

IALA Recommendation E200-3

On

Marine Signal Lights Part 3 - Measurement

Sobre

Señales Luminosas Marítimas Parte 3 – La Medición

1ª Edición

Diciembre 2008

Traducción elaborada por



Puertos del Estado Tel: +34 91 524 55 26 (AtoN)
Avda. del Partenón, 10 E-mail: AtoN@puertos.es
28042 Madrid, Spain Internet: www.puertos.es



10 rue des Gaudines
Saint Germain en Laye, France
Telephone: +33 1 34 51 70 01 Telefax: +33 1 34 51 82 05
E-mail: xxx@iala-aism.org Internet: www.iala-aism.org

Revisiones del Documento

Las revisiones realizadas al Documento de IALA se anotarán en la tabla antes de la emisión de un documento revisado.

Fecha	Página / Sección Revisada	Necesidad de Revisión

Coordinador de la edición en español y edición final:

José Carlos Díez (Puertos del Estado)

Agradecemos la colaboración en la revisión de los borradores a:

- **Dirección General del Territorio Marítimo y de M.M. (DIRECTEMAR) Chile.**
- **La Maquinista Valenciana (IALA-IM)**
- **Mediterráneo Señales Marítimas (IALA-IM)**

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.

Recomendación relativa a las Señales Luminosas Marítimas

Parte 3 – La Medición (Recomendación E-200-3)

EL CONSEJO:

RECORDANDO la función de IALA con respecto a la Seguridad de la Navegación, la eficiencia del transporte marítimo y la protección del medio ambiente;

RECONOCIENDO que, para asegurar el adecuado rendimiento de las señales luminosas marítimas, se ha de realizar la medición de sus parámetros, tanto fotométricos como colorimétricos;

RECONOCIENDO ASIMISMO, que existe una gran variedad de fuentes luminosas y que siguen desarrollándose;

RECONOCIENDO ADEMÁS, que existen muchos métodos y equipos diferentes para realizar la medición de la luz;

TENIENDO EN CUENTA que las normas definidas para la fotometría y la colorimetría se deben utilizar a escala mundial a fin de asegurar la calidad de las señales luminosas para los marineros;

TENIENDO EN CUENTA ASIMISMO, que este documento sólo será de aplicación a las señales luminosas de ayuda a la navegación marítima instaladas tras la fecha de publicación de este documento;

TENIENDO EN CUENTA ADEMÁS, que deberán existir laboratorios disponibles, que trabajen de acuerdo con esta documentación, para todos los miembros de IALA y otras Autoridades competentes, y que tales laboratorios podrán ser operados por ellos mismos, por otras Autoridades del mismo u otro país, o por empresas privadas;

CONSIDERANDO las propuestas del Comité EEP, de sus expertos de luces y del grupo de trabajo IALABATT / IALALITE;

ADOPTA la Recomendación relativa a las Señales Luminosas de Ayuda a Navegación Marítima en los anexos de esta recomendación; y,

RECOMIENDA que los Miembros Nacionales y otras Autoridades competentes que proporcionan servicios de ayuda a la navegación marítima realicen mediciones, tanto fotométricas como colorimétricas, de las señales luminosas de ayuda a la navegación de acuerdo con esta recomendación.

* * *

Índice de Contenidos

ÍNDICE DE CONTENIDOS	4
ANEXO I LA MEDICIÓN	10
1 INTRODUCCIÓN	10
2 ÁMBITO DE APLICACIÓN	11
3 OBJETO	11
4 DEFINICIONES	12
4.1 Fotometría	12
4.2 Colorimetría	12
4.3 Flujo luminoso (lumen)	13
4.4 Ángulo sólido (esterorradián)	13
4.5 Intensidad luminosa (candela)	14
4.5.1 Distribución angular de intensidad luminosa	14
4.5.2 Distribución de intensidad luminosa en función del tiempo	14
4.5.3 Intensidad continua (I_{cont})	14
4.5.4 La intensidad fija	14
4.5.5 Intensidad máxima (I_{max})	15
4.5.6 Intensidad de pico (I_o)	15
4.5.7 Intensidad del 10 por ciento	15
4.5.8 Intensidad integrada (I_{int})	15
4.5.9 Intensidad eficaz (I_e)	15
4.6 Luminancia (L)	15
4.7 Densidad de flujo luminoso o iluminancia (lumen/m ² o lux) [31]	16
4.8 Divergencia del haz	17
4.9 Frecuencia de fusión del parpadeo o frecuencia crítica de fusión	17
4.10 Distancia de cruce	17
4.11 Medida de distancia	17
4.12 Medida del ángulo	18
4.13 Distancia fotométrica mínima	18
4.14 RMS	18
4.15 Goniómetro, goniofotómetro [19]	18
4.16 Cromaticidad [24]	19
4.17 Distribución espectral [14]	19
4.18 Distribución de potencia espectral [14]	19
4.19 Tono cromático	19
4.20 Saturación de color	19
4.21 Croma	20
4.22 Velocidad de respuesta	20
4.23 Errores de desajuste espectral y su corrección [6]	20

5	PRINCIPIOS DE MEDICIÓN	21
5.1	Ley de la distancia fotométrica	21
5.2	Medición de la distribución angular de intensidad luminosa	21
5.3	Planos de medición recomendados	22
5.3.1	«Haces concentrados»	22
•	PLANO HORIZONTAL:	22
•	PLANO VERTICAL:	23
5.3.3	«Haces en abanico»	23
5.4	La colorimetría [24]	24
5.4.1	Medición de triple estímulo	24
5.4.2	Medición espectral	25
6	MODELOS Y CURVAS	26
6.1	Curva de eficiencia luminosa fotópica del Observador Estándar $V(\lambda)$ [16]	26
6.2	Curva de eficiencia luminosa escotópica $V'(\lambda)$ [16]	26
6.3	La ley de Talbot-Plateau	27
6.4	<i>Standard Colorimetric Observer</i> (Observador colorimétrico estándar) [29]	27
6.5	Cromaticidad [24]	28
6.6	Temperatura de color y temperatura de color correlacionada [24]	29
6.7	Iluminante A de la CIE [21]	29
7	EQUIPOS DE MEDICIÓN	30
7.1	Fotómetro	30
7.2	Goniómetro Tipo1	31
7.3	«Espejo reflector»	32
7.4	Colorímetro de triple estímulo [32]	33
7.5	Monocromador [14]	33
7.6	Espectroscopio, Espectrómetro, Espectrorradiómetro	34
7.6.1	Espectrorradiómetro paso a paso o de barrido	34
7.6.2	Espectrorradiómetro en serie	34
7.7	Fuentes luminosas calibradas [30]	35
8	PROCEDIMIENTOS GENERALES DE LABORATORIO	35
8.1	Procedimientos y documentación por escrito	35
8.2	Identificación de los equipos de ensayo	35
8.3	Calibración y trazabilidad	36
8.4	Identificación de los equipos objeto de ensayos	36
8.5	Equipos objeto de ensayos	36
8.6	8.6 Condiciones ambientales	37
8.7	Condiciones de potencia/eléctricas	37
8.8	Calentamiento de equipos	37
8.9	Control de la luz dispersa y ambiental	38

8.10	Identificación de fuente/datos	38
8.11	Seguimiento del consumo de potencia del elemento objeto del ensayo	39
8.12	Sistema de registro	39
8.13	Software	39
8.14	Errores, incertidumbre y confianza	39
	8.14.1 Errores sistemáticos (caracterización)	39
	8.14.2 Incertidumbre típica combinada	40
	8.14.3 Incertidumbre expandida	40
	8.14.4 Directrices para el muestreo	40
8.15	Notas/Observaciones:	40
8.16	Firmantes autorizados	40
8.17	Conservación de datos	40
9	MÉTODOS Y REQUISITOS DE LA FOTOMETRÍA	41
9.1	Fotometría de laboratorio estándar	41
9.2	Alineación	41
9.3	Respuesta del sistema fotométrico; $V(\lambda)$ y $f1'$	42
9.4	Corrección espectral	42
9.5	Medición de dependencia angular de intensidad luminosa [18]	43
9.6	Requisitos mínimos de la resolución angular	43
	9.6.1 linterna omnidireccional – (haz en abanico)	43
	9.6.2 Balizas direccionales y giratorias, y proyectores de precisión	44
9.7	Medición de dependencia temporal de intensidad luminosa	44
9.8	Distancia fotométrica mínima	44
9.9	Medida de la abertura y medida del ángulo	47
9.10	Métodos de medición detallados	47
10	MÉTODOS Y REQUISITOS DE LA COLORIMETRÍA	48
10.1	Colorimetría de laboratorio estándar	48
10.2	Alineación	49
10.3	Respuesta espectral del sistema de medición	49
10.4	Iluminación de la abertura de medición.	49
10.5	Consideraciones acerca de la fluctuación rápida de la intensidad de la fuente luminosa	49
10.6	Medida de la distancia mínima	49
10.7	10.7 Métodos de medición detallados	50
11	PRESENTACIÓN DE RESULTADOS	50
11.1	Intensidad luminosa con respecto al ángulo	50
	11.1.1 Valores principales de una distribución simétrica de intensidad	51
	• INTENSIDAD MÁXIMA EN EL EJE DE REFERENCIA: I_{MAX}	51
	• ANCHO A LA MITAD DE ALTURA: FWHM (DEL INGLÉS, «FULL WIDTH AT HALF MAXIMUM»)	51

