). Este planteamiento respecto a la divergencia vertical se basó en las fuentes luminosas y lentes tradicionales, que emitían una proporción significativa de luz a ángulos de divergencia muy abiertos. Gracias a la tecnología moderna, tipificada por las linternas con diodos emisores de luz (LED), es posible concentrar el haz luminoso, hasta tal punto que tenga un perfil más rectangular. También cabe resaltar que el ancho a la mitad de altura (FWHM) es un valor relativo basado en la máxima intensidad de la linterna, que no tiene nada que ver con las candelas o el alcance nominal. Por tanto, se necesitan nuevos requerimientos de actuación para la divergencia vertical de las linternas, que se relacionan a continuación.

9.1. PLATAFORMAS FLOTANTES

Al considerar los requisitos de funcionamiento de la luz de una plataforma flotante, deben utilizarse los siguientes parámetros para definir el perfil necesario para la divergencia vertical:

- Las condiciones ambientales esperadas;
- Los consiguientes movimientos de la plataforma de luz;
- Las alturas de los puentes de los buques que la utilizan.

9.1.1. UN CONJUNTO TÍPICO DE NECESIDADES NAVEGACIONALES Y EL FUNCIONAMIENTO QUE SE EXIGE A LA LINTERNA DE BOYA (EJEMPLO)

Resulta útil emplear el estudio teórico citado arriba, y desarrollarlo aún más, para definir la necesidad operativa y el consiguiente funcionamiento de la linterna. El siguiente cuadro es para la navegación nocturna sin ninguna iluminación de fondo. Se han elegido los alcances y las cifras de transmisividad de un ejemplo típico.

Tabla 2 Alcance del observador – de noche

Necesidad operativa	Condiciones ambientales – estado del mar	Condiciones ambientales - visibilidad	Distancia al observador desde la boya	Observación
Requisito 1, Tomando desde larga distancia el inicio de un canal balizado con boyas	Mar gruesa	Visibilidad que se puede esperar el 90% del tiempo.	4 M	El buque se aproxima al comienzo del canal. Es aceptable que se reduzca el alcance visual por debajo de 4 M en visibilidad reducida y/o en mar muy gruesa.
Requisito 2, navegando en un canal balizado con boyas	Mar muy gruesa	Visibilidad que se puede esperar el 98% del tiempo, lluvia torrencial incluida	1 M	El navegante ya se encuentra en el canal confinado y, a medida que se aproxima a la boya o par de boyas, debe ver la luz.
Requisito 3, pasando junto a una boya o un par de ellas	Mar muy gruesa	Visibilidad que se puede esperar el 99% del tiempo, niebla espesa incluida	0,05 M	El navegante ya se encuentra en el canal confinado y debe ver la luz para conocer su posición lateral dentro del canal.

Con este conjunto de necesidades operativas, pueden determinarse los parámetros que incidirán en el funcionamiento de la linterna.

Tabla 3 Parámetros de funcionamiento

Necesidad operativa	Estado del mar → movimiento de boyas	Visibilidad → factor de transmisividad	Alcance desde la boya al observador	Observación
Requisito 1, tomando desde larga distancia el inicio de un canal balizado con boyas	Mar gruesa $\alpha + \beta = 10^\circ$	Visibilidad que se puede esperar el 90% del tiempo. $T_M = 0,74$	4 M	
Requisito 2, navegando en un canal balizado con boyas	Mar muy gruesa $\alpha + \beta = 20^\circ$	Visibilidad que se puede esperar el 98% del tiempo. Lluvia torrencial incluida $T_M = 0,223$	1 M	
Requisito 3, pasando junto a una boya o un par de ellas	Mar muy gruesa $\alpha + \beta = 20^\circ$	Visibilidad que se puede esperar el 99% del tiempo. Niebla espesa incluida $T_M = 0,001$	0,05 M	El observador se encuentra cerca de la boya y muy por encima de ella. Alturas de puente por encima de 40 metros

El factor T_M empleado en el Requisito 1 se obtiene de los datos publicados para Japón. Véase el documento “Basic Theory of Aids to Navigation”, 1988, publicado por Tokokai (Miembro Asociado de la IALA). En el Cuadro 2.1-2 en la página 79, “Ranges of Visibility in Japan” (Alcances de visibilidad en Japón), se muestran los datos de la visibilidad obtenidos a partir de unas observaciones realizadas a lo largo de la costa de Japón, que indican un T_M medio de 10,2 millas náuticas. Por lo tanto, se emplea un valor de $T_M = 0,74$ (una visibilidad de 10 millas náuticas) en el Requisito 1. La cifra de 0,223 corresponde a una visibilidad meteorológica de 2 km.

Ahora, ya se puede calcular el funcionamiento que se exige a la linterna.

Tabla 4 Funcionamiento de la linterna

Necesidad operativa	Rango de la divergencia vertical de la linterna	Datos de entrada para el cálculo de intensidad	Intensidad calculada $I_{calculada}$	Fotométrica Intensidad $I_{foto} (*)$
Requisito 1, tomando desde larga distancia la entrada en un canal balizado con boyas	0 a $\pm 10^\circ$	$T_M = 0,74$ $D = 4 \text{ M}$	36,6 cd	$\approx 70 \text{ cd}$
Requisito 2, navegando en un canal balizado con boyas	+10 a $\pm 20^\circ$ y -10 a $\pm 20^\circ$	$T_M = 0,223$ $D = 1 \text{ M}$	3,1 cd	$\approx 5,8 \text{ cd}$
Requisito 3, pasando junto a una boya o un par de ellas	+20 a $\pm 90^\circ$	$T_M = 0,001$ $D = 0,05 \text{ M}$	0,0024 cd	$\approx 0,0046 \text{ cd}$

9.1.2. SIGNIFICADO DEL EJEMPLO

El ejemplo mencionado arriba sólo pretende demostrar la teoría de este método de calcular de los requisitos de divergencia vertical de la linterna y no debe entenderse como una especificación de la IALA para las linternas de boya, sino más bien como una indicación de un proceso de diseño. Mediante la consideración de las condiciones de visibilidad y del movimiento de la boya, el proceso mostrado relaciona los requisitos de funcionamiento operativo con la intensidad de la linterna y la divergencia vertical exigida para cumplir dichos requisitos.

Corresponde al diseñador de la ayuda a la navegación asegurarse de que conoce las necesidades operativas y de que dispone de los datos meteorológicos e hidrológicos, así como los de visibilidad y del movimiento de boyas, que necesita para realizar el análisis y llegar a la conclusión correcta.

Por lo tanto, el perfil de la divergencia vertical de una linterna que cumple las necesidades operativas es el siguiente.

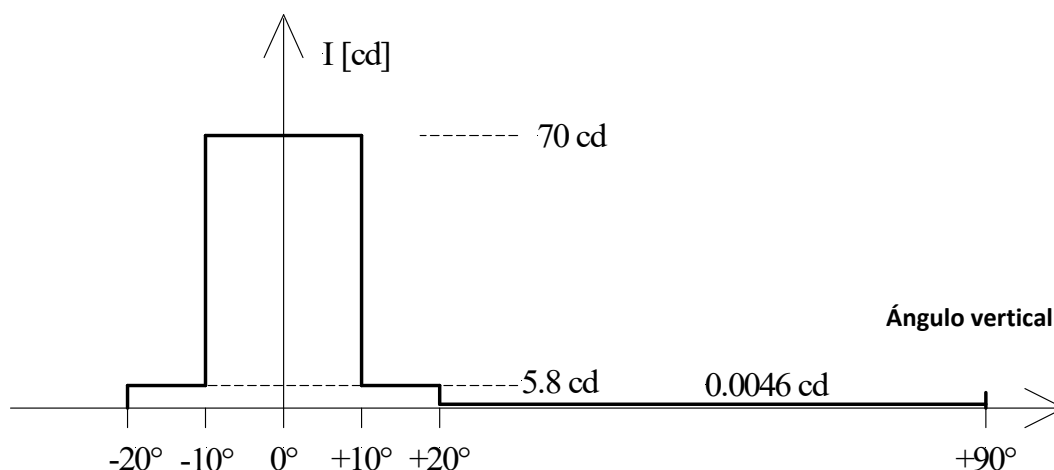


Figura 13 *Curvas de intensidad desarrolladas (valores mínimos)*

9.2. PLATAFORMAS FIJAS

En lo que respecta a las estructuras fijas, se supone que los efectos de las mareas, el viento y el oleaje son nulos. Por lo tanto, sólo es preciso tener en cuenta los efectos geométricos debidos a las alturas relativas de la luz y del observador, así como la distancia entre los dos. Pueden ser extremos, como, por ejemplo, en el caso de una luz ubicada en un acantilado, que también se utiliza por buques de tamaño reducido que pasan a poca distancia. Otro caso que se produce con frecuencia es el de un buque más grande, quizás un buque de carga de mineral a granel, que pasa cerca de una agrupación de balizas iluminadas situadas en un canal estrecho.

En este último ejemplo, cuando el buque pasa por la baliza o entre un par de ellas que forman una puerta, es fundamental que pueda verse la luz desde el puente o su pasarela. En este ejemplo, la luz de la linterna debe ser visible desde el puente en condiciones de transmisividad reducida y a un ángulo agudo de observación. No obstante, puesto que la distancia es reducida, es posible que no se requiera una alta intensidad de luz.

En el caso de muchas luces (p.ej. las luces direccionales o luces de sectores), la distancia mínima de aproximación es mucho mayor que la altura de la luz o del observador. En tal caso, la divergencia vertical mínima depende principalmente de las distintas alturas de los observadores.

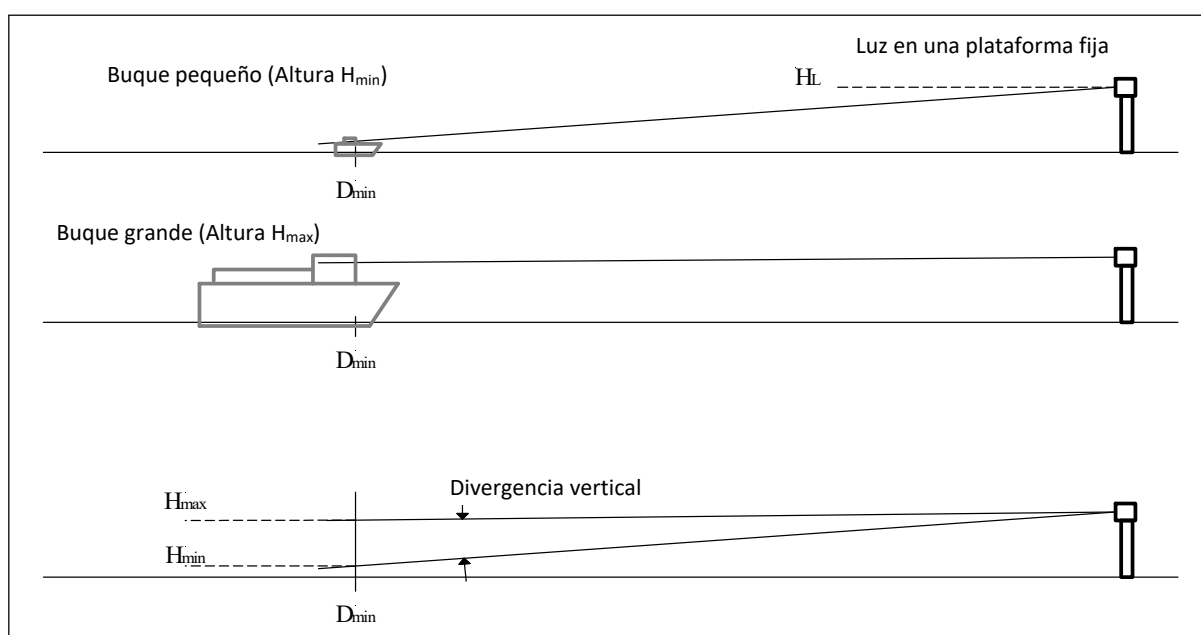


Figura 14 *Influencia de la altura de observación*

Por tanto, puede calcularse el ángulo de divergencia α_r exigido por el diseño mediante la Ecuación 2 con referencia a la Figura 14.

$$\alpha_r = \arctan\left(\frac{H_{\max} - H_{\min}}{D_{\min}}\right)$$

Ecuación 2 *Cálculo del valor de la divergencia vertical necesario*

Donde:

α_r es ángulo de divergencia necesario

$H_{\max}$ es la altura máxima del observador a la distancia de aproximación más cercana desde la luz (m)

$H_{\min}$ es la altura mínima del observador a la distancia de aproximación más cercana desde la luz (m)

$D_{\min}$ es la distancia del observador desde la luz en la aproximación más cercana (m)

Puesto que el ángulo vertical se calcula para la distancia en la aproximación más cercana $D_{\min}$, no es necesario tener toda la intensidad situada por encima del ángulo de divergencia necesario.

El ángulo de divergencia necesario podría representar el valor necesario para el ancho a la mitad de altura (FWHM), o incluso el ancho a la décima parte de altura (FWTM).