•	ANCHO A LA DÉCIMA PARTE DE ALTURA: FWTM (DEL INGLÉS, «FULL WIDTH AT TENTH MAXIMUM»)	51
	11.1.2 Valores reducidos para ensayos de tipo o de aprobación de tipo	52
	11.1.3 Valores principales para balizas omnidireccionales (haces en abanico)	53
	11.1.4 Balizas giratorias (haces concentrados)	53
	11.1.5 Balizas direccionales	54
11.2	Intensidad luminosa con respecto al tiempo	54
11.3	Duración del destello	54
11.4	Intensidad eficaz	55
11.5	Corrección espectral	55
11.6	Factor de condiciones de servicio	55
11.7	Color de la luz	55
11.8	Luces de sectores	56
11.9	Distribución de potencia espectral	59
11.10	Alcance nominal	60
11.11	Incertidumbre y certeza	60
12	REFERENCIAS	60
ANEXO II	MÉTODO DE MEDICIÓN DETALLADO	62
	ZERO LENGTH	62
1	INTRODUCCIÓN	62
2	ZERO LENGTH FUERA DEL EJE	63
3	CALIBRACIÓN O CARACTERIZACIÓN DEL SISTEMA ZERO LENGTH	64
ANEXO III	MÉTODO DE MEDICIÓN DETALLADO	65
	TELEFOTOMETRÍA DE CAMPO	65
1	INTRODUCCIÓN	65
2	EQUIPOS ADICIONALES NECESARIOS PARA TELEFOTOMETRÍA AIRE LIBRE	65
2.1	Telefotómetro	65
2.2	Luz de referencia	66
3	PROCEDIMIENTOS DE CALIBRACIÓN	66
4	CONDICIONES ATMOSFÉRICAS Y LUZ AMBIENTAL	66
5	REGISTRO DE CONDICIONES AMBIENTALES	67
6	ALINEACIÓN DEL TELEFOTÓMETRO	67
7	PROCEDIMIENTOS DE MEDICIÓN DE LA TELEFOTOMETRÍA DE CAMPO	67
8	8 EQUIPOS ADICIONALES PARA LA MEDICIÓN <i>IN SITU</i>	68
8.1	Prismas y bastidor de prismas	68
8.2	Proyector de referencia	68
9	PROCEDIMIENTOS ADICIONALES PARA LA MEDICIÓN <i>IN SITU</i>	70
9.1	Elección del emplazamiento de medición	70
9.2	Configuración del telefotómetro	70

9.3	Configuración de la óptica del faro	70
9.4	Configuración del bastidor de prismas y de los prismas	71
9.5	Configuración del proyector de referencia	71
9.6	Realización de la medición	71
ANEXO IV MÉTODO DE MEDICIÓN DETALLADO		72
COLORIMETRÍA DE TRIPLE ESTÍMULO		72
1	GEOMETRÍA DE LA MEDICIÓN	72
2	APLICACIÓN 1	73
3	APLICACIÓN 2	73
4	ESPECTRO	74
ANEXO V MÉTODO DE MEDICIÓN DETALLADO		75
ESPECTRORRADIOMETRÍA		75
1	GEOMETRÍA DE LA MEDICIÓN	75
2	CALIBRACIÓN / CARACTERIZACIÓN	75
3	REALIZACIÓN DE LA MEDICIÓN	76
4	RESULTADOS	77
5	CONVERSIÓN DE LOS DATOS ESPECTRALES A COLOR Y CROMATICIDAD	77
6	CONVERSIÓN DE DATOS ESPECTRALES A INTENSIDAD LUMINOSA	78
ANEXO VI EJEMPLO DE UN PRESUPUESTO DE INCERTIDUMBRE PARA LA FOTOMETRÍA		80
1	FOTOMETRÍA AL AIRE LIBRE	80
2	METODO ZERO LENGTH	81

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1	Geometría de ángulos sólidos	13
Figura 2	Distribución de potencia espectral de los LED blancos (intervalos de 5 nm)	19
Figura 3	Un trazado espectral mostrando las diferencia entre la respuesta típica de un fotómetro y $V(\lambda)$	20
Figura 4	Sección ampliada del espectro mostrando el error fotométrico en la Figura 3	21
Figura 5	Ley de la distancia fotométrica	21
Figura 6	Medición de la distribución angular de intensidad luminosa	22
Figura 7	Plano horizontal	22
Figura 8	Plano vertical	23
Figura 9	Plano horizontal de un haz en abanico	23
Figura 10	Plano vertical de un haz en abanico	24
Figura 11	Principio del triple estímulo	25
Figura 12	Medición espectral	25
Figura 13	Curva de eficiencia luminosa fotóptica $V(\lambda)$	26
Figura 14	Curva de eficiencia luminosa escotópica $V'(\lambda)$	27
Figura 15	Observador colorimétrico estandar CIE 1931	28
Figura 16	Diagrama Cromático de la CIE 1931	28

Figura 17	Diagrama cromático x, y de la CIE mostrando el <i>locus</i> planckiano	29
Figura 18	Medición de la luminancia	31
Figura 19	Goniómetro del tipo 1 y el sistema de coordenadas.	32
Figura 20	Esquema de un espejo reflector	32
Figura 21	Esquema de un colorímetro de triple estímulo sencillo	33
Figura 22	Esquema de un monocromador con motor de pasos del tipo Czerny-Turner	34
Figura 23	Reducción de luz dispersa mediante pantallas absorbentes	38
Figura 24	Disposición para determinar la luz ambiental y dispersa	38
Figura 25	Distancia de cruce	45
Figura 26	Medida del ángulo	47
Figura 27	Distribución de intensidad simétrica	51
Figura 28	Distribución de intensidad asimétrica	51
Figura 29	Distribución de intensidad asimétrica presentando valores reducidos	52
Figura 30	Nube de puntos de una baliza LED roja a lo largo de 360°	56
Figura 31	Trazado de cromaticidad a través del límite entre los sectores rojo y blanco	57
Figura 32	Como la Figura 31, pero trazado en un diagrama cromático de la CIE 1931 parcial	57
Figura 33	Método para trazar el sector de incertidumbre en un gráfico de intensidad	58
Figura 34	Trazado de 360 grados de una luz de sectores mostrando la intensidad y la cromaticidad en intervalos de 1°	59
Figura 35	Trazado parcial de la luz de sectores mostrada en la Figura 34, en intervalos de 0,1°	59
Figura 36	Sistema fotométrico ZERO LENGTH.	62
Figura 37	Geometría ZERO LENGTH mostrando la resolución angular	63
Figura 38	Geometría ZERO LENGTH fuera del eje	63
Figura 39	Utilización de prismas para desviar un haz de luz a través de un ángulo vertical	69
Figura 40	Disposición normal	72
Figura 41	Prueba simple para la configuración del colorímetro	72
Figura 42	Baliza fuera de la esfera	73
Figura 43	Baliza en el interior de la esfera	74
Figura 44	Geometría de medición del espectrorradiómetro	75

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1	Antiguas unidades de luminancia	16
Cuadro 2	Antiguas unidades de iluminancia	16
Cuadro 3	Ejemplo de una ficha de corrección de espectrorradiómetro	76
Cuadro 4	Resultados mostrando la conversión de la distribución de potencia espectral (SPD) a valores cromáticos X, Y, Z	78
Cuadro 5	Resultados mostrando la conversión de distribución de potencia espectral (SPD) a intensidad luminosa	79

Recomendación E-200-3

Señales Luminosas Marítimas

Parte 3 – La medición

ANEXO I LA MEDICIÓN

1 INTRODUCCIÓN

Este documento es uno de varios relativos a las señales luminosas de ayuda a la navegación marítima y trata sobre la medición fotométrica y colorimétrica de las mismas. Previo a la puesta en servicio de un nuevo tipo de luz de ayuda a la navegación, por lo menos un equipo de cada tipo será objeto de las mediciones fotométricas y colorimétricas adecuadas. Tales mediciones proporcionarán información sobre la intensidad luminosa y el color de la luz básicamente, para todas las direcciones que caen dentro de su zona de utilización. Las mediciones de las luces de destellos proporcionarán información sobre las variaciones de la intensidad luminosa con el tiempo. La información así recopilada de todas las mediciones se empleará para asignar a los equipos los datos que figuran a continuación cuando se desplieguen como señales luminosas de ayuda a la navegación:

- el carácter rítmico (tal y como se describe en E-110);
- el color (tal y como se describe en E-200-1);
- el alcance nominal (tal y como se describe en E-200-2).
- la intensidad eficaz (tal y como se describe en E-200-4).

Los fabricantes de señales luminosas marítimas podrán utilizar los resultados de tales mediciones para proporcionar especificaciones acerca del rendimiento de sus productos. Las mediciones se podrán realizar sobre equipos que ya se encuentren en servicio para asegurar la continuidad de la calidad y del rendimiento, tanto de la ayuda a la navegación marítima como del servicio que proporciona al marino.

La autoridad técnica competente de cada país determinará las mediciones adecuadas que se realizarán para cada tipo de luz de ayuda a la navegación. El laboratorio asignado para desempeñar la tarea determinará los métodos fotométricos y colorimétricos, pero como una indicación de los principios generales a seguir, se hará referencia a este documento.

De ser posible, las mediciones fotométricas se realizarán sobre una señal luminosa de ayuda a la navegación completa, tal y como se instalará, incluyendo la cubierta protectora que aloja el sistema óptico. Para este fin, pueden ser mejor las mediciones *in situ*. Las mediciones también se podrán realizar en emplazamientos de ensayo adecuados sobre equipos completos, o sobre una combinación de fuente y óptica sin la cubierta protectora y, si es posible, sin los filtros de color diseñados para su empleo en servicio. Dichas mediciones, tras la corrección de los efectos de la linterna y los filtros de color (cuando se utilizan), se aplicarán al equipo que realmente se instalará posteriormente, o a una luz compuesta de una fuente idéntica y operada bajo unas condiciones idénticas a las de la luz de ayuda a la navegación en cuestión. La intensidad eficaz y el alcance luminoso así deducidos se podrán tomar como los de la ayuda instalada.

La medición de la luz es un tema complejo y existe el peligro de que profesionales sin conocimientos suficientes del tema puedan obtener resultados con errores importantes desconocidos para ellos. Aun cuando se corrijan o se tomen en consideración tales errores, el resultado de la medición todavía podría contener un nivel de incertidumbre de varios puntos porcentuales y, en ciertos casos, de decenas de puntos porcentuales. A veces, estos niveles altos son inevitables.