Cuando el alcance luminoso necesario o la posición en vertical de la luz son muy elevados, tiene sentido inclinar el eje de referencia (o el plano de referencia, si fuera posible) de la luz para compensar el efecto de la curvatura terrestre (Figura 15). En el caso de una luz omnidireccional, el plano de referencia se transforma en una superficie cónica.

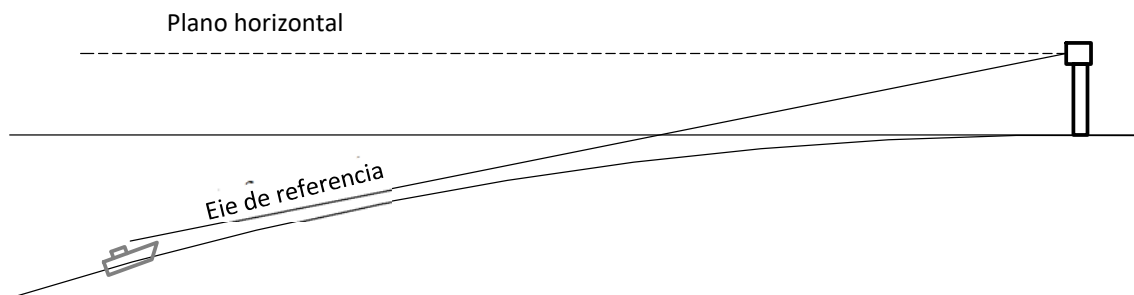


Figura 15 *Compensación de la curvatura terrestre*

En el caso de muchas linternas más pequeñas, no es práctico cambiar la posición relativa de la fuente luminosa y de la lente para conseguir una superficie de referencia cónica. Por tanto, debe calcularse el ángulo de divergencia exigido por el diseño, utilizando la Ecuación 3 con referencia a la Figura 16.

$$\alpha_r = 2 \times \arctan\left(\frac{H_L - H_{min}}{D_{min}}\right)$$

Ecuación 3 *Cálculos adicionales para el ángulo de divergencia*

Donde:

H_L es la altura de la luz (m)

Como en el caso anterior, cuando se supone que el perfil vertical del haz es simétrico, α_r representa el ancho a la mitad de altura (FWHM) o el ancho a la décima de altura (FWTM).

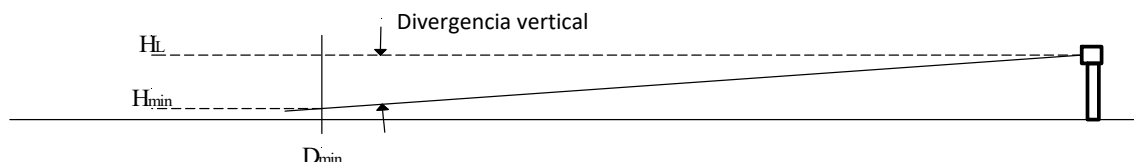


Figura 16 *Divergencia para un ajuste horizontal*

En el caso de las luces que deben utilizarse tanto a largas distancias como cuando el buque pasa cerca, se necesitan distintas intensidades para los diferentes ángulos verticales (Figura 17).

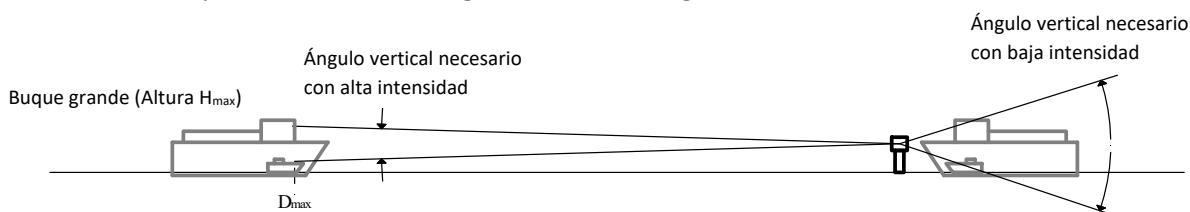


Figura 17 *Ángulos verticales necesarios en función de la distancia*

Un análisis de las intensidades y los ángulos necesarios da como resultado una distribución vertical de la intensidad similar a la que aparece en la Figura 13.

10. ACRÓNIMOS

AtoN	(<i>Marine aid(s) to navigation</i>) Ayuda/s a la navegación marítima
Bf	(<i>Beaufort Scale</i>) Escala de Beaufort
cd	candela/s
D_{min}	Distancia del observador desde la luz en la aproximación más cercana
FWHM	(<i>Full Width Half Maximum</i>) Ancho a la mitad de altura
FWTM	(<i>Full Width Tenth Maximum</i>) Ancho a la décima parte de altura
GRP	(<i>Glass Reinforced Plastic</i>) Plástico reforzado con fibra de vidrio)
H_L	Altura del plano horizontal de la luz (m)
H_m	Elevación (de la marca)
H_o	Elevación (del observador)
H_{max}	Altura máxima del observador a la distancia de aproximación más cercana desde la luz (m)
H_{min}	Altura mínima del observador a la distancia de aproximación más cercana desde la luz (m)
IALA	International Association of Marine Aids to Navigation and Lighthouse Authorities
I_e	Intensidad eficaz
I_{effs}	Intensidad luminosa eficaz bajo condiciones de funcionamiento
I_{nominal}	Intensidad luminosa exigida para el alcance nominal
I_{foto}	Intensidad fotométrica
km	Kilómetro
LED	(<i>Light-Emitting Diode</i>) Diodo emisor de luz
m³	metro/s cúbico/s
M	millas náuticas
POD	(<i>Probability of detection</i>) Probabilidad de detección
R_g	Alcance geográfico
T_c	Duración de la característica
T_m	Transmisividad
To	Duración de la observación
TTC	Centro de Tecnologías del Tráfico (Alemania)
USCG	(<i>United States Coast Guard</i>) Guardia Costera de Estados Unidos
V	Voltio/s
α_r	Ángulo de divergencia vertical necesario

11. REFERENCIAS

- [1] Recomendación R0202 (E-200-2) de la IALA - Señales luminosas marítimas – Cálculo, definición y notación del alcance luminoso, International Association of Marine Aids to Navigation and Lighthouse Authorities (IALA), 2ª edición, diciembre de 2017.
- [2] “Distance to the Horizon”, San Diego State University, Andrew T. Young, 2012. [en Internet, acceso el 18/10/12] http://mintaka.sdsu.edu/GF/explain/atmos_refr/horizon.html
- [3] “Physical properties of the Earth”, NPL Kaye & Laby, Alan Cook. [en Internet, acceso el 18/10/12] http://www.kayelaby.npl.co.uk/general_physics/2_7/2_7_4.html

ANNEX A ESTUDIOS

A 1. DETECCIÓN DE LUCES DE BOYA: EFECTOS DE LOS MOVIMIENTOS Y LA DIVERGENCIA DE LINTERNAS – XII CONFERENCIA DE LA IALA – HOLANDA – 1990

No es competencia de los autores corregir el siguiente informe. No obstante, debe señalarse que algunos de los términos empleados no coinciden con las definiciones proporcionadas en el apartado 4.2.

Esta ponencia fue presentada por la Guardia Costera de los EE.UU. (USCG) y explica un método práctico para medir los movimientos de una plataforma flotante mediante la digitalización de imágenes de vídeo y la medición de ángulos. El objetivo era determinar el alcance al que un navegante tuviera una probabilidad del 80% de detectar la señal (mediante la observación de su luz).

La probabilidad de detección (POD, del inglés, *Probability of Detection*) del 80% forma parte de los criterios de diseño de ayudas flotantes de la USCG. Las otras suposiciones eran una visibilidad atmosférica normal de 10 millas y sin ninguna iluminación de fondo. Los investigadores registraron doce conjuntos de datos recopilados de distintas boyas, todas ubicadas en alta mar, salvo una fluvial. Se consideraron las boyas de la muestra como representativas de los modelos utilizados por la USCG en aquel entonces.

El gráfico de la derecha demuestra cómo se combinan los efectos de la luz de destellos y el balanceo de la boya para reducir la probabilidad de detección de una luz instalada en una ayuda flotante. Es una grabación de 30 segundos del balanceo de una boya provista de una linterna roja de 155 mm, funcionando con una lámpara de 12V/1,15 amperios. Se veía una luz constante (el gráfico de en medio) de destellos o parpadeos, pero el observador sólo detectaba los dos primeros destellos de la luz (gráfico de la parte inferior). El movimiento de la boya impedía que se vieran los tres destellos restantes.

Otro resultado relevante fue la inclinación inesperada, que oscilaba entre 1º y 7,4º. Los investigadores no pudieron encontrar ninguna correlación directa entre estas inclinaciones duraderas y las corrientes de marea o cualquier otro efecto probable. Concluyeron, que no se podía atribuir la inclinación a una sola fuerza predominante concreta (p.ej. el viento/superficie vélica de la boya, amarres, balanceo, etc.) y las causas quedan aún por determinar.

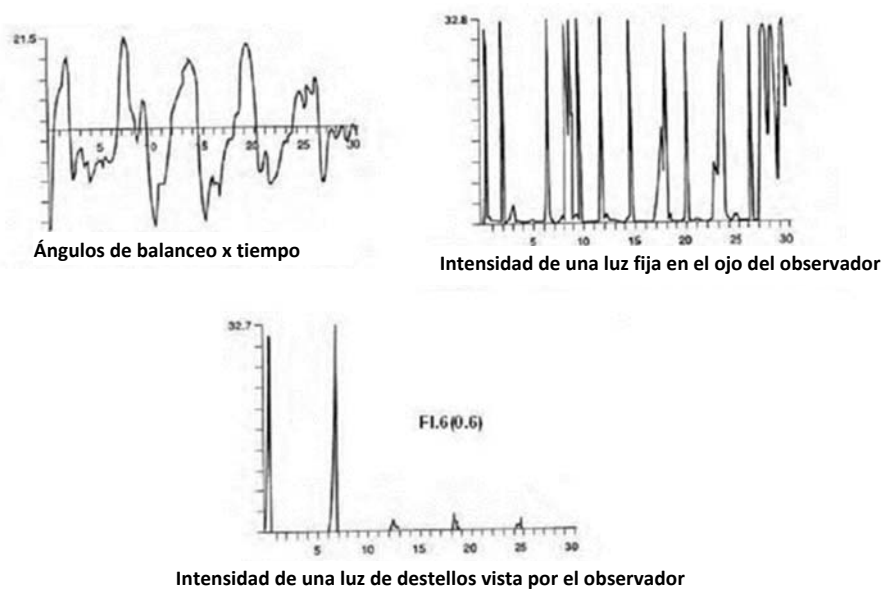


Figura 18 Efecto combinado del movimiento de boyas y luces de destellos

El efecto global de las luces en la probabilidad de detección es que se debe añadir al balanceo un ángulo de inclinación permanente, que disminuye aún más la probabilidad de detección. Figura 19.

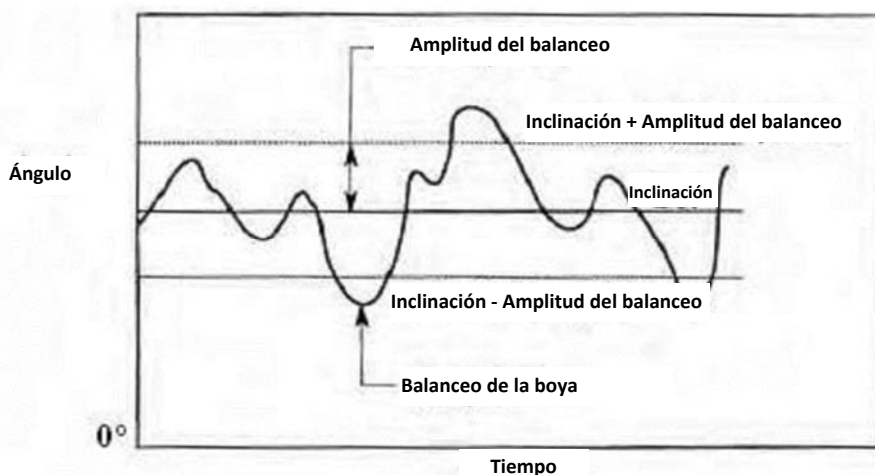


Figura 19 *Efecto combinado del balanceo y la inclinación (escora)*

El estudio pone de manifiesto que un incremento de la divergencia vertical de las luces mejora, de manera significativa, la probabilidad de detección, aunque la intensidad de pico de la linterna sufre una cierta pérdida, dando lugar a una disminución global del alcance máximo.

En la ponencia, se presentan seis gráficos parecidos al gráfico que figura a continuación, que representan la relación entre el alcance y la divergencia vertical. Existen tres curvas. La línea continua representa la pérdida de la intensidad de pico en función de la divergencia de una ayuda fija en el mismo plano que el ojo del observador. La línea de puntos y rayas representa el efecto de la divergencia en función de una inclinación de 5,1°. Por último, la línea de puntos representa una inclinación de 2,6°. Es evidente que, para ángulos de divergencia vertical superiores a 10 grados, las tres curvas tienden a alinearse en torno a un alcance nominal de 4 millas náuticas. El estudio concluyó que dicha alineación se produjo, en la mayoría de las muestras, con divergencias de entre 7° y 10°.