Sin embargo, independientemente del método de medición empleado y de los errores y niveles de incertidumbre alcanzados, es importante evaluarlos debidamente. La mejor manera de realizarlo es teniendo en cuenta un cierto margen de error mediante un presupuesto de incertidumbre. Utilizado correctamente, dicho presupuesto se podrá emplear no sólo para determinar el nivel de incertidumbre, sino también para afinar el método de medición, tomando en consideración las incertidumbres dominantes. Se debe recordar que ningún resultado de medición es completo sin una expresión del nivel de incertidumbre y confianza.

2 ÁMBITO DE APLICACIÓN

Esta recomendación será de aplicación a las mediciones fotométricas y caracterización de todas las señales luminosas de ayuda a la navegación marítima. En términos generales, es posible categorizar las emisiones de estas señales luminosas como de «haz concentrado o direccional » (pencil beams) o de «haz en abanico o de horizonte» (fan beams)..

Los equipos utilizados para generar haces concentrados incluyen las balizas con reflectores o proyectores, con una o más ópticas y lentes montadas en «ojos de buey» girando en torno a un punto focal común (ópticas giratorias). Las intensidades estacionarias de pico generadas por estas balizas varían desde unos cuantos miles de candelas a varios millones de candelas, con divergencias de haz (medidas entre los puntos al 50% de intensidad) que suelen ser inferiores a los diez grados en cualquier sección transversal. Las balizas de tipo foco direccional pueden estar ubicadas en una posición fija, proporcionando así una *luz de enfilación* para marcar un canal de navegación, o girar en torno a un eje vertical para barrer el horizonte y dar la apariencia de una luz de destellos desde la distancia.

Las lentes anamórficas de forma cilíndrica (ópticas de horizonte). se suelen emplear para generar haces de luz en abanico. Normalmente, tales lentes se fabrican de secciones de Fresnel y pueden tomar la forma de un tambor. Dichas ópticas se pueden utilizar para producir una señal luminosa homogénea a lo largo de un plano horizontal (una señal omnidireccional). La señal también puede ser suprimida o coloreada en una o más secciones del horizonte (sectores), o tener una o más zonas de mayor intensidad mediante el uso de paneles condensadores o concentradores de luz. Las intensidades fijas de pico generadas por estas balizas varían desde unas cuantas decenas de candelas a decenas de miles de candelas.

Las fuentes luminosas utilizadas en las señales luminosas de ayuda a la navegación suelen ser lámparas incandescentes o de descarga. Cada vez más se está extendiendo el uso de diodos emisores de luz (LEDs), mientras que las fuentes luminosas de acetileno de llama desnuda o de capillo incandescente son cada vez más escasas.

3 OBJETO

El objetivo de esta recomendación es proporcionar una metodología apropiada y fomentar la homogeneidad en la determinación del rendimiento óptico y características de los diferentes

tipos de señales luminosas de ayuda a la navegación. Las señales luminosas de ayuda a la navegación marítima engloban equipos de proyección que emplean varias fuentes luminosas, lentes y espejos, bien de forma individual o bien en combinación, así como lentes de tambor de tipo Fresnel.

4 DEFINICIONES

Las definiciones que figuran en esta sección no son exhaustivas. Se pueden encontrar unas definiciones adicionales y más completas en las correspondientes publicaciones de la CIE [5], [6], [10], [14], [16], [17], [18], [19], [21], [24], [25], [26], [29], [30], [31], [32], [33], [34] y [35].

4.1 Fotometría

La Fotometría consiste en la medición de la radiación electromagnética detectable por el ojo humano (luz visible). Las unidades de la fotometría se pueden obtener de las magnitudes radiométricas (p. ej. vatios) ponderadas según la curva de eficiencia luminosa del observador humano. Como norma general, se toma como el espectro en cuestión la gama de longitudes de onda que va desde los 380 nm a los 780 nm.

La palabra **fotometría** se deriva del griego: *phōtos* = luz y *metron* = medir. Consiste en la medición del aspecto visual de la energía radiante (luz visible). Como tal, se diferencia de la radiometría, en tanto que la fotometría toma en consideración la sensibilidad variable del ojo a las diferentes longitudes de onda de la luz. Las unidades de la fotometría consisten en cantidades luminosas, que incluyen la intensidad luminosa, el flujo luminoso, la luminancia y la iluminancia (véase el apartado 4).

Las longitudes de onda de la energía luminosa capaces de causar una sensación visual usualmente van desde los 380 nm a los 780 nm. Aquéllas ubicadas fuera de esta gama hacen muy poco para estimular el ojo humano.

El ojo en sí, aunque sea un receptor muy sensible y versátil, no es un indicador fiable de la cantidad luminosa. Por lo tanto, para poder cuantificar la luz visible percibida por parte de un observador humano, es necesario realizar algún tipo de medición, que se puede realizar sustituyendo al observador humano con un instrumento conocido como fotómetro (véase el apartado 7.1). Aunque la sensibilidad espectral del fotómetro imita a la del ojo, no detecta colores. Por lo tanto, el fotómetro es capaz de cuantificar la cantidad de luz visible, pero es incapaz de indicarnos su color.

4.2 Colorimetría

La colorimetría es la ciencia de la medición de los colores. Puede abarcar tanto el color de una fuente luminosa como el de una superficie (p. ej. la pintura roja). La colorimetría de los colores en superficies depende de la fuente luminosa que las ilumina, el ángulo de incidencia, el ángulo de visión, la textura de las superficies y otras variables adicionales. En este documento, sólo se tratarán los colores de las fuentes luminosas.

La palabra **colorimetría** se deriva tanto del latín: *color* = color como del griego: *metron* = medir. Es la ciencia de la medición del color. En términos generales, existen dos tipos de colorimetría: la medición de los colores de las superficies como, por ejemplo, un metal pintado, iluminadas por una luz que incide en ellas; y la medición de los objetos emisores de luz, como son las lámparas.

El principal enfoque de la colorimetría de superficies ha consistido en desarrollar métodos para predecir la correspondencia cromática visual en base a las mediciones físicas. Este documento no versa sobre la colorimetría de superficies.

La colorimetría de fuentes luminosas suele limitarse a la descripción de los colores como una serie de números, típicamente como coordenadas cromáticas que definen un punto dentro de un modelo de un espacio cromático bidimensional (véase el apartado 6.5). Las coordenadas cromáticas que así resultan describen un color, pero no la luminosidad de la luz.

4.3 Flujo luminoso (lumen)

El **flujo luminoso** es el flujo radiante (potencia) ponderado en términos fotométricos.

A la frecuencia de 540×10^{12} hercios, un lumen se define como = 1/683 vatios de flujo radiante.

Si una fuente luminosa puntual homogénea, con una intensidad luminosa de una candela se coloca en el centro de una esfera con un radio de un metro, entonces cada área de un metro cuadrado en la parte interior de dicha esfera recibirá un flujo luminoso de un lumen (1 lm).

Ya que el área de la superficie de una esfera completa mide 4π veces el cuadrado del radio, entonces una fuente luminosa puntual homogénea de 1 cd produciría un **total** de 12,57 lm de flujo luminoso. Los fabricantes de lámparas suelen utilizar esta cifra del **Flujo Luminoso Total** en sus especificaciones. No obstante, se tomará en cuenta que la mayoría de las fuentes luminosas no son homogéneas en cuanto a la distribución espacial de la luz.

La unidad estándar del flujo luminoso es el **lumen (lm)**.

4.4 Ángulo sólido (esterorradián)

Un **ángulo sólido** es el ángulo que, visto desde el centro de una esfera, incluye un área determinada en la superficie de tal esfera. El valor del ángulo sólido es numéricamente igual al tamaño de tal área dividido por el cuadrado del radio de la esfera. Por ejemplo, en una esfera con un radio de un metro, un ángulo sólido describiría un área de un metro cuadrado en la superficie de la esfera.

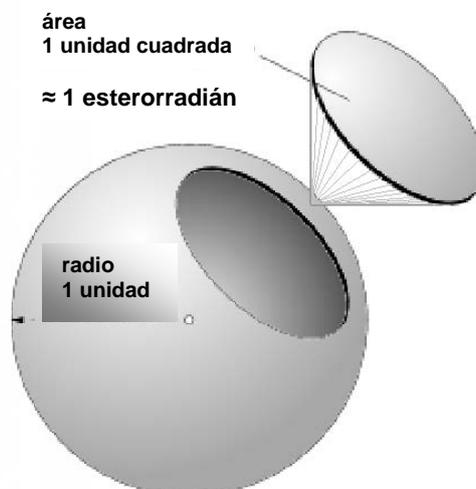


Figura 1 Geometría de ángulos sólidos

Utilizando el ejemplo de una candela a una distancia de un metro, imagine una esfera con un radio de un metro y con una fuente puntual de una candela ubicada en su centro. El área de la superficie iluminada de la esfera a lo largo de un ángulo sólido de un esterrradián sería de un metro cuadrado. El flujo luminoso dentro de ese ángulo sólido sería de un lumen. La iluminancia que incide sobre tal superficie sería de un lumen por metro cuadrado, o de un lux.

4.5 Intensidad luminosa (candela)

La **intensidad luminosa** es el flujo luminoso emitido desde un punto por unidad de ángulo sólido en una determinada dirección.

La **intensidad luminosa** es la unidad básica de la fotometría y se define de la siguiente manera:

La candela es la intensidad luminosa, en una determinada dirección, de una fuente que emite radiación monocromática a una frecuencia de 540×10^{12} hercios y que tiene una intensidad radiante en tal dirección de $1/683$ vatios por esterrradián. [31]

La unidad estándar de la intensidad luminosa es la **candela (cd)**, que también se expresa como *lumen por esterrradián (lm/sr)*.