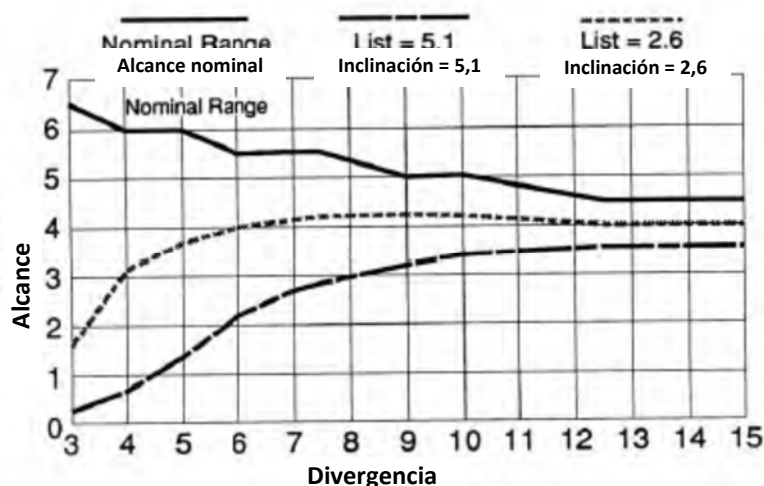


Figura 20 *Efecto del movimiento de boyas (inclinación) en una serie de luces de AtoN (ponencia de USCG)*

En algunos gráficos, cuando existe una inclinación muy por encima de los 10 grados, el alcance sigue mejorando. Sin embargo, la ponencia señala que no sería práctico tener linternas con divergencias adaptadas a cada aplicación.

La ponencia presentó las siguientes conclusiones:

“Si existe movimiento o inclinación, nunca se consiguen los alcances nominales de diseño de las boyas, incluso si tal movimiento o inclinación es mínimo. Siempre existe movimiento o inclinación en las boyas, salvo en las condiciones atmosféricas y marinas más tranquilas.”

“Los resultados apoyan las siguientes observaciones y tendencias generales:

- El alcance nominal no es una medida realista del alcance de detección de una boya iluminada.
- Más que el movimiento de boyas, la inclinación supone un problema grave, que merece una investigación más profunda.
- Aumentar la divergencia de la lente puede incrementar, de forma significativa, el alcance de la probabilidad de detección del 80% de una boya.”

A 2. BUEN EQUILIBRIO ENTRE LA INTENSIDAD LUMINOSA HORIZONTAL Y LA DIVERGENCIA VERTICAL DE LINTERNAS MARINAS DE BOYAS ILUMINADAS / CRITERIOS PARA LA EVALUACIÓN DE LA INTENSIDAD LUMINOSA – XV CONFERENCIA DE LA IALA– AUSTRALIA – 2002.

El segundo estudio, presentado por la Administración Federal Alemana de Vías Navegables – Centro de Tecnologías del Tráfico (TTC), compara la divergencia vertical de varias linternas que se utilizan como ayudas generales a la navegación y, asimismo, presenta los resultados de la medición del movimiento de boyas en el Mar Norte.

La conclusión en cuanto al movimiento de boyas fue que “*la intensidad luminosa más fiable para el 90% del tiempo se consigue con un valor de 11,3° de la distribución de la intensidad vertical*”. Dicho valor es muy cercano al de la divergencia de 10° comentado en el estudio citado anteriormente de la USCG. Además, los investigadores descubrieron que “*existe poca probabilidad (7%) de que la boya se incline (escore) hasta un ángulo de 30°*”. El gráfico de los ángulos de balanceo de la boya en función del tiempo del estudio de la USCG registra ángulos de balanceo globales de casi 40°.

El siguiente conjunto de gráficos, extraídos del documento original, muestra los resultados:

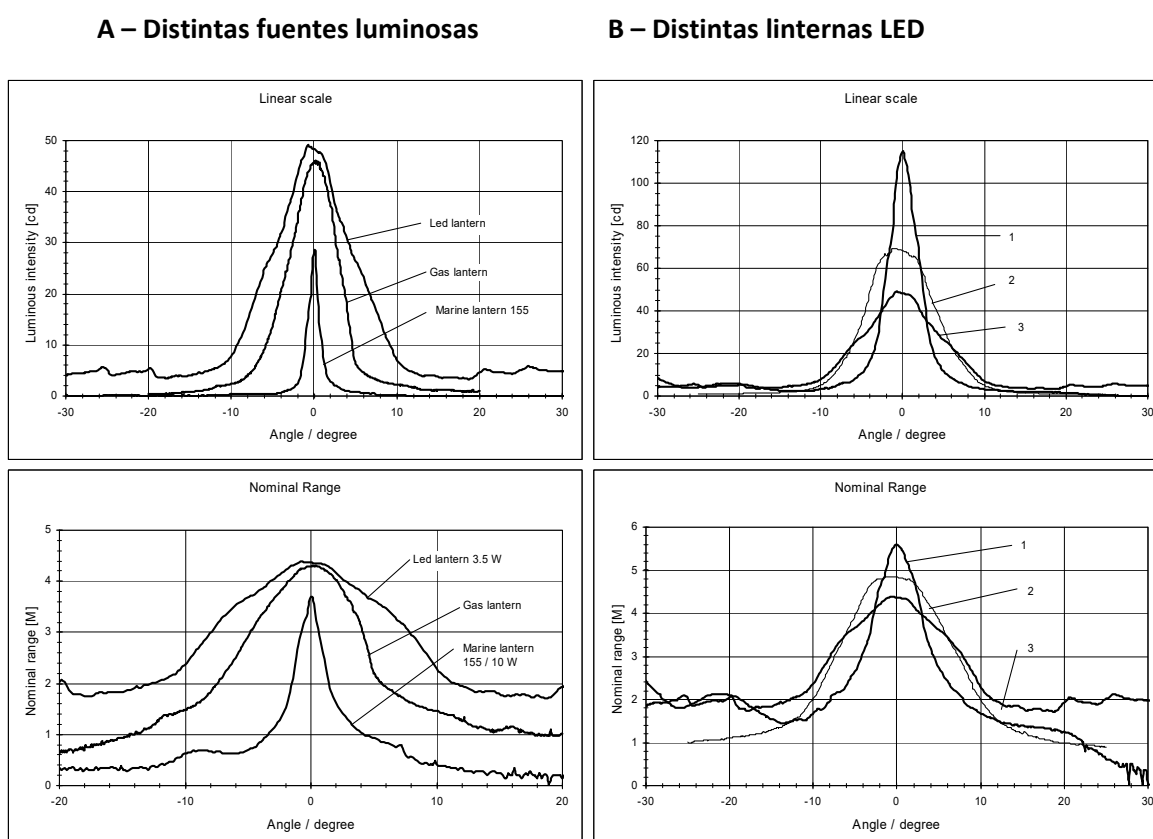


Figura 21 Efecto de la divergencia en la intensidad luminosa y el alcance nominal de las linternas de boya típicas (de la ponencia de la Administración Federal Alemana de Vías Navegables)

En la parte superior de la columna A, se puede ver la comparación entre muestras de linternas típicas de LED, de gas y eléctricas de 155 mm. En la parte inferior, se puede apreciar la variación del alcance luminoso de una luz fija en condiciones de visibilidad nominal de $V = 10$ M. En la columna B, se muestran los mismos resultados para linternas de LED, con tres curvas de divergencia vertical distintas.

A 3. EFECTOS DEL MOVIMIENTO DE BOYAS EN EL RECONOCIMIENTO DEL CARÁCTER (TRINITY HOUSE)

Trinity House ha realizado otros estudios que se centran, principalmente, en los efectos del movimiento dinámico de la plataforma flotante en el reconocimiento de la luz. En concordancia con ellos, un análisis simplificado del movimiento de boyas demuestra que la escora y el balanceo provocan los efectos principales. Se grabaron en vídeo los movimientos de una boya de acero de 3 metros de diámetro. Después, se analizaron para obtener el trazado del ángulo de balanceo representado por la curva inferior en el gráfico a continuación.

A 3.1. DIVERGENCIA VERTICAL REDUCIDA ($\text{FWHM} = 7^\circ$):

La linterna utilizada en este análisis era una linterna LED con el siguiente perfil de divergencia y alcance en función de la curva del ángulo, con una divergencia vertical total de 7° en los puntos del 50%.

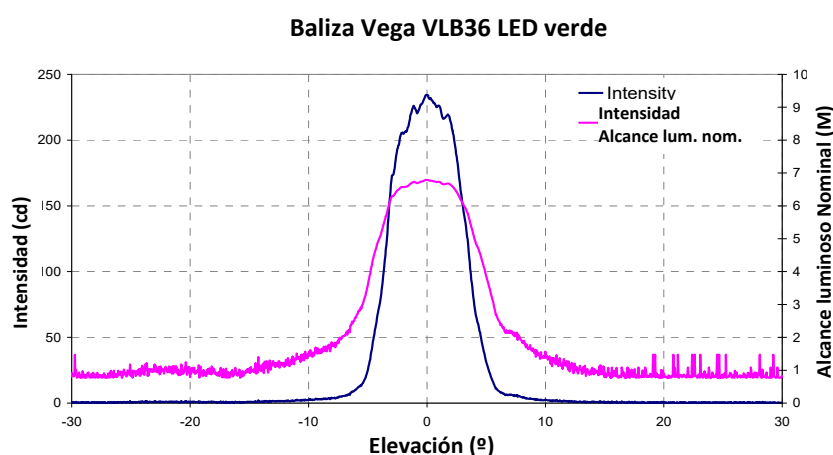


Figura 22 *Datos de la linterna utilizada en el estudio de Trinity House - Divergencia vertical de 7°*

En el siguiente gráfico, el alcance visible de la linterna se traza como la curva superior, que se obtuvo relacionando el ángulo de escora de la boya con la intensidad de la linterna a ese ángulo, medido en una instalación de medición de luces. Después, para convertir la intensidad al alcance luminoso, se aplicó un cálculo.

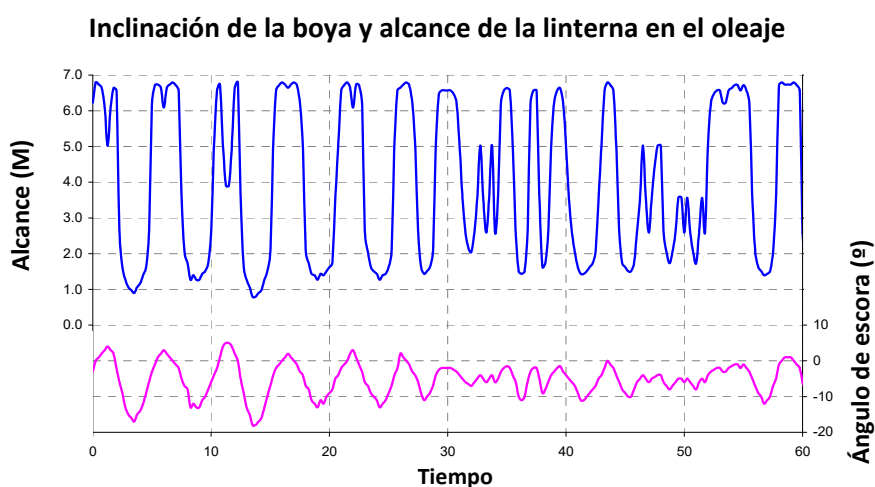


Figura 23 *Inclinación de la boya y alcance de la linterna en el oleaje, basado en el estudio de Trinity House*

A continuación, se emplearon los resultados del análisis como datos de entrada para un estudio enfocado a calcular la característica aparente de una linterna, observada a una distancia de cuatro millas, en el peor lugar posible, en cuanto al movimiento de la boya. En la parte superior del siguiente gráfico, el carácter de cardinal sur se representa como una serie de puntos y rayas. Una segunda serie de puntos y rayas representa el carácter aparente (en el supuesto punto de observación de cuatro millas), tal como se ve modificado por el comportamiento de la boya. En este ejemplo, es evidente que gran parte de la característica se pierde. También es evidente que, a lo largo del periodo de observación de un minuto, se podía detectar y, posiblemente, identificar el carácter de cardinal sur, pero que no podía confirmarse.

Es importante resaltar algunas suposiciones que se hicieron para simplificar el estudio, que figuran a continuación:

- El observador está parado y no se acerca a la boya;
- No se tienen en cuenta la inteligencia y experiencia del observador.