4.5.1 Distribución angular de intensidad luminosa

La **distribución angular de intensidad luminosa** es una función de la intensidad, según la dirección. En general, la dirección se describe mediante dos ángulos (p. ej. Θ y Φ). La distribución de intensidad se convierte en $I = I(\Theta, \Phi)$.

En muchas aplicaciones, la intensidad se circunscribe a un único plano. Entonces, la distribución de intensidad sería una función de tan sólo un ángulo $I = I(\Phi)$.

Las intensidades máxima, media y del 10 por ciento se obtienen a partir de una distribución angular de intensidad, así como de los ángulos de divergencia del haz.

4.5.2 Distribución de intensidad luminosa en función del tiempo

Si la intensidad I en una cierta dirección varía con el tiempo t , la curva $I(t)$ se denomina la **distribución de intensidad luminosa en función del tiempo**.

La intensidad de pico, la intensidad integrada y la intensidad eficaz se pueden leer o calcular a partir de una distribución de intensidad en función del tiempo.

4.5.3 Intensidad continua (I_{cont})

La intensidad de una luz que brilla de forma continua.

4.5.4 La intensidad fija

Equivalente a 4.5.3.

4.5.5 Intensidad máxima (I_{\max})

La intensidad máxima en cualquier trazado angular determinado.

4.5.6 Intensidad de pico (I_o)

El valor máximo de la intensidad instantánea alcanzado en el tiempo que dura un destello de luz.

4.5.7 Intensidad del 10 por ciento

Es la intensidad excedida del 90% de todas las intensidades medidas desde un punto determinado. La línea del percentil 10 es la línea que separa las medidas que están por debajo del 10% de las que están por encima del 90%.

La intensidad del 10 por ciento se emplea para describir la distribución horizontal de la intensidad de una luz omnidireccional (o haz en abanico).

4.5.8 Intensidad integrada (I_{int})

La intensidad integrada es la integral de la intensidad instantánea con respecto al tiempo, dentro de un destello de luz. Con unidades de candela/segundos, se asocia a una cantidad fotométrica de energía:

$$I_{\text{int}} = \int I(t)dt$$

ecuación 1

4.5.9 Intensidad eficaz (I_e)

Es la intensidad de una luz continua ficticia, que proporciona un estímulo visual equivalente a una luz de destellos cuando se percibe en el umbral acromático de detección visual.

4.6 Luminancia (L)

nota: «Brillo fotométrico» es un término descartado para la luminancia.

La intensidad luminosa por unidad de área proyectada de cualquier superficie, tal y como se mide desde una dirección determinada. Es una medida física del brillo.

La luminancia (usualmente «L» en las fórmulas) es la cantidad de luz visible que emana desde un punto de una superficie en una dirección determinada. Tal «superficie» puede ser una superficie física o bien un plano imaginario, y la luz que emana de ella puede ser el resultado de la reflexión, la transmisión y/o la emisión.

La unidad estándar de la luminancia es la **candela por metro cuadrado (cd/m^2)**. (también denominada **Nits** en Estados Unidos, del latín «*nitere*» = brillar).

Además, existen otras unidades de luminancia más antiguas, que ya se han descartado:

Cuadro 1 Unidades más antiguas de la luminancia

Apostilb (descartado)	1 asb	=	1/cd/m ²
Blondel (descartado)	1 blondel	=	1/cd/m ²
Candela por pie cuadrado	1 cd/ft ²	=	10,764 cd/m ²
Candela por pulgada cuadrada	1 cd/in ²	=	1550 cd/m ²
Pie-lambert (Footlambert) (descartado)	1 fL	=	3,426 cd/m ²
Lambert (descartado)	1 L	=	10 ⁴ /cd/m ²
Nit	1 nit	=	1 cd/m ²
Skot (descartado)	1 skot	=	10 ⁻³ /cd/m ²
Stilb (descartado)	1 sb	=	104 cd/m ²

4.7 Densidad de flujo luminoso o iluminancia (lumen/m² o lux) [31]

nota: «Iluminación» es un término descartado para la iluminancia.

La **densidad de flujo luminoso** es la densidad de flujo radiante ponderada en términos fotométricos, que significa el flujo luminoso por unidad de área en un punto de una superficie, la cual puede ser real o imaginaria.

La **iluminancia** (usualmente «E» en las fórmulas) es la cantidad total de luz visible que ilumina o incide en un punto de una superficie desde todas las direcciones por encima de la superficie. Tal «superficie» puede ser una superficie física o un plano imaginario. La iluminancia es equivalente a la *irradiancia* ponderada por la curva de respuesta del ojo humano.

La unidad estándar de la iluminancia es el **lux (lx)**, o lúmenes por metro cuadrado (lm/m²).

También existen varias unidades de iluminancia más antiguas, que ya se han descartado:

Cuadro 2 Unidades de la iluminancia más antiguas

pie-candela (footcandle)	1 fc = 10,764 lx
dalx (figura en la normativa canadiense de seguridad)	1 dalx = 10,764 lx
phot	1 ph = 10.000 lx

Una superficie recibirá 1 lx de iluminancia desde una fuente luminosa puntual que emite 1 cd de *intensidad luminosa* en su dirección desde la distancia de un 1 m. Cuando se emplean unidades norteamericanas no estándares, ello se traduce a 1 fc recibido desde una fuente de 1 cd ubicada a una distancia de 1 pie.

4.8 Divergencia del haz

La **divergencia del haz**, (a veces llamado *apertura del haz*), describe el ángulo entre dos direcciones opuestas entre sí con respecto al eje del haz. Los límites de la divergencia se fijan en el punto donde la intensidad luminosa cae por debajo de una fracción determinada de la intensidad máxima dentro del haz. En cuanto a las balizas de ayuda a la navegación, se suelen expresar las divergencias horizontal y vertical.

Cuando se emplea para describir la dispersión **vertical** de un haz de luz, la divergencia vertical se suele proporcionar con dos ángulos, superior e inferior. A éstos se les dan cifras positivas y negativas, respectivamente, de acuerdo con la geometría de la medición (véase el apartado 11.1.1)

Una práctica habitual consiste en expresar el ángulo entre las dos direcciones opuestas entre sí con respecto al *eje del haz* para el cual la *intensidad luminosa* es la mitad (50%) de la intensidad luminosa máxima (en ocasiones denominado como el *ángulo del haz*). El ángulo entre estos puntos al 50% se denomina, a veces, el ancho a la mitad de altura (FWHM, del inglés «Full Width at Half Maximum»). Se recomienda emplear el ancho a la mitad de altura (FWHM) para expresar la divergencia del haz.

En ocasiones, se expresa el ángulo entre las dos direcciones opuestas entre sí con respecto al *eje del haz* para el cual la *intensidad luminosa* es una décima parte (10%) de la intensidad luminosa máxima (a veces denominado como el *ángulo de campo*). El ángulo entre estos puntos al 10% se denomina, a veces, el ancho a la décima parte de altura (FWTM, del inglés «Full Width at Tenth Maximum»). Cuando se emplea el ancho a la décima parte de altura (FWTM) en vez del ancho a la mitad de altura (FWHM), se hará mención expresa de tal circunstancia.

Cuando los puntos de intensidad luminosa no se ubican a la mitad del valor máximo, se expresará la fracción o el porcentaje del valor máximo.

4.9 Frecuencia de fusión del parpadeo o frecuencia crítica de fusión

Es la frecuencia por encima de la cual el ojo humano percibe una fuente luminosa parpadeante como si fuese fija. El ser humano tiene una frecuencia de fusión del parpadeo de tan sólo 60Hz con mucha luz y de 24Hz con poca luz.

4.10 Distancia de cruce

Ésta es la distancia a la cual se desarrolla plenamente un haz de luz, donde se encuentran los rayos divergentes de las extremidades de la abertura óptica (véase la Figura 25). A esta distancia, la imagen de la fuente luminosa llenará plenamente la abertura del elemento óptico.

4.11 Medida de distancia

Es la distancia física entre la fuente luminosa objeto de la medición y la abertura del instrumento de medición. Cuando se emplea un espejo curvado, como en el caso de la Zero Length (véase el ANEXO II), la distancia efectiva de la medida podría variar con respecto a la distancia física entre la fuente luminosa y el instrumento de medición.

4.12 Medida del ángulo

El ángulo subtendido por la medida de la abertura en la distancia de la medida (véase el apartado 9.9).

4.13 Distancia fotométrica mínima

La distancia fotométrica mínima es la distancia mínima necesaria entre la baliza y el fotorreceptor para garantizar un cierto nivel de precisión en la medición.

La distancia fotométrica mínima depende del nivel de precisión necesario, la baliza y el fotómetro. En muchos casos, no es posible establecer una definición exacta.

En ciertos casos, la distancia de cruce se puede utilizar como la distancia fotométrica mínima (véase el apartado 9.8).

4.14 RMS

La raíz cuadrática media, o RMS, es una medida estadística de la magnitud de una cantidad variable. Se puede calcular para una serie de valores discretos f_i o para una función en continua variación $f(t)$. Su nombre se deriva del hecho de que consiste en la raíz cuadrada de la media de los cuadrados de los valores.

Cuando $f(t)$ es una función del tiempo, la raíz cuadrática media para el intervalo de tiempo $[t_1, t_2]$ sería:

$$RCM = \sqrt{\frac{1}{(t_2 - t_1)} \times \int_{t_1}^{t_2} f^2(t) dt}$$

ecuación 2

Cuando $f(t)$ es una función discreta f_i de tiempos espaciados de manera igual $t_i = i \cdot \Delta t$, entonces se podría reemplazar la integral por una suma:

$$RCM = \sqrt{\frac{1}{N} \times \sum_{i=0}^N f_i^2}$$

ecuación 3

Donde:

$$N \cdot \Delta t = t_2 - t_1$$

Se recomienda utilizar el valor RMS (raíz cuadrática media) para la tensión eléctrica, la corriente y la potencia cuando una baliza tiene una fuente de alimentación de corriente alterna.