Efecto del oleaje en el reconocimiento de la característica

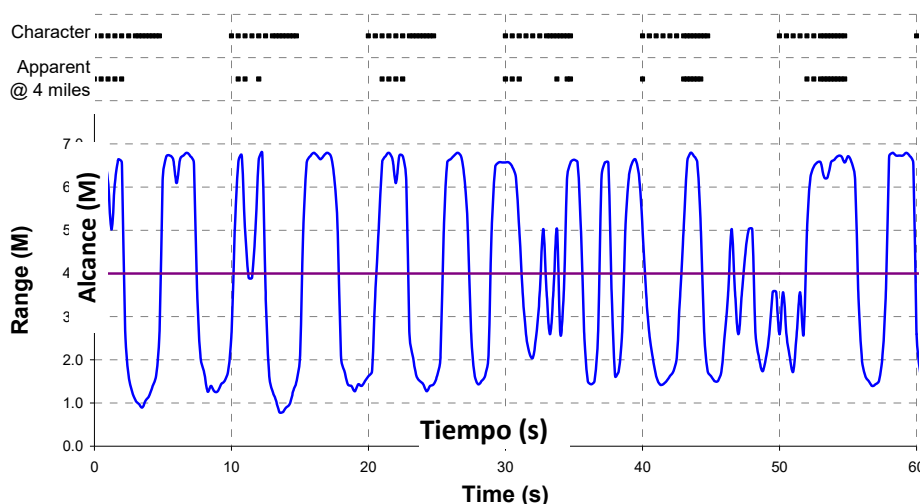


Figura 24 *Efecto del movimiento de boyas en el reconocimiento de la característica, a una distancia de 4 millas, de una linterna con una divergencia vertical de 7°, del estudio de Trinity House*

A 3.2. ÁNGULO VERTICAL AMPLIO (FWHM = 21°):

Trinity House repitió este análisis utilizando los datos de una linterna con una divergencia vertical más amplia de 21° en total. Se corrigieron los datos de la intensidad para dar la misma área bajo la curva de intensidad que la de la primera linterna con una divergencia vertical de 7°. Después, se determinó de nuevo el efecto en el reconocimiento de la linterna por un observador supuesto a un alcance de cuatro millas.

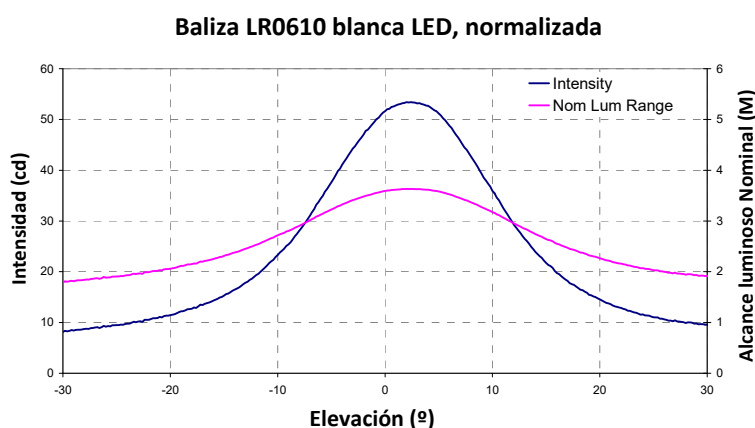


Figura 25 *Datos de linterna empleados en el estudio de Trinity House - Divergencia vertical de 21º*

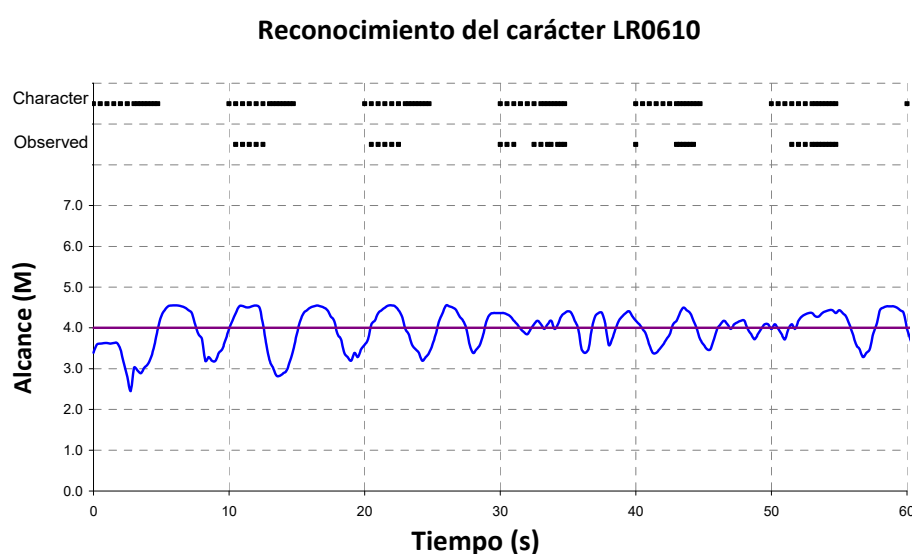


Figura 26 *Efecto del movimiento de boyas en el reconocimiento de la característica, a una distancia de 4 millas, de una linterna con una divergencia vertical de 21º, del estudio de Trinity House*

A 3.3. COMPARACIÓN

Con respecto a la linterna con una divergencia más estrecha, ésta, con una divergencia más amplia, presentó alguna mejora en el reconocimiento a una distancia de cuatro millas. No obstante, el efecto resulta mucho más marcado si se repite el estudio de las dos linternas a una distancia de 3 millas. Los dos gráficos a continuación demuestran claramente el beneficio de aumentar la divergencia vertical, incluso a costa de una merma de la intensidad de pico.

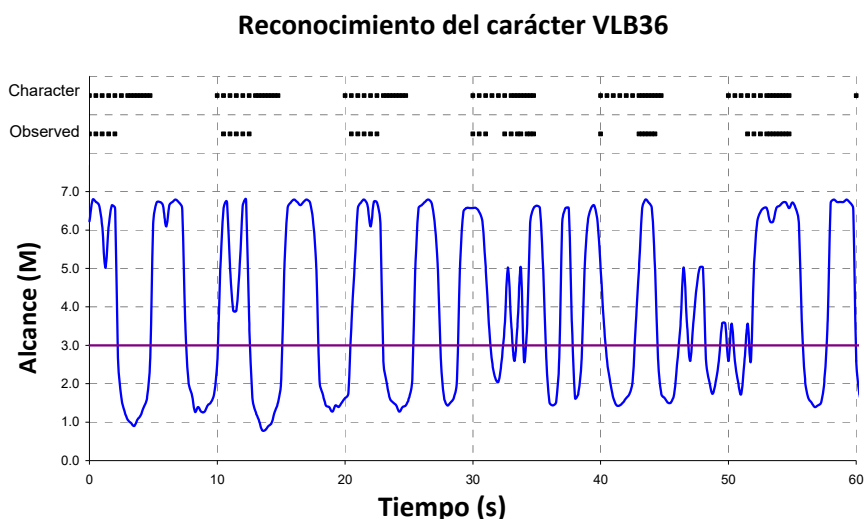


Figura 27 *Efecto del movimiento de boyas en el reconocimiento de la característica, a una distancia de 3 millas, de linternas con 7° (gráfico superior) y 21° (gráfico inferior) de divergencia vertical, del estudio de Trinity House*

NOTA Complementa a la Figura 26.

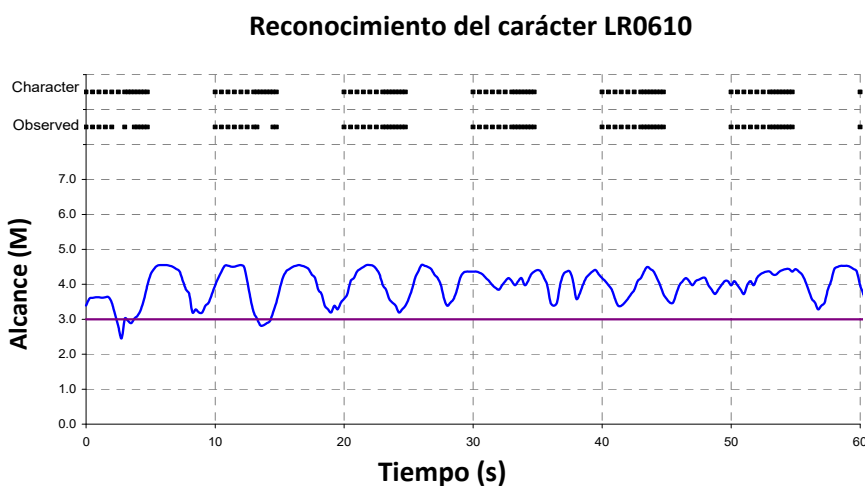


Figura 28 *Efecto del movimiento de boyas en el reconocimiento de la característica, a una distancia de 3 millas, de linternas con 7° (gráfico superior) y 21° (gráfico inferior) de divergencia vertical, del Estudio de Trinity House (complementa a la Figura 25)*

NOTA Complementa a la Figura 25

En la última parte de este estudio de Trinity House, se compararon los caracteres modificados de linternas de cardinal norte y sur, ubicadas en el mismo emplazamiento. Es evidente que los dos patrones de destello son muy distintos, pero también queda claro que ningún carácter se podía confirmar con la metodología señalada en el apartado 3 de este documento. También es indicativo de los problemas que puedan asociarse a la identificación y confirmación de los caracteres de cardinal este y oeste, puesto que son menos notorios.

A 3.4. CONCLUSIÓN

En las lentes modernas de tecnología LED, no es adecuada la utilización del ancho a la mitad de altura (FWHM) para la especificación de la divergencia de linternas. La divergencia de las linternas debe elegirse considerando

debidamente el movimiento probable de la boya y especificarse el perfil de divergencia. La intensidad de pico no es una medida crítica del funcionamiento.

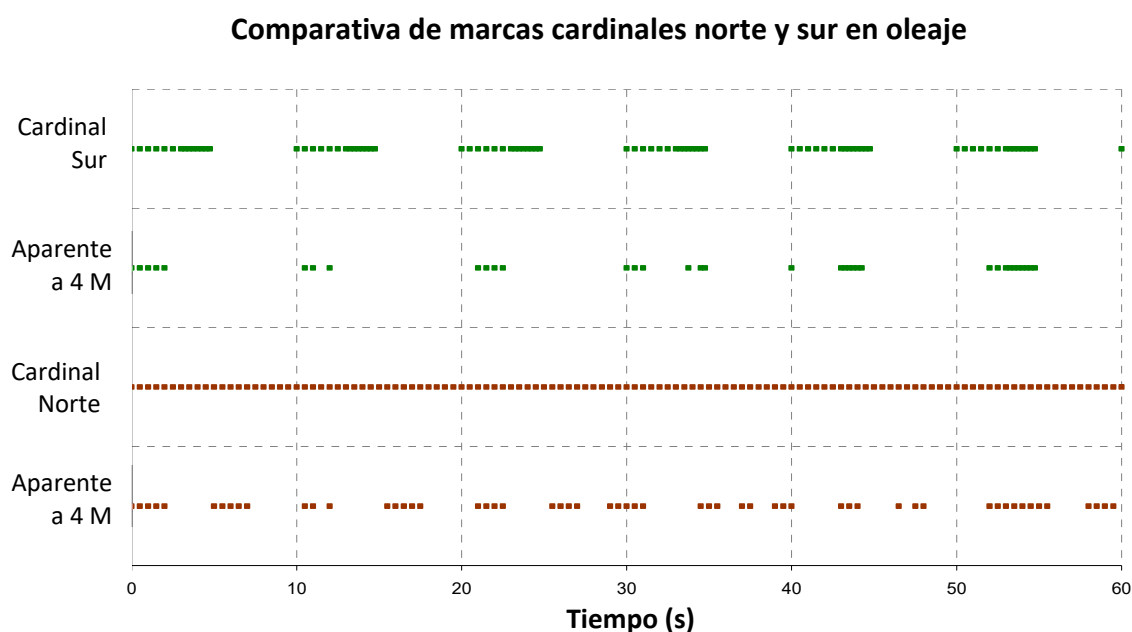


Figura 29 Efecto del movimiento de boyas en el reconocimiento de caracteres cardinales, del estudio de *Trinity House*

A 4. SEGUNDO ESTUDIO DE TRINITY HOUSE

Este último apartado considera las recomendaciones del estudio del Centro de Tecnologías del Tráfico (TTC) citado arriba y otra ponencia presentada a la IALA por Trinity House of London en el año 1982. El objetivo de ambos documentos era establecer un perfil vertical óptimo para las linternas de ayuda a la navegación de boyas.

Los fabricantes de linternas pueden sacar provecho del siguiente debate sobre la concepción y fabricación de linternas aptas para las boyas. Asimismo, se recomienda que consulten los estudios originales para obtener una información completa sobre los temas citados a continuación.

El autor del documento de 1982 afirmó que, basado en sus conocimientos técnicos y experiencia, “el haz de una boya que se encuentra principalmente en situaciones meteorológicas de calma con corrientes de marea debería ser como la Curva 2B y, en mar gruesa, como la curva 3B”. Las divergencias totales de los dos haces son, respectivamente, 35° y 55°.

La curva 1B es el resultado de un ensayo práctico y el autor recomienda la utilización de la linterna correspondiente en las boyas situadas “en aguas tranquilas con una inclinación que no supere $\pm 10^\circ$ ”.

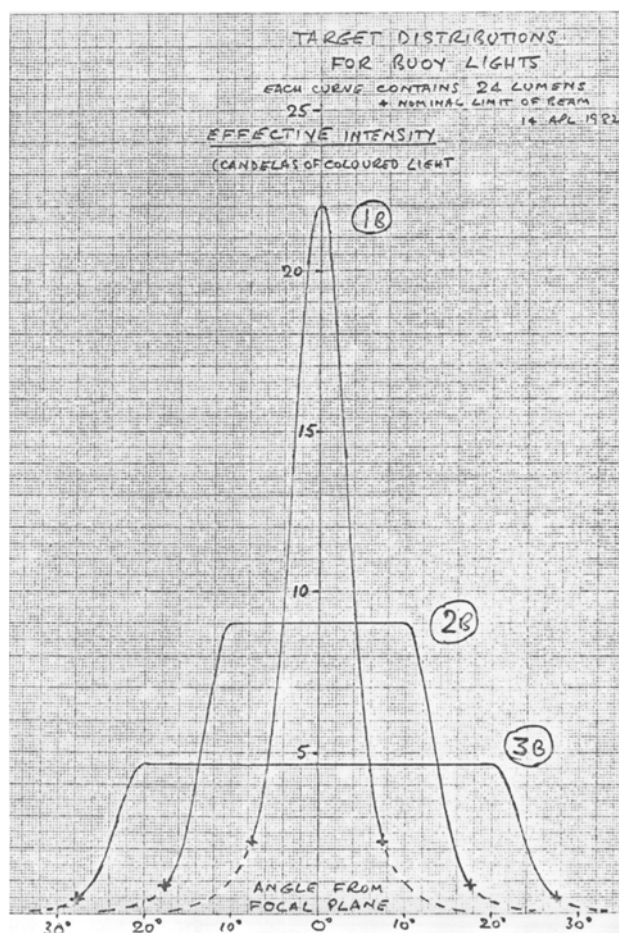


Figura 30 *Distribuciones objetivas de intensidad vertical*

El objetivo del documento es “preparar diseños ópticos adecuados de lentes... para producir las distribuciones de intensidad 2B y 3B.”

En este documento anterior, se llega a conclusiones parecidas a las de los trabajos mencionados más arriba en esta guía; es decir, los trabajos realizados por la USCG, la Administración Federal Alemana de Vías Navegables y Trinity House.

A 5. ESTUDIO DEL CENTRO DE TECNOLGÍAS DEL TRÁFICO DE VÍAS NAVEGABLES DE ALEMANIA

Con el fin de complementar esta conclusión sobre la necesidad de tener una divergencia amplia o un patrón “más plano” para las linternas utilizadas en boyas, el documento del TTC, citado anteriormente, contiene una propuesta interesante que merece la pena considerar como un patrón práctico para su adopción en el diseño de linternas.

En el gráfico a continuación, se resume el patrón propuesto, donde se puede apreciar que la intensidad luminosa necesaria para el alcance nominal (I_{nominal}) debe poder conseguirse con un ángulo de ± 10 grados, definiéndose la curva aún más por los pasos del 40% I_{nominal} y del 10% I_{nominal} .

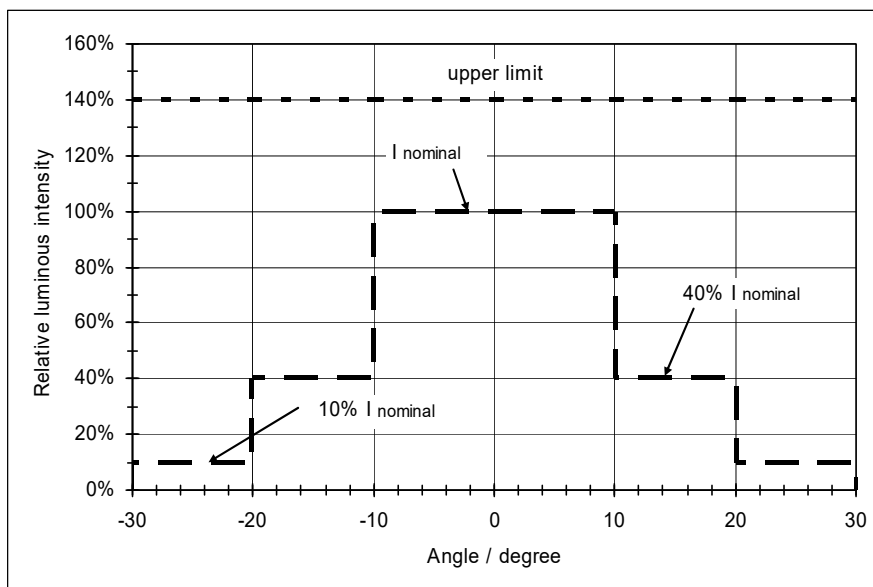


Figura 31 Perfil propuesto de intensidad vertical

A 6. ESTUDIO REALIZADO POR LA DIRECCIÓN DEL MAR DEL NORTE, PAÍSES BAJOS

El cálculo de estabilidad de una boya de 12,5 m³ pone de manifiesto que el ángulo estático de escora, producido por un viento de fuerza 7 de la escala de Beaufort, ya es de 7 grados. Además, un viento de fuerza 10 de la escala de Beaufort da como resultado un ángulo de 32 grados (véase el gráfico a continuación). En este caso, no se tienen en cuenta los movimientos del oleaje. La boya de 12,5 m³ es una boya de acero con faldón de un diámetro de 3,20

m, que pesa 4 toneladas y tiene una altura metacéntrica de 0,35 m.

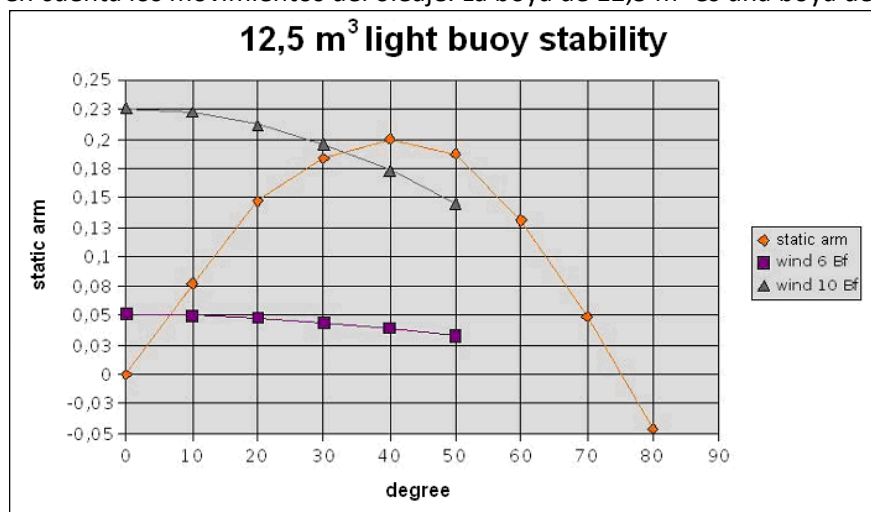


Figura 32 Gráfico de estabilidad de una boya iluminada

Aunque la estabilidad de una boya sintética es mucho mayor que la de una de acero, seguirá los movimientos del oleaje porque pesa menos, por lo cual el ángulo de escora también será considerable. Una boya de plástico de un diámetro de 3,00 m tiene una altura metacéntrica de aproximadamente 1,00 m y pesa alrededor de 2,5 toneladas.

ANNEX B ESPECIFICACIONES DE EJEMPLO

B 1. ESPECIFICACIÓN ALEMANA DE LA INTENSIDAD DE BALIZAS PARA BOYAS DE GRAN TAMAÑO

B 1.1. COMENTARIOS GENERALES

Las especificaciones se emplearon y se publicaron en 2003 con motivo de una licitación pública europea para casi 1.000 balizas. Fue aceptada por 4 fabricantes (3 de los cuales eran Miembros de la IALA) y se recibieron balizas de prueba de 3 de ellos.

La intensidad total es distinta para cada color. El perfil relativo es idéntico para todos los colores.

La intensidad luminosa se define mediante la siguiente geometría. Para la medición, el horizonte se define por la parte inferior de la baliza. Todos los valores son intensidades fotométricas luminosas.

B 1.2. GEOMETRÍA

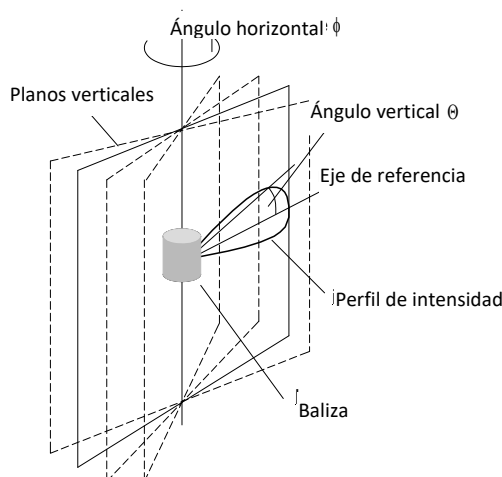


Figura 33 Planos verticales según la Recomendación serie E-200 de la IALA

B 1.3. INTENSIDAD NOMINAL

La intensidad nominal para cada color es la intensidad fotométrica luminosa mínima de una luz fija en el horizonte. Las intensidades nominales y los valores mínimos para las intensidades horizontales son:

Tabla 5 Intensidades fotométricas nominal y mínima de luces de distintos colores

Color	Intensidad nominal	Intensidad máxima
Blanco	120 cd	180 cd
Verde	40 cd	60 cd
Rojo	40 cd	60 cd
Amarillo	30 cd	45 cd

Los perfiles mínimos se muestran en las figuras a continuación. Para todos los ángulos horizontales $0 \leq \Phi < 360^\circ$, el perfil de intensidad medido debe situarse por encima del perfil mínimo.