4.15 Goniómetro, goniofotómetro [19]

El goniómetro es un instrumento utilizado para medir ángulos geométricos. Cuando tal instrumento se combina con un fotómetro para medir la intensidad luminosa en función de un ángulo geométrico, el dispositivo se llama goniofotómetro. La práctica de medir valores luminosos con respecto al ángulo geométrico se llama goniofotometría.

4.16 Cromaticidad [24]

La cromaticidad es el aspecto del color que considera su longitud de onda dominante o complementaria, además de su pureza, tomadas como un conjunto. Se suele cuantificar trazando un punto proporcionado por dos coordenadas en un modelo de espacio cromático bidimensional. Un ejemplo de ello es un diagrama o esquema cromático (véase el apartado 6.5).

4.17 Distribución espectral [14]

La distribución espectral es la manera en que el valor radiométrico relativo de la radiación electromagnética varía según la longitud de onda.

4.18 Distribución de potencia espectral [14]

Una curva de distribución de potencia espectral (SPD, del inglés «*Spectral Power Distribution*») muestra la potencia radiante emitida por una fuente luminosa en cada longitud de onda o banda de longitudes de onda a lo largo del espectro electromagnético. Para la colorimetría y la fotometría, los límites del espectro se encuentran normalmente entre los 380 y los 780 nm (luz visible). Se puede ponderar la distribución de potencia espectral (SPD) por las curvas cromáticas \bar{x} , \bar{y} y \bar{z} para obtener valores cromáticos de triple estímulo (X, Y y Z) (véase el apartado 6.4). Los valores X, Y, Z que así resultan se podrán, además, reducir a dos valores x, y, que son los que se emplean como las coordenadas de un diagrama cromático bidimensional, o se podrán ponderar por la curva $V(\lambda)$ para obtener un valor fotométrico del flujo luminoso o de la intensidad luminosa.

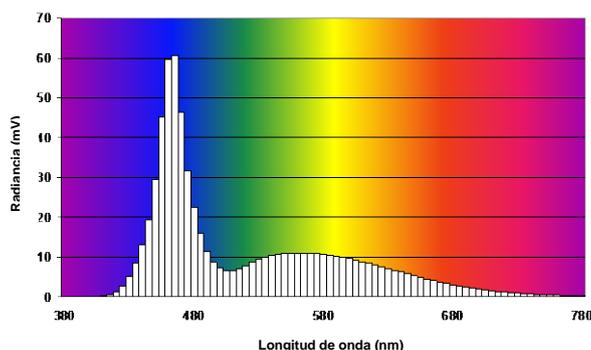


Figura 2 Distribución de potencia espectral de un LED blanco (intervalos de 5 nm)

4.19 Tono cromático

La propiedad de un color, determinada por la longitud de onda dominante de la luz, por medio de la cual se puede percibir.

4.20 Saturación de color

Se define como la pureza cromática, o sea, la ausencia del color blanco y, por lo tanto, de la viveza del color. Un color saturado tendrá una distribución espectral estrecha y sus coordenadas cromáticas se hallarán cercanas a la línea espectral del diagrama cromático (véase el apartado 6.5).

4.21 Croma

Una abreviatura de «crominancia»; describe los atributos de un color, tales como su tono cromático (longitud de onda) y saturación (falta de blancura).

4.22 Velocidad de respuesta

El término se emplea para definir la velocidad máxima de cambio de la tensión de salida de un amplificador con respecto a su tensión de entrada. Esencialmente, la velocidad de respuesta es una medida de la capacidad que tiene un amplificador de seguir la señal de entrada de manera fiel. Se suele expresar como el tiempo que tarda el amplificador en incrementar la salida del 10% al 90% de su máxima amplitud.

Cuando se considera un amplificador utilizado en combinación con un detector fotométrico, la capacidad del amplificador de reproducir las variaciones de la intensidad fielmente cobra importancia. Por lo tanto, cuando se miden luces de destellos cuya intensidad instantánea varía rápidamente con el tiempo, la velocidad de respuesta del amplificador deberá ser más rápida que el tiempo de subida o bajada del perfil del destello.

La velocidad de respuesta también puede ser relevante para los goniómetros cuando se realizan mediciones de intensidad con el goniómetro en movimiento. Se relaciona con el intervalo de tiempo entre los pasos angulares; o sea, cuánto tiempo tarda el goniómetro en moverse de una posición angular a la siguiente. La relación entre el tiempo que se tarda para realizar una medición de intensidad y la velocidad de respuesta del goniómetro puede dar lugar a un error angular.

4.23 Errores de desajuste espectral y su corrección [6]

Cuando se mide una fuente luminosa con una distribución espectral diferente a la que se empleó para calibrar el fotómetro, se pueden producir errores debido a las diferencias entre la respuesta espectral del fotómetro y la curva de respuesta del observador fotométrico estándar $V(\lambda)$. Tales errores se denominan «errores de desajuste espectral» y pueden llegar a ser bastante importantes a ciertas longitudes de onda, normalmente en las regiones roja y azul, donde el fotómetro tiene menor sensibilidad. Son más proclives a producir importantes errores las fuentes luminosas con una distribución espectral estrecha (p. ej. LEDs de color) que las de luz blanca de espectro amplio.

La corrección del desajuste espectral consiste en realizar un ajuste a los resultados de una medición fotométrica para corregir los errores de la respuesta espectral del fotómetro.

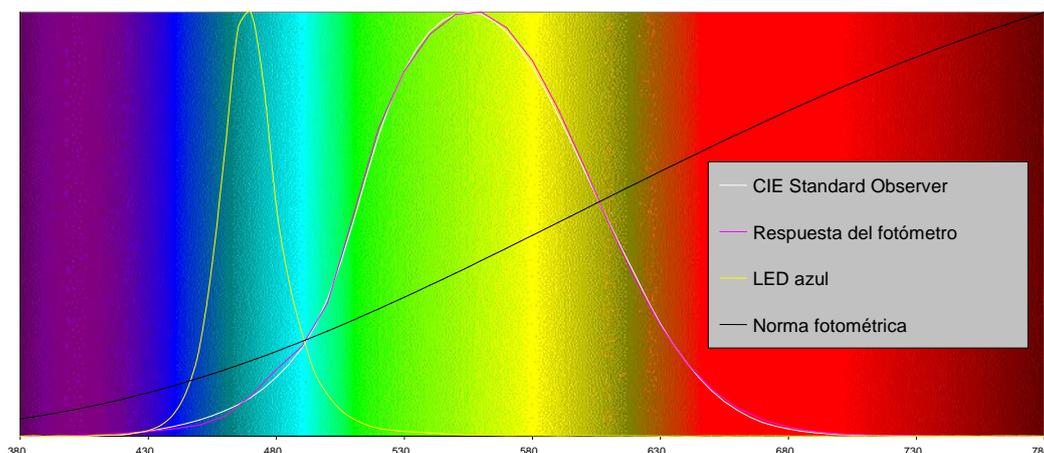


Figura 3 Un trazado espectral mostrando las diferencias entre la respuesta típica de un fotómetro y $V(\lambda)$

- Ejemplo

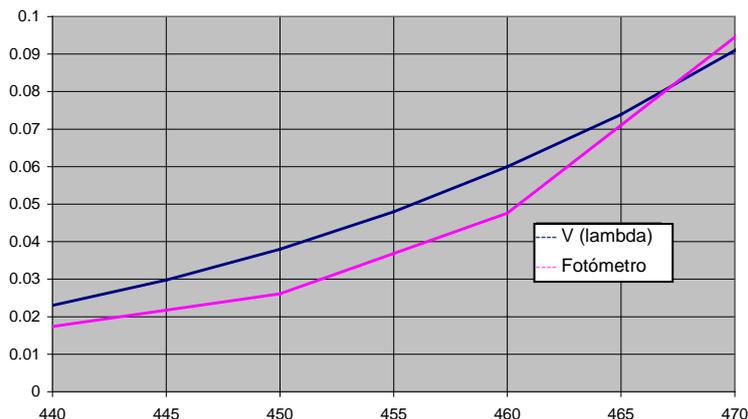


Figura 4 Sección ampliada del espectro mostrando el error fotométrico en la Figura 3

5 PRINCIPIOS DE MEDICIÓN

5.1 Ley de la distancia fotométrica

La medición de intensidad luminosa se realiza midiendo la iluminancia producida por una baliza ubicada a la distancia d del fotorreceptor.

La intensidad luminosa se calcula por medio de la ley de la distancia fotométrica $I = d^2 E$.

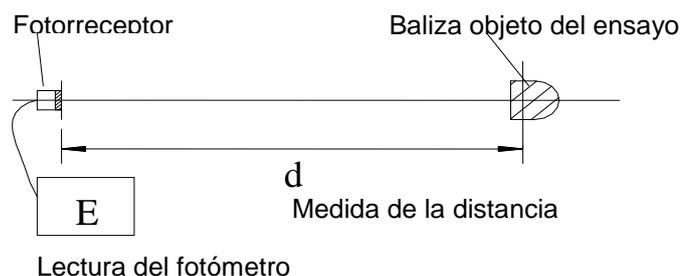


Figura 5 Ley de la distancia fotométrica

Es posible modificar la disposición anterior mediante la introducción de un espejo reflector o empleando la Zero Length (véase el ANEXO II).

5.2 Medición de la distribución angular de intensidad luminosa

Es posible realizar la medición de las distribuciones angulares de las señales luminosas mediante la rotación de la baliza en torno a dos ejes diferentes. La intensidad es una función de dos ángulos $I = I(\alpha, \beta)$.