B 1.4. PERFILES DE INTENSIDAD

B 1.4.1. BLANCO

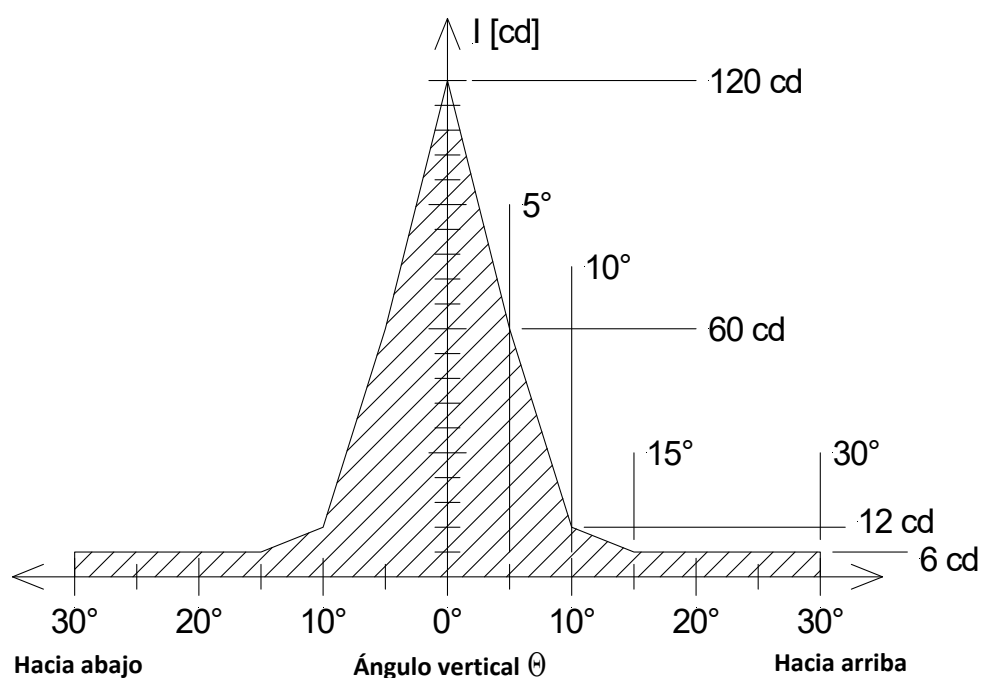


Figura 34 Perfil de intensidad mínimo para el blanco

B 1.4.2. VERDE / ROJO

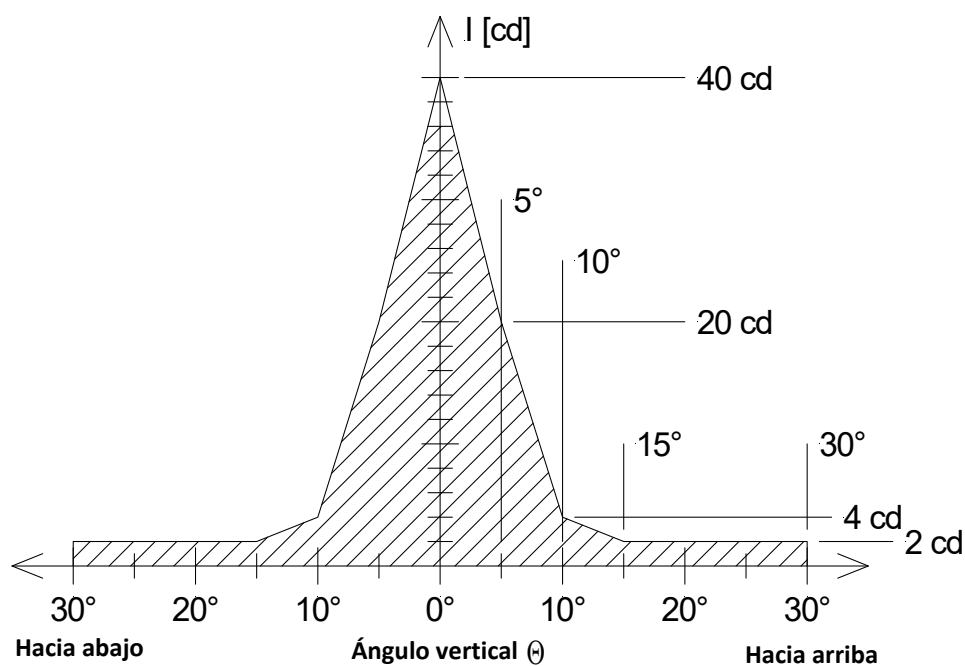


Figura 35 *Perfil de intensidad mínimo para el rojo y el verde*

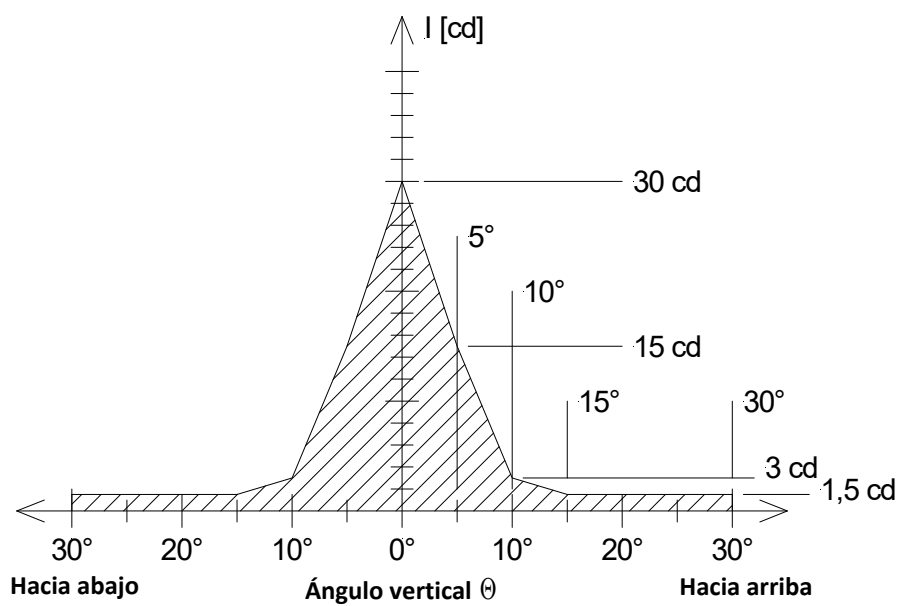


Figura 36 *Perfil de intensidad mínimo para el amarillo*

B 1.5. DESCRIPCIÓN MATEMÁTICA

Blanco (120 cd):

Tabla 6 Perfiles de divergencia vertical mínima para los distintos colores

Ángulo vertical	Función
-5° a +5°	$I_{\min}(\theta) = 120 \text{ cd} - 12 \text{ cd} * (\theta / 1^\circ)$
-10° a -5° y +5° a +10°	$I_{\min}(\theta) = 108 \text{ cd} - 9,6 \text{ cd} * (\theta / 1^\circ)$
-15° a -10° y +10° a +15°	$I_{\min}(\theta) = 24 \text{ cd} - 1,2 \text{ cd} * (\theta / 1^\circ)$
-30° a -15° y +15° a +30°	$I_{\min}(\theta) = 6 \text{ cd}$

Verde y rojo (40 cd):

Ángulo vertical	Función
-5° a +5°	$I_{\min}(\theta) = 40 \text{ cd} - 4 \text{ cd} * (\theta / 1^\circ)$
-10° a -5° y +5° a +10°	$I_{\min}(\theta) = 36 \text{ cd} - 3,2 \text{ cd} * (\theta / 1^\circ)$
-15° a -10° y +10° a +15°	$I_{\min}(\theta) = 8 \text{ cd} - 0,4 \text{ cd} * (\theta / 1^\circ)$
-30° a -15° y +15° a +30°	$I_{\min}(\theta) = 2 \text{ cd}$

Amarrillo (30 cd):

Ángulo vertical	Función
-5° a +5°	$I_{\min}(\theta) = 30 \text{ cd} - 3 \text{ cd} * (\theta / 1^\circ)$
-10° a -5° y +5° a +10°	$I_{\min}(\theta) = 27 \text{ cd} - 2,4 \text{ cd} * (\theta / 1^\circ)$
-15° a -10° y +10° a +15°	$I_{\min}(\theta) = 6 \text{ cd} - 0,3 \text{ cd} * (\theta / 1^\circ)$
-30° a -15° y +15° a +30°	$I_{\min}(\theta) = 1,5 \text{ cd}$

B 2. ESPECIFICACIÓN ALEMANA DE INTENSIDAD DE LUCES PARA LA SEÑALIZACIÓN DE PARQUES EÓLICOS SITUADOS MAR ADENTRO

La IALA recomienda la señalización “de las estructuras periféricas significativas (SPS, del inglés, *Significant Peripheral Structures*) de un parque eólico con luces de un alcance de al menos 5 millas náuticas” (Recomendación O-139 de la IALA “Señalización de las estructuras artificiales situadas mar adentro”).

No obstante, los cálculos para la intensidad necesaria son ambiguos.

Por lo tanto, a partir de la Recomendación de la IALA (utilizando las herramientas de la serie E-200 de Recomendaciones de la IALA sobre Señales luminosas marítimas), la Administración alemana desarrolló una descripción fotométrica precisa.

Se supuso que el alcance de la Recomendación O-139 de la IALA era el alcance (luminoso) de la luz.

El alcance nominal se basa en una transmisividad atmosférica $T_M = 0,7411$ y una iluminancia en el ojo del observador de $E_t = 2 \cdot 10^{-7} \text{ lx}$ (sin iluminación de fondo), lo que da como resultado una intensidad luminosa eficaz, en condiciones de funcionamiento, de $I_{\text{eff},s}$.

$$I_{\text{eff},s} = 76,7 \text{ cd}$$

El siguiente paso consiste en calcular la intensidad fotométrica luminosa I_{foto} necesaria para la nueva luz.

El factor de la condición de funcionamiento es 0,75.

La duración mínima de destello es de 1s y se supone que es rectangular la intensidad luminosa dependiente del tiempo.

$$I_{photo} = \frac{1}{0.75} \times \frac{0.2s + 1s}{1s} \times I_{effs} = 1.33 \times 1.2 \times I_{effs}$$

Ecuación 4 Cálculo de intensidad fotométrica

Donde:

I_{foto} es la intensidad fotométrica

I_{effs} es la intensidad luminosa eficaz en condiciones de funcionamiento

La intensidad fotométrica necesaria es:

$$I_{photo} = 1.33 \times 1.2 \times 76.7 \text{ cd} \approx 120 \text{ cd}$$

Ecuación 5 Valores para la Ecuación 6

Se eligió dicha intensidad luminosa como la intensidad luminosa mínima en el horizonte.

En función de la estructura del parque eólico, se comprobó que era suficiente ofrecer una divergencia vertical (ancho a la mitad de altura - FWHM) de aproximadamente 5 grados. Para evitar la ambigüedad, dicho valor se transformó en un valor mínimo de al menos 50% de 120 cd en los ángulos verticales de $\pm 2,5^\circ$.

La baliza de 5 millas náuticas resultante se emplea en todos los aerogeneradores periféricos y no se utiliza una de 2 millas náuticas. Para evitar la contaminación lumínica, existía la necesidad de un límite superior de la intensidad luminosa (perfil máximo). El perfil máximo se eligió de tal manera que es probable que los fabricantes sigan produciéndolo.

Los perfiles máximo y mínimo resultantes se muestran en la siguiente figura.

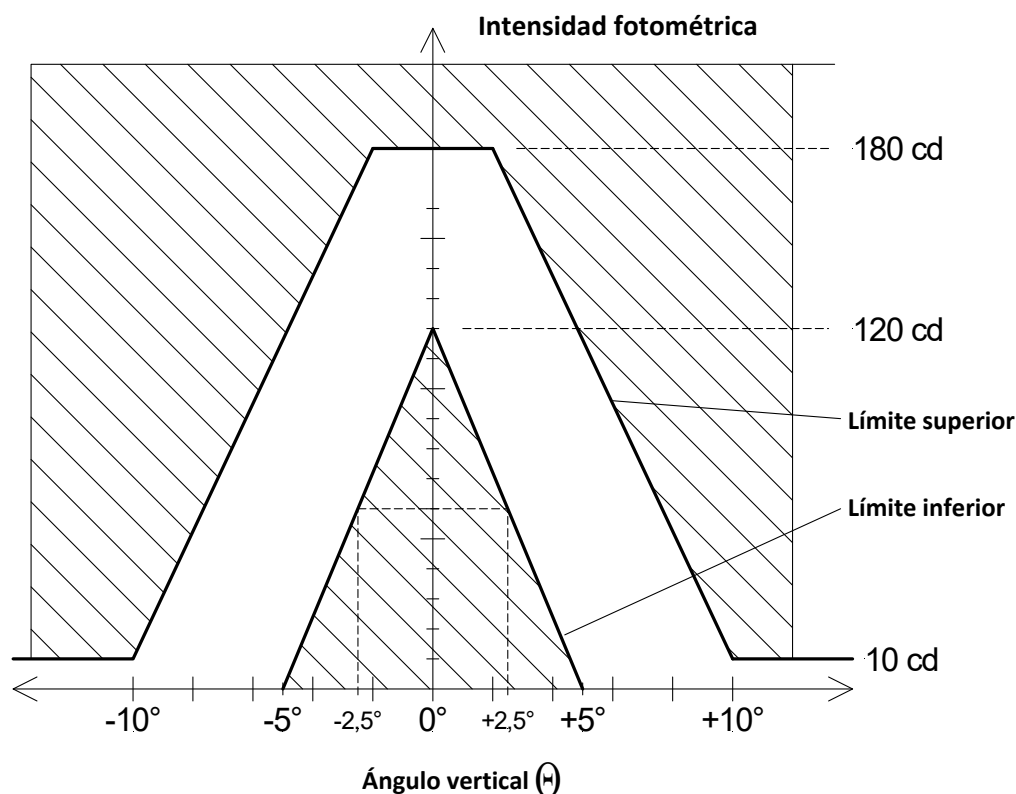


Figura 37 Perfiles máximo y mínimo resultantes

ANNEX C ANÁLISIS DE LA DIVERGENCIA VERTICAL DE LUCES FIJAS

C 1 MÉTODO

Debido a refracción, la luz de una linterna seguirá un trayecto levemente curvada. Se supondrá que la curva tiene un radio fijo a lo largo del trayecto. El radio del trayecto curvado de luz se tomará como 7 veces el radio de la tierra [2].

El radio de la tierra utilizado será 6.371 km, el radio medio de la referencia [3].

Se calculará el ángulo al observador a varias distancias y se trazará en función de la intensidad mínima necesaria para esas distancias. Los Anexos 2 y 3 recogen la derivación de las fórmulas empleados para dicho cálculo.

Cabe señalar que la acción del oleaje afectará a la altura del observador, pero que será insignificante al compararla con la distancia de observación, salvo a las distancias más cortas, que se puede obviar mediante un margen de seguridad en el requisito de intensidad.

Alternativamente, para tener en cuenta la acción del oleaje, se podrían realizar dos trazados para las alturas máxima y mínima del observador. Además, si ya se han trazado las dos alturas del observador, los trazados podrían servir para la altura del observador más baja y la más alta, de forma que, para una altura determinada de la fuente, estén cubiertos todos los observadores.

Puede ampliarse este concepto para producir un trazado general que cubra una serie de escenarios. Las situaciones que darán como resultado unos ángulos de observación amplios son una altura de la fuente baja con un observador a una altura elevada, y una altura elevada de la fuente con un observador a una altura baja. Ambas se ven algo limitadas por el alcance geográfico y, por lo tanto, sólo son relevantes para las intensidades más bajas. Utilizando una fuente y un observador elevados, se puede trazar una tercera serie de puntos que dan como resultado valores relevantes a alcances mayores. Para confirmar la idoneidad en todas las aplicaciones, el trazado de la divergencia vertical de una linterna medida debe abarcar todos los trazados del “ángulo al observador”.