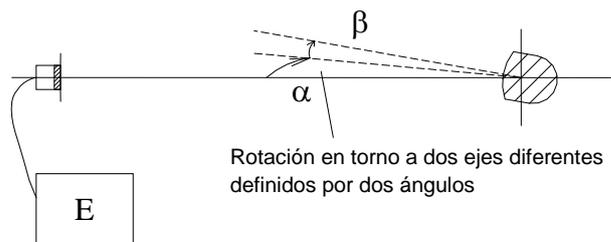


Figura 6 Medición de la distribución angular de intensidad luminosa

5.3 Planos de medición recomendados

Se suele reducir la medición de la distribución de intensidad a un cierto número de planos. Dentro de tales planos, la distribución de intensidad depende de tan sólo un ángulo. En cuanto a las señales luminosas, los planos recomendados son los planos horizontal y vertical.

5.3.1 «Haces concentrados»

El eje de referencia normalmente se encuentra en la dirección con la mayor intensidad o cercano a ella y deberá encontrarse en el cruce de los planos horizontal y vertical. Los planos horizontal y vertical, por consiguiente, deberán incluir el eje de referencia (*datum*). Todos los ángulos se referenciarán a este eje.

- Plano horizontal:

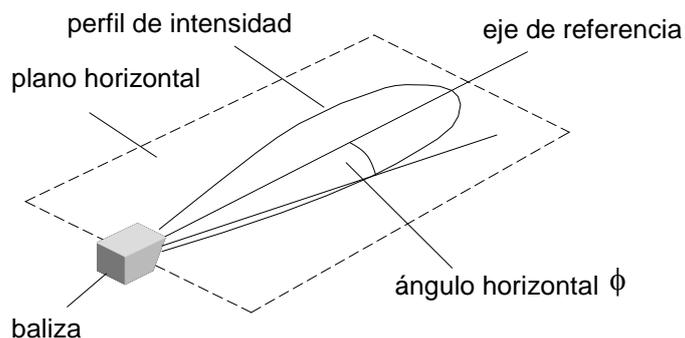


Figura 7 Plano horizontal

- Plano vertical:

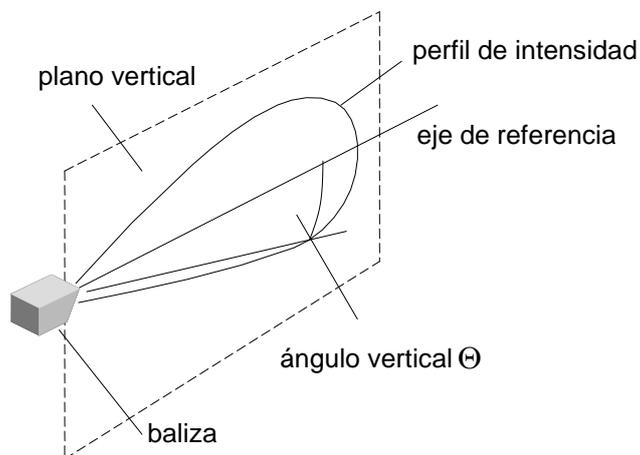


Figura 8 Plano vertical

5.3.2

5.3.3 «Haces en abanico»

- Plano horizontal:

Se tiene que definir un eje de referencia (*datum*) en el plano horizontal. La elección de tal eje es arbitraria, porque no existe una dirección preferida en cuanto a la intensidad. Entonces, todos los ángulos se referencian al eje así definido.

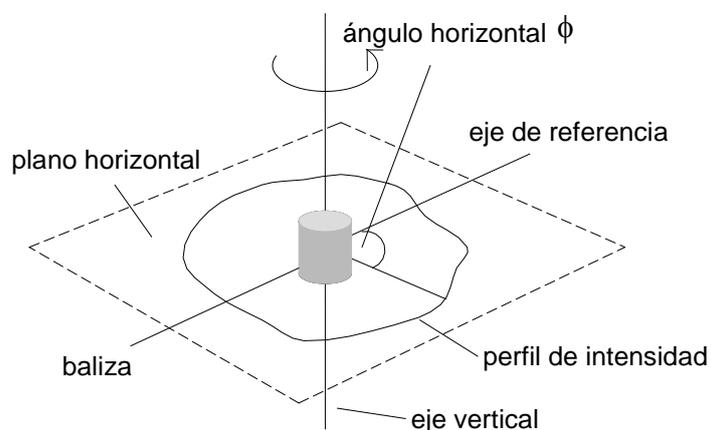


Figura 9 Plano horizontal de un haz en abanico

- Plano vertical

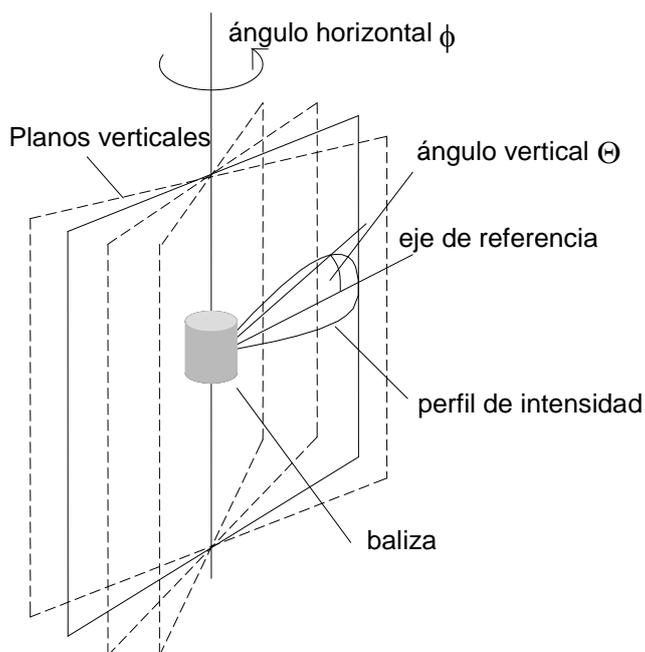


Figura 10 Plano vertical de un haz en abanico

Se recomienda el uso de más de un plano vertical. Cada plano vertical se denomina según su ángulo horizontal con relación al eje de referencia horizontal.

En cuanto a las luces omnidireccionales de un sólo color, se deben medir, como mínimo, tres planos (p. ej. con el ángulo horizontal $\phi = -120^\circ$, $\phi = 0^\circ$, $\phi = +120^\circ$).

En lo que respecta a las luces con sectores de color, las mediciones se tomarán en, por lo menos, un plano vertical por sector.

5.4 La colorimetría [24]

El color de una señal luminosa se describe por medio de coordenadas cromáticas de acuerdo con el «*CIE 1931 Standard Colorimetric Observer*».

Existen dos métodos principales para la determinación de las coordenadas cromáticas.

5.4.1 Medición de triple estímulo

La luz se pasa a través de 3 filtros ópticos diferentes. Tras cada filtro, un receptor mide la cantidad de luz. Se obtienen así tres valores diferentes y las coordenadas cromáticas se pueden calcular a partir de dichos valores.

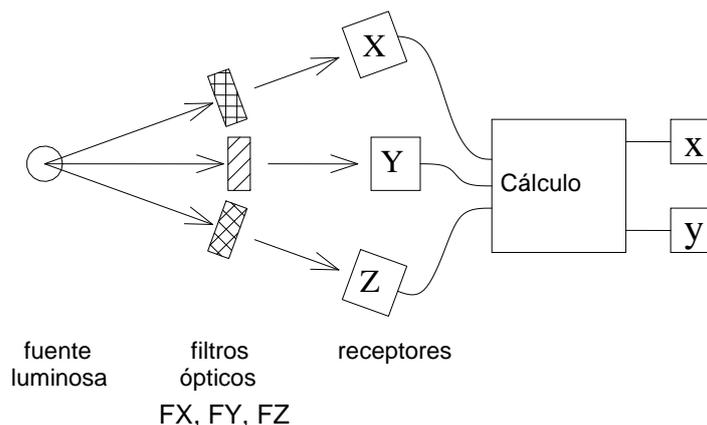


Figura 11 Principio del triple estímulo

5.4.2 Medición espectral

La luz se fracciona en diferentes longitudes de onda. La cantidad de luz correspondiente a cada longitud de onda o intervalo de longitudes de onda se mide con un receptor. Entonces, se emplean los valores espectrales para calcular las coordenadas cromáticas. Si el dispositivo de fraccionamiento se gira, es posible realizar la medición con un receptor único. En tal caso, los valores espectrales se producen en pasos temporales.

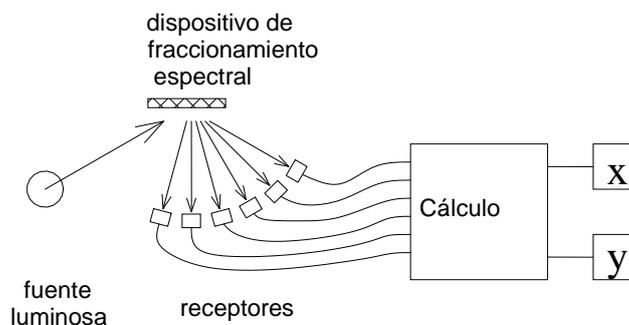


Figura 12 Medición espectral

6 MODELOS Y CURVAS

6.1 Curva de eficiencia luminosa fotópica del Observador Estándar $V(\lambda)$ [16]

Consiste en la respuesta espectral del ojo humano medio en condiciones de mucha luz empleando la visión foveal (dicho de otra manera, mirando un objeto de frente). Desarrollada por la CIE en 1924 [5] [16], a veces se denomina el observador fotométrico estándar de la CIE 2 (*CIE 2 Standard Photometric Observer*). Cuenta con una distribución que es más o menos *gaussiana*, con un pico de longitud de onda a 555 nm.