C 2 RESULTADO

Figura 38, se muestra los requisitos mínimos de intensidad en los ángulos de observación para una altura de la fuente de 30 m y una altura del observador de 10m. Estos están calculados para alcances entre 1M y 18M.

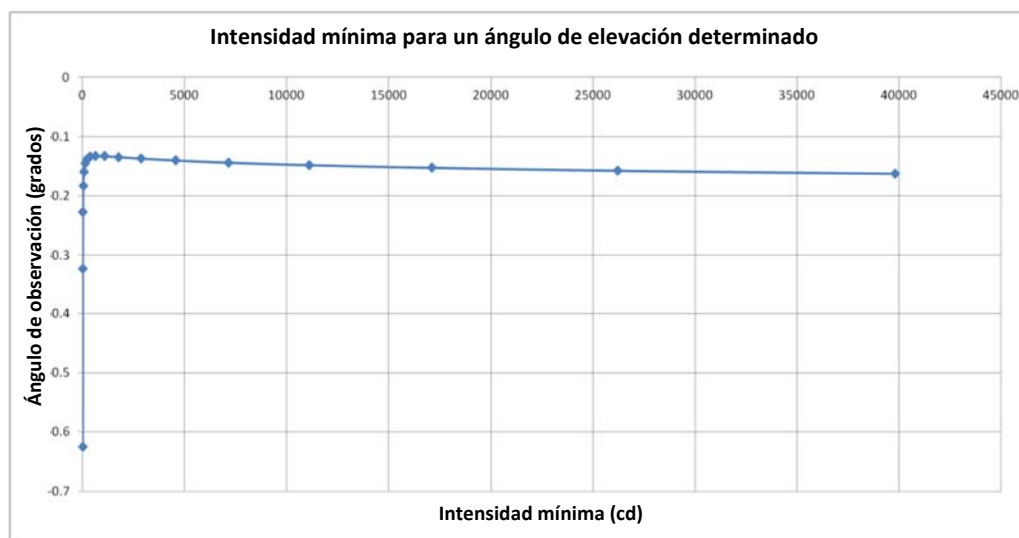


Figura 38 Intensidades mínimas en los ángulos de observación Fuente a una altura de 30 m y observador a una altura de 10 m

La curva trazada para una fuente medida debe abarcar por completo (hasta la intensidad máxima necesaria para la estación concreta) el requisito mínimo indicado en la Figura 38.

Por ejemplo, en la Figura 39, se muestran las mediciones teóricas de una fuente luminosa que no cumple los requisitos de intensidad. El haz medido es estrecho y cualquier fallo será de ángulos muy reducidos. Además, el haz no cruza 0°.

Cuando se le compara con las linternas prácticas, es evidente que el haz es inusual, pero se presenta sólo como un modo de demostrar el uso del gráfico.

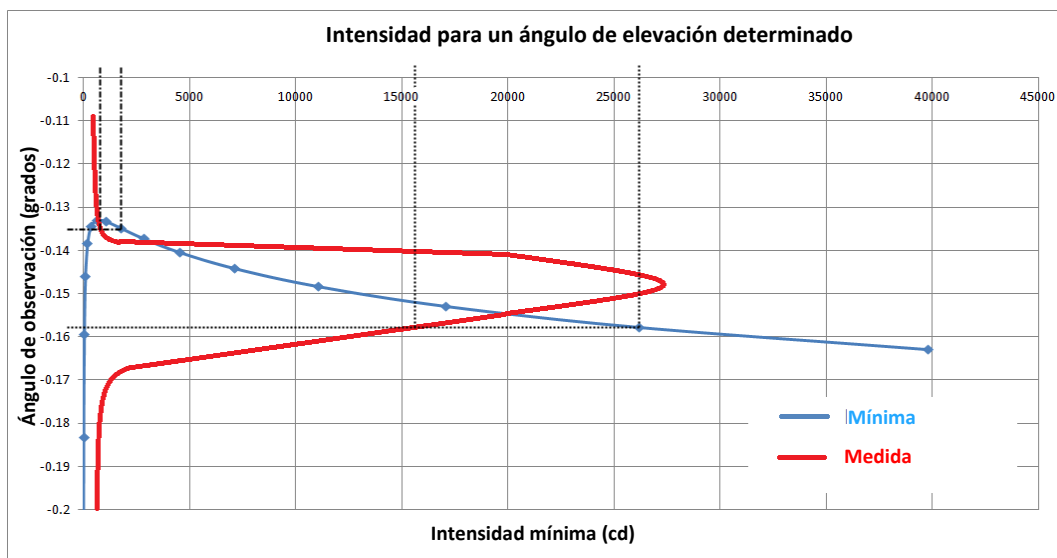


Figura 39 *Ejemplo de un fallo de divergencia*

Existen dos situaciones en las que los resultados medidos se sitúan fuera de la línea trazada para el “ángulo mínimo del observador” y ambas se comentan a continuación.

- 1 El pico del haz es de aproximadamente 27.000 cd, que corresponde a un alcance de 17 millas náuticas. Sin embargo, a este alcance, el observador estaría percibiendo la linterna a un ángulo de aproximadamente -0,158° (tal y como está trazado por el requisito mínimo). Los 27.000 cd de intensidad se producen a -0,148°. Aunque dicha intensidad se puede detectar a 17 millas náuticas, en este caso, no está dirigido en dirección al observador y, por tanto, no será vista.

La intensidad máxima que cumple el requisito mínimo es la 20.000 cd, correspondiente a una distancia de 16 millas náuticas. Entonces, aunque sea posible detectar la linterna a una distancia de 17 millas náuticas, el observador sólo estará situado en unos ángulos adecuados para ver la luz hasta las 16 millas náuticas.

Este mismo escenario podría describirse de otra manera: Cuando observa a un ángulo de -0,158°, el observador debe estar a una distancia tal que la intensidad mínima necesaria sea de 26.200 cd. A un ángulo de -0,158°, la linterna sólo tiene una intensidad de 16.000 cd, que es un valor por debajo del necesario. Dicho concepto se indica mediante la línea de puntos.

Como se ha indicado anteriormente, la fuente luminosa teórica tiene un haz estrecho en comparación con las fuentes prácticas. Por lo tanto, el pico de intensidad de la fuente luminosa (27.000 cd) es algo más elevado que la intensidad de pico que aún engloba el trazado del requisito (20.000 cd). Es poco probable que una linterna práctica exhibiera una diferencia de tal amplitud. Para mostrarlas con más claridad, se han exagerado las características comentadas aquí.

- 2 La segunda zona donde el funcionamiento medido de la linterna cae fuera del requisito trazado está situada entre -0,133° y -0,138°. Las intensidades medidas a estos ángulos son menores que las necesarias para que el observador detecte la luz. Por ejemplo, cuando se ve la linterna a -0,135° el observador estará a una

distancia que requiere una intensidad de 1.760 cd y la intensidad de la linterna a dicho ángulo es de 1.000 cd. Dicho concepto se indica mediante la línea de puntos.

Si el ángulo de divergencia al 50% es mayor que los ángulos trazados para todas las intensidades, salvo las más bajas, es probable que cumpla los requisitos de los alcances prácticos de observación. Por ejemplo, una linterna con una divergencia vertical de $\pm 0,25^\circ$ a una intensidad del 50% englobaría buena parte la línea trazada en la Figura 38 (posiblemente por un amplio margen, dependiendo de cuál sea exactamente la intensidad del 50%) y, como la divergencia a las intensidades más bajas suele aumentar, es probable que cumpla los requisitos de todos los alcances prácticos.

Debido a la relación no lineal entre el alcance y la intensidad, acercarse reduce, en gran medida, la intensidad necesaria para que el observador detecte la luz de manera fiable. Por lo tanto, a los alcances cortos, donde la magnitud de los ángulos de observación es mayor, el requisito de intensidad es muy bajo y cambia poco con el ángulo. Este hecho es beneficioso ya que, a ángulos más amplios, donde las linternas suelen emitir menos luz, el requisito de intensidad es muy bajo. Por lo tanto, la forma del perfil del haz de la linterna se adecúa naturalmente a la forma del requisito mínimo.

Como ya se ha comentado anteriormente, pueden crearse varios escenarios para cubrir las situaciones que requieran una divergencia más amplia y distancias más largas. Un ejemplo de esto se muestra en la Figura 40. Para el escenario en cuestión, se traza cada serie a partir de 1 milla náutica hasta el alcance geográfico máximo. Para que sea adecuado para todos escenarios, el perfil medido de una linterna debe englobar todos los trazados.



Figura 40 *Requisitos de intensidad para varios escenarios de alturas*

C 3 ANÁLISIS DEL PERFIL DE DIVERGENCIA

Se analizará la forma del gráfico como un medio de verificación, para varios grados, de que los cálculos muestran correctamente el comportamiento real.

Tal y como se representa en la Figura 38, hay dos partes distintas en el gráfico.

Por encima de las intensidades mínimas, de aproximadamente 365 cd (7 millas náuticas), aumenta la magnitud del ángulo entre la fuente luminosa y el observador a medida que se aleja de la fuente. En la Figura 41, se muestra gráficamente cómo el ángulo aumenta a medida que se incrementa el alcance. Evidentemente, alejarse de la fuente luminosa requiere mayor intensidad para conseguir el alcance, de modo que la curva tiene tanto un incremento de la intensidad como un aumento del ángulo.

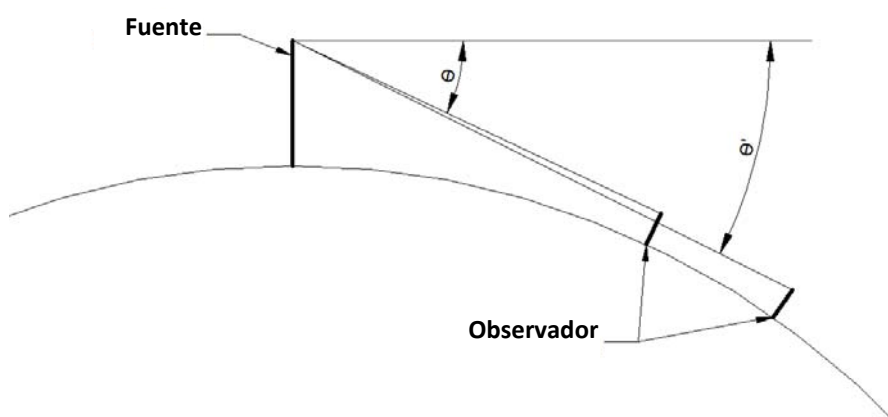


Figura 41 *Ángulo de observación aumentando con el alcance*

Por debajo de las intensidades mínimas, de aproximadamente 365 cd (7 millas náuticas), disminuye la magnitud del ángulo entre la fuente luminosa y el observador a medida que se aleja de la fuente. En la Figura 42, se muestra cómo el ángulo disminuye a medida que se incrementa el alcance.

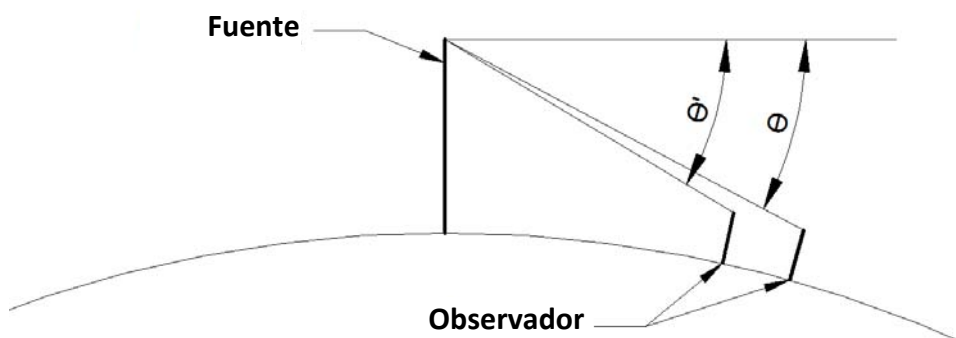


Figura 42 *Ángulo de observación disminuyendo con el alcance*

Debido a la curvatura de la tierra, se producen las dos regiones con comportamientos distintos. Cuando el observador se encuentra cerca de la fuente luminosa, alejarse produce poco efecto en la posición vertical del observador y el ángulo se ve afectado principalmente por el cambio horizontal de la distancia, lo que resulta en la disminución del ángulo a medida que se incrementa la distancia.

Cuando el observador se encuentra más lejos de la fuente luminosa, alejarse produce un mayor efecto en la posición vertical del observador, lo que resulta en un ángulo que aumenta con la distancia.

Figura 43, se ilustra el gradiente de las tangentes a distintas distancias. Los que se encuentran más lejos de la fuente son mucho más empinados y, por tanto, la posición vertical cambia rápidamente con la distancia.