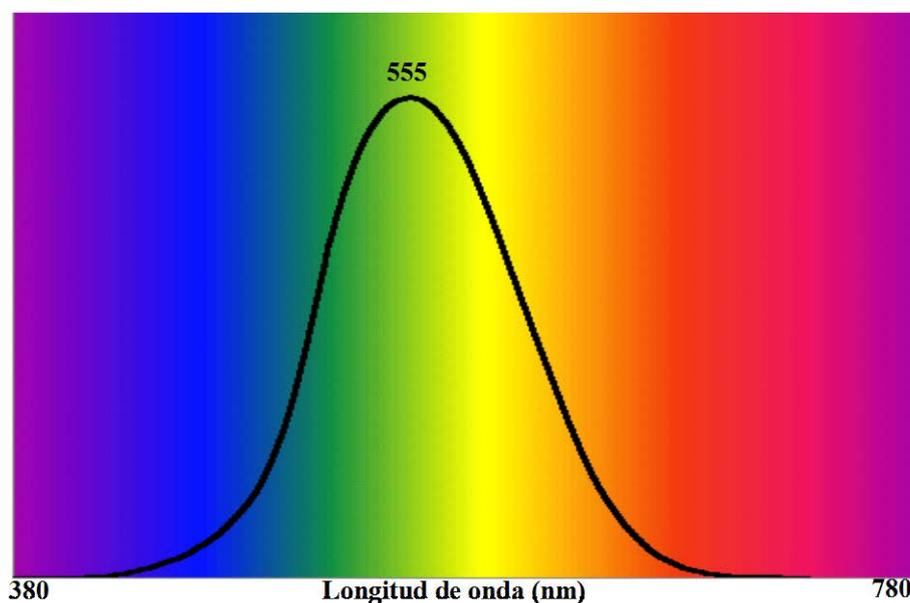


Figura 13 Curva de eficiencia luminosa fotópica $V(\lambda)$

Se tomará en consideración que la curva $V(\lambda)$ se debe emplear para la fotometría de las señales luminosas marítimas. Si se utiliza otra escala visual, tal como la escotópica o la mesópica, se deberá indicar claramente.

6.2 Curva de eficiencia luminosa escotópica $V'(\lambda)$ [16]

Consiste en la respuesta espectral del ojo humano medio con la vista adaptada a la oscuridad (por debajo del valor de luminancia de $0,034 \text{ lm/m}^2$). $V'(\lambda)$ tiene una respuesta de forma similar a la de $V(\lambda)$, pero desplazada hacia las longitudes de onda más cortas, con un máximo a 505 nm.

La visión escotópica significa que no existe el reconocimiento de colores.

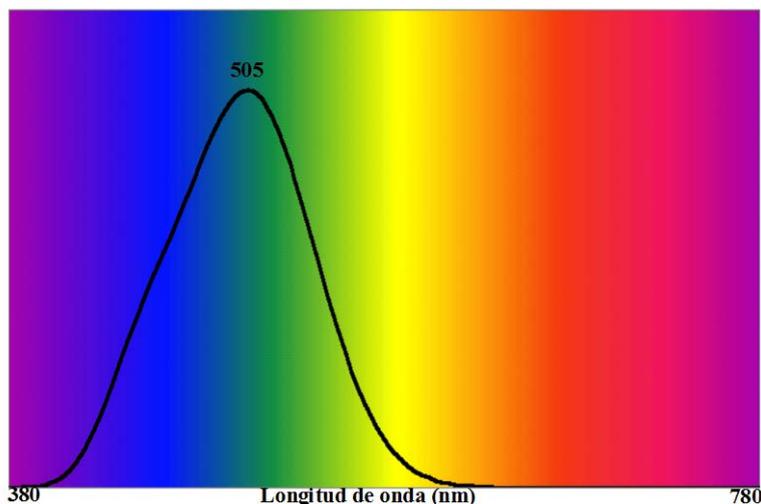


Figura 14 Curva de eficiencia luminosa escotópica $V'(\lambda)$

6.3 La ley de Talbot-Plateau

La ley de Talbot-Plateau establece que, si una fuente luminosa destellea o parpadea a una velocidad por encima de la frecuencia crítica de fusión o frecuencia de fusión del parpadeo, para que tenga la apariencia de una luz continua, la luminancia de dicha fuente será igual a la de una luz estacionaria con la misma luminancia media[4].

Cuando se emplean fotómetros de alta precisión, que suelen tener una velocidad de respuesta reducida, puede ser necesario integrar la salida del fotómetro en el tiempo para garantizar que se pueda aplicar la ley Talbot-Plateau a la hora de medir la intensidad continua de una luz que parpadea o destellea por encima de la frecuencia de fusión. Esto puede resultar innecesario para los fotómetros equipados con fotoamplificadores más lentos.

6.4 *Standard Colorimetric Observer (Observador colorimétrico estándar)* [29]

En el año 1931, la CIE desarrolló tres curvas de correspondencia cromática denominadas \bar{x} , \bar{y} y \bar{z} . Dichas curvas se pueden emplear para ponderar la distribución de potencia espectral (SPD – véase el apartado 4.18) de la fuente luminosa a fin de cuantificar su color.

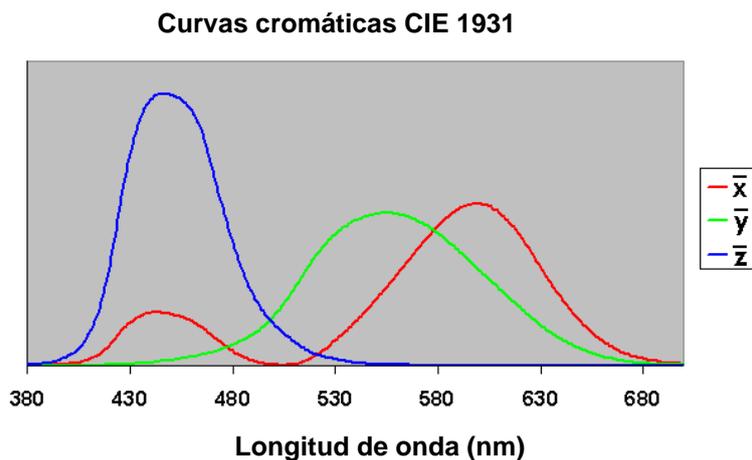


Figura 15 CIE 1931 Standard Colour Observer

6.5 Cromaticidad [24]

Las cantidades integradas que resultan de una distribución de potencia espectral (SPD) determinada, cuando se ponderan por \bar{x} , \bar{y} y \bar{z} , se denominan, respectivamente, X, Y y Z, las cuales se pueden reducir a dos valores a fin de trazar el color de la fuente luminosa en un diagrama cromático x, y donde:

$$x = \frac{X}{X + Y + Z}$$

ecuación 4

$$y = \frac{Y}{X + Y + Z}$$

ecuación 5

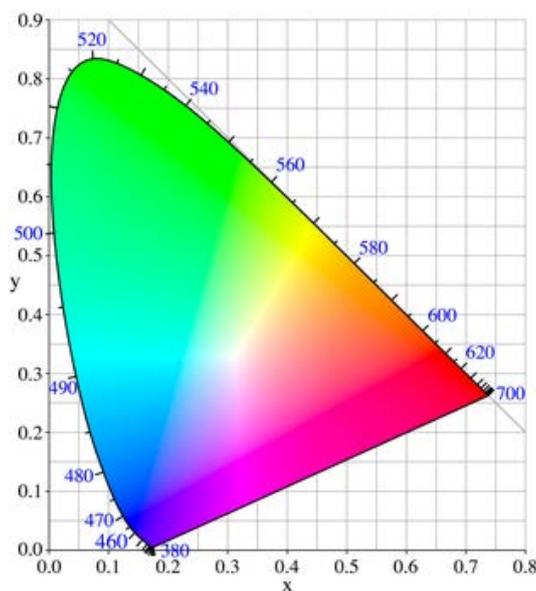


Figura 16 Diagrama cromático de la CIE 1931

El espacio cromático se ve limitado por una línea espectral, donde las longitudes de onda monocromáticas se muestran en unidades de nanómetros (números azules). El diagrama cromático x, y de la CIE 1931 es el que se emplea más extensamente para trazar los colores de las fuentes luminosas.

6.6 Temperatura de color y temperatura de color correlacionada [24]

Se determina la temperatura de color de una fuente luminosa incandescente tradicional mediante la comparación de su tono cromático con el de un radiador de cuerpo negro calentado. La temperatura de color de una lámpara es la temperatura en grados Kelvin a la que el radiador calentado de cuerpo negro corresponde con el tono cromático de la lámpara.

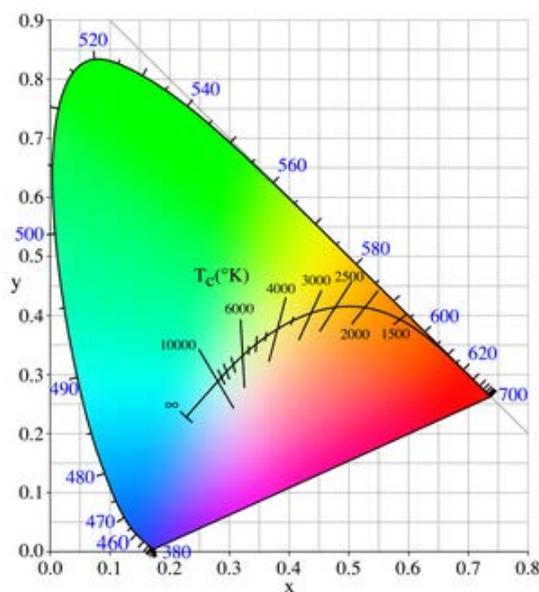


Figura 17 Diagrama cromático x, y de la CIE mostrando el locus planckiano

El *locus planckiano* es el camino que toma un cuerpo de color negro por el diagrama cromático a medida que cambia la temperatura del mismo. Las líneas que cruzan el *locus* representan las líneas de «temperatura de color correlacionada» constante (CCT – *Colour Correlated Temperature*).