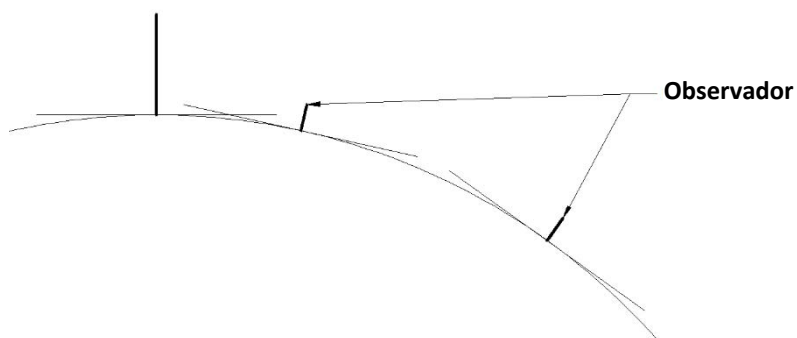


Figura 43 Tangente de la curva de la tierra a distintas distancias

Si la altura de la fuente se aumenta lo suficiente, como se muestra en la Figura 41, se incrementa el alcance al que el comportamiento cambia de una región a la siguiente, Figura 44.

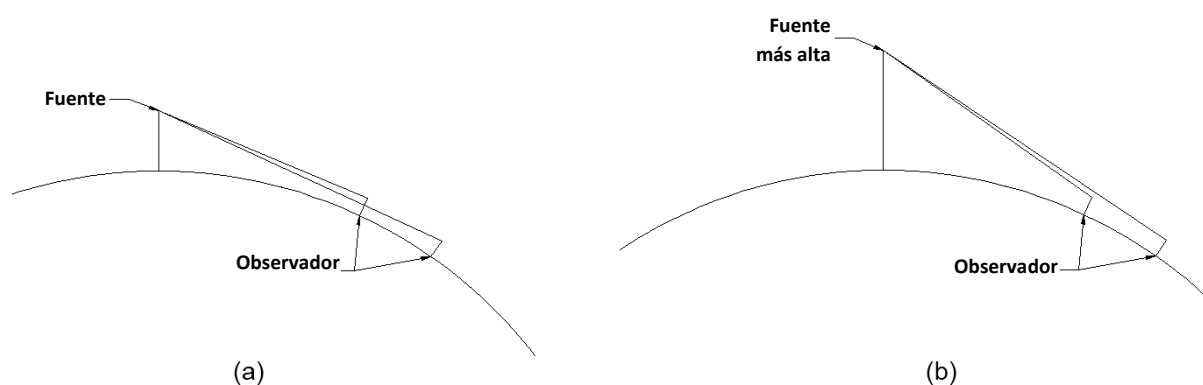


Figura 44 Efecto de la altura de la fuente sobre cómo el ángulo varía con el alcance

APÉNDICE 1 CONFIRMACIÓN DE LOS VALORES UTILIZADOS CON ESTA GUÍA DE LA IALA

En el Anexo 3, se muestra el radio de la curva para la trayectoria refractada de la luz.

La fórmula y explicación del alcance geográfico se dan en la (Ecuación 1), véase el apartado 5.

Se calculará la distancia geográfica para una línea recta y, después, se sumarán los factores de la refracción y conversión de unidades.

Para simplificar las cosas, se considerará 0 m como la altura del observador. Por lo tanto:

$$R_g = 2.03 \times \sqrt{H_m}$$

Donde:

R_g es la distancia de la marca al horizonte (millas náuticas)

H_m es la altura de la marca (m)

Figura 45, se muestra R_g y algunos parámetros adicionales necesarios para calcularlo.

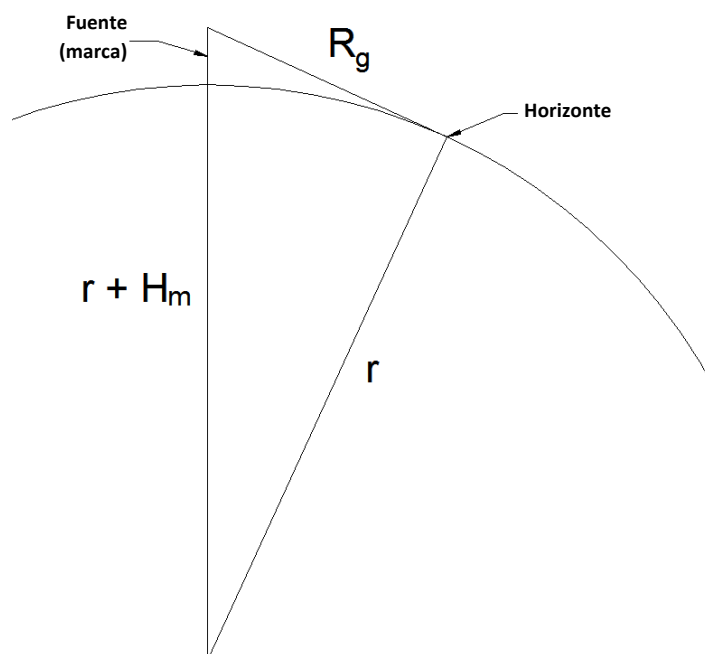


Figura 45 Distancia al horizonte

A partir del teorema de Pitágoras:

$$R_g = \sqrt{(r + H_m)^2 - r^2}$$

Por lo tanto:

$$R_g = \sqrt{r^2 + H_m^2 + 2rH_m - r^2} = \sqrt{H_m^2 + 2rH_m}$$

y, dado que $2rH_m \gg H_m^2$ entonces

$$R_g \approx \sqrt{2rH_m}$$



Se puede tener en cuenta el trayecto curvado de la luz, que tiene un radio de 7 veces el de la tierra, utilizando un radio incrementado de la tierra r' . Donde:

$$r' = \frac{7r}{6} [2]$$

Para convertir metros a millas náuticas, se divide un factor del valor en metros por 1.852.

Se utiliza el valor de 6.371 km como el radio real de la tierra.

Por lo tanto:

$$R_g \approx \frac{1}{1852} \sqrt{\left(\frac{2 \times 7 \times 6371 \times 10^3}{6} \times H_m \right)}$$

que arroja:

$$R_g \approx 2.08 \sqrt{(H_m)}$$

Ecuación 6 Aproximación de la distancia al horizonte (M)

Este factor de 2,08 se encuentra en el centro de rango los factores recomendados por la IALA y demuestra que los valores utilizados son parecidos a los valores empleados para calcular los recomendados por la IALA.

APÉNDICE 2 CÁLCULO DE LAS COORDENADAS DEL OBSERVADOR

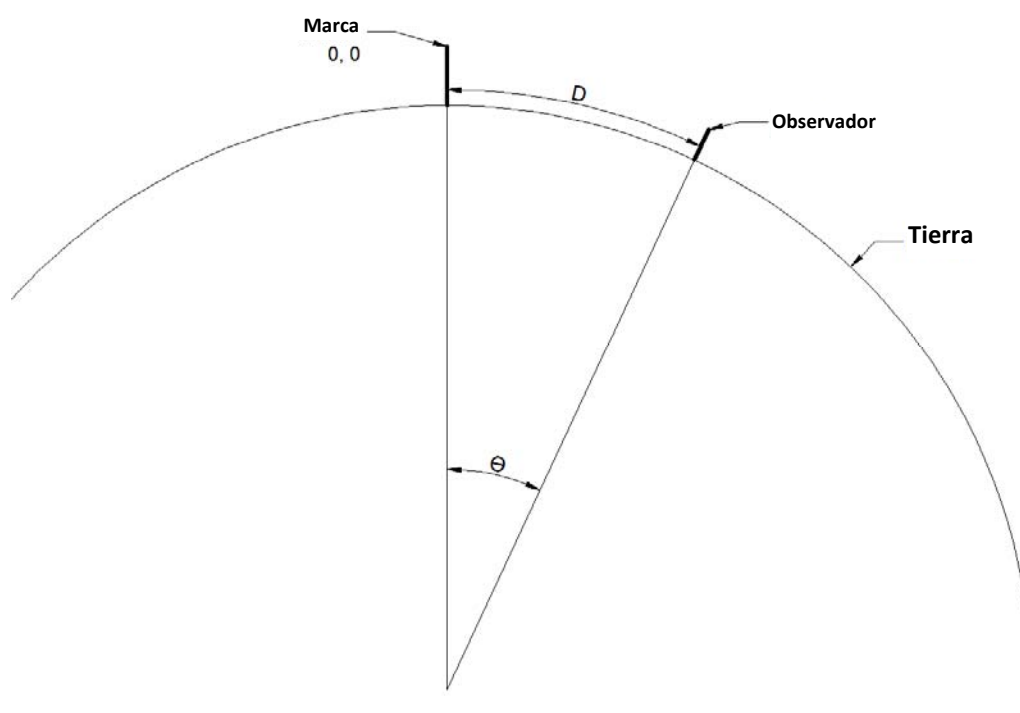


Figura 46 Cálculo de las coordenadas del observador

θ = Ángulo entre las posiciones de la fuente y el observador

D = Distancia al observador por la superficie curvada de la tierra.

r = Radio de la tierra.

Ob_x = Coordenada horizontal del observador

Ob_y = Coordenada vertical del observador

$$Ob_x = (r + H_o) \sin \theta$$

$$Ob_y = (r + H_o) \cos \theta - H_m - r$$

Calcular θ a partir de la ratio de distancia a circunferencia:

$$\theta = \frac{D}{2\pi r} \times 360^\circ$$

o si se utilizan radianes:

$$\theta = \frac{D}{2\pi r} \times 2\pi = \frac{D}{r}$$

APÉNDICE 3 CÁLCULO DEL ÁNGULO AL OBSERVADOR

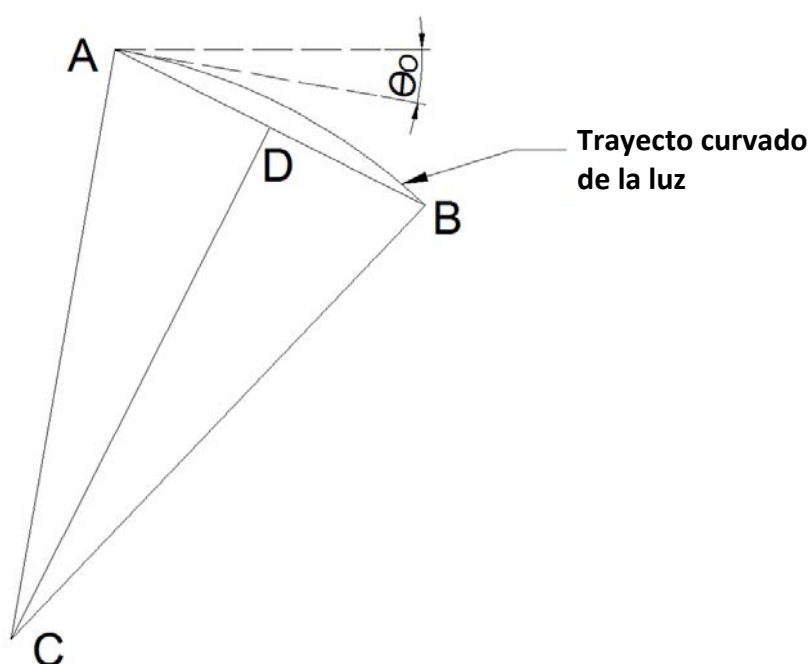


Figura 47 Ángulo al observador

Se puede calcular el ángulo al que el observador ve la linterna como el ángulo de la línea tangencial a la trayectoria curvada de la luz, que interseca tanto la fuente como el observador.

Donde:

θ_0 = Ángulo al observador

A = Posición de la fuente: (0, 0).

B = Posición del observador (X, Y), que se ha calculado previamente.

C = Centro del trayecto curvado

D = Punto medio entre AB

Tanto AC como BC tienen una magnitud equivalente al radio de la curva: r' .

El ángulo al observador es:

$$\angle AC + 90^\circ$$

$$\angle AC = \tan^{-1} \left(\frac{AC_y}{AC_x} \right) - 180^\circ$$

(-180°, dado que el resultado arrojará la primera solución posible y la segunda es la que interesa. Sin embargo, si el observador está más elevado que la fuente, esto no será necesario).

Dado que A es 0, 0, entonces $\angle AC = \tan^{-1} \left(\frac{C_y}{C_x} \right) - 180^\circ$

Ahora, son necesarias las coordenadas del punto C:

$$C = AD + DC = \frac{AB}{2} + DC$$

Se conoce AB, ya que es simplemente la posición del observador (dado que A es 0, 0).

$$\begin{aligned}DC_x &= \|DC\| \cos \angle DC \\DC_y &= \|DC\| \sin \angle DC\end{aligned}$$

$$\angle DC = \angle AB - 90^\circ = \tan^{-1}\left(\frac{B_y}{B_x}\right) - 90^\circ$$

Se puede calcular la magnitud de CC empleando el teorema de Pitágoras:

$$\|DC\| = \sqrt{r'^2 - \left(\frac{\|AB\|}{2}\right)^2}$$

$$\|AB\| = \sqrt{B_x^2 + B_y^2}$$

A partir de estas fórmulas, se puede calcular toda la información necesaria. Pueden combinarse en una única ecuación, que es difícil de manejar, pero, para simplificar, se emplearon en su forma intermedia en una hoja de cálculo de Excel.