6.7 Iluminante A de la CIE [21]

El Iluminante A se suele utilizar como la fuente luminosa de referencia para la calibración de fotómetros. Tiene una distribución espectral igual a la de un cuerpo negro teórico a 2856 K. Una lámpara de filamento de tungsteno, que funciona en las condiciones adecuadas, tiene una distribución espectral similar a la del Iluminante A.

Existen, además, otros iluminantes de la CIE que se emplean como referencia, tales como el Iluminante D65 para la realización de simulaciones diurnas de la medición del color de las superficies; no obstante, se suele emplear el Iluminante A para la fotometría y colorimetría de las fuentes luminosas. Información adicional sobre los otros iluminantes se puede conseguir de la CIE.

7 EQUIPOS DE MEDICIÓN

7.1 Fotómetro

La fotometría, que consiste en la medición de la luz visible, se suele realizar mediante un instrumento de medición capaz de detectar la luz, normalmente mediante un fotodetector, que convierte los fotones incidentes en una corriente eléctrica proporcional. La salida eléctrica del fotodetector se amplifica para proporcionar una lectura, que se puede calibrar a un valor luminoso. Estos dispositivos se denominan fotómetros.

Es posible calibrar un fotómetro en lúmenes por metro cuadrado (lux) para medir la cantidad de luz que impacta en la superficie del fotodetector (iluminancia). En ocasiones, dicho dispositivo se denomina luxómetro.

El luxómetro es el dispositivo utilizado más extensamente en las mediciones de fuentes luminosas para determinar la intensidad luminosa por medio de la ley de la distancia fotométrica.

$$I = d^2 E$$

ecuación 6

Donde:

I es la intensidad luminosa en candelas

d es la distancia en metros

E es la iluminancia en lúmenes por metro cuadrado (lux)

Los datos de salida de un fotómetro se pueden calibrar para proporcionar una lectura en candelas, empleando una medida de distancia conocida y la fórmula anterior.

Si la abertura de salida de un dispositivo emisor de luz se limita a un área determinado A_{emitor} , la lectura del fotómetro se puede calibrar para proporcionar una lectura en candelas por metro cuadrado (luminancia). Estos dispositivos se denominan metros de luminancia y son útiles para medir el brillo de una superficie emisora de luz.

$$L = I / A_{emitor}$$

ecuación 7

Donde:

L es la luminancia en candelas por metro cuadrado

I es la intensidad luminosa en candelas

A es el área en metros cuadrados

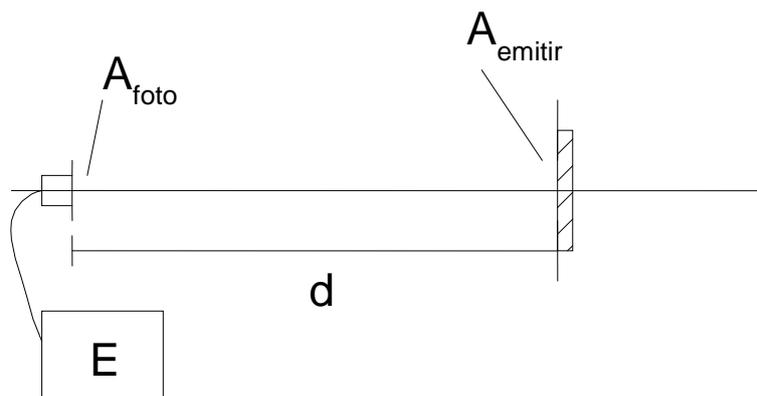


Figura 18 Medición de la luminancia

Se recomienda emplear un fotómetro calibrado. Normalmente, estaría compuesto de un fotodiodo de silicio, un filtro de corrección $V(\lambda)$ y una abertura de precisión. Se puede prescindir de la necesidad de mantener fuentes calibradas si se emplea un detector calibrado dentro de los límites de salida nominales. La fuente luminosa de referencia para la calibración de fotómetros será el Iluminante A de la CIE.

Los fotómetros utilizados para la medición de luces de destellos tendrán una respuesta temporal lo suficientemente rápida como para poder seguir el perfil de intensidad temporal con fidelidad. Cuando se emplean técnicas de conversión analógica a digital (A/D) para trazar el perfil temporal de un destello, la respuesta temporal, o tiempo de integración, del fotómetro deberá ser similar a la del periodo de muestreo para garantizar que no existan lagunas en los datos registrados.

La respuesta espectral del sistema fotométrico se aproximará estrechamente a la curva espectral de eficiencia luminosa $V(\lambda)$ del observador fotométrico estándar de la CIE para la visión fotópica (véase el apartado 6.1). La documentación sobre la calibración del sistema fotométrico deberá incluir los valores de la respuesta espectral del detector fotométrico desde los 380 nm a los 780 nm, en incrementos no mayores de 10 nm. La mayoría de los fotómetros se calibran empleando el Iluminante A (véase el apartado 6.7) y, por lo tanto, cuando se utiliza un fotómetro para medir luces con una distribución espectral diferente a la del Iluminante A (p. ej. luces de colores o lámparas de descarga), se tendrá cuidado de evitar los errores causados por el desajuste espectral (véase el apartado 9.4).

7.2 Goniómetro Tipo1

A efectos de homogeneidad, se recomienda el uso de un goniómetro tipo 1 para realizar la medición angular de las señales luminosas marítimas. Con un goniómetro tipo 1, la fuente se inclina en torno a un eje horizontal fijo, así como en torno a un eje que, en la posición de descanso, es vertical y que, al girarse, sigue el movimiento del eje horizontal. La Figura 19 muestra un goniómetro tipo 1 y los *loci* (lugares geométricos) que recorre el mismo en relación a la fotocélula. El sistema combinado apropiado, que se utilizara con los goniómetros del tipo 1, se describe en la publicación n.º 121 de la CIE del año 1996 [19]. Si se utiliza un goniómetro que no sea del tipo 1, la referencia angular se hará con respecto a la Figura 19.

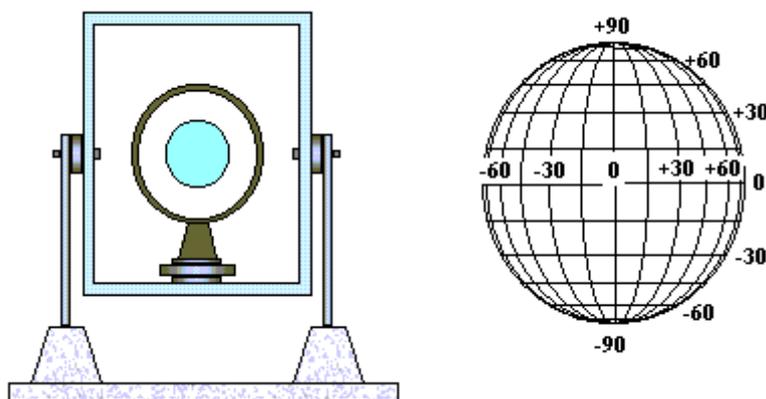


Figura 19 Goniómetro del tipo 1 y el sistema de coordenadas.

Se documentará el método empleado para determinar el factor de incertidumbre de los mecanismos de posicionamiento del goniómetro y se evaluará la incertidumbre expresada del desplazamiento angular. Se debe tomar nota de que, cuando se inclina la mesa del goniómetro, la medida de la distancia desde las partes superior e inferior del elemento ensayado cambia y ello puede producir un error de medición. Es posible corregir tal error, o tratarlo como si fuera una incertidumbre adicional (véase el apartado 8.14).

7.3 «Espejo reflector»

Cuando la distancia fotométrica mínima (véase el apartado 4.11) excede la longitud del camino luminoso de la medición, un espejo plano lo suficientemente grande como para generar una imagen plena del elemento ensayado se puede colocar al final del recorrido. Se podrá, entonces, utilizar el fotómetro para medir la señal luminosa reflejada por el espejo.

Se recomienda que se utilice un espejo de cara reflectante anterior con una superficie plana y muy precisa, de reflectancia alta y de reflectancia espectral plana para minimizar la pérdida y distorsión geométrica de la imagen reflejada.

Sin embargo, la utilización de un espejo puede resultar en un cambio del factor de corrección espectral (SCF) (véase el apartado 9.4). La medición, directa y también sobre el recorrido reflejado, de una fuente de referencia con una salida espectral similar a la del elemento objeto del ensayo se puede utilizar para determinar las pérdidas globales y la distorsión espectral producidas por el espejo. Si la distancia mínima de la medición aún excede la longitud de la medida de la distancia reflejada, las mediciones se realizarán utilizando uno de los dos métodos descritos en el ANEXO II y el ANEXO III.

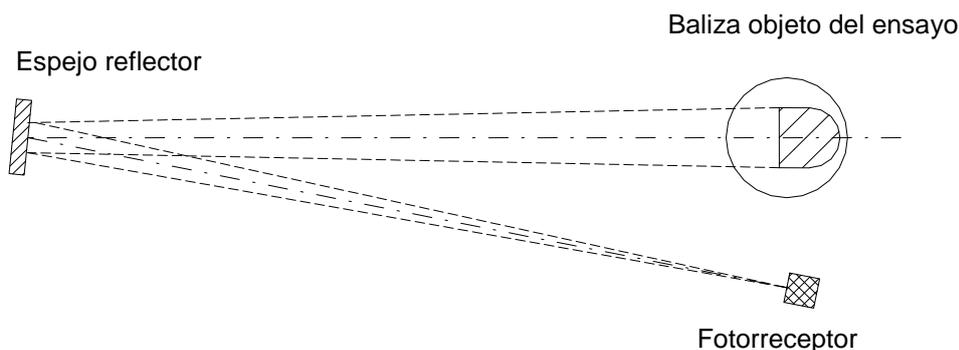


Figura 20 Esquema de un espejo reflector

Se recomienda que el fotorreceptor esté colocado cerca de la baliza objeto del ensayo. En este caso, el ángulo de reflejo del espejo es muy cerrado y el recorrido entre la baliza y el espejo será aproximadamente igual al que media entre el espejo y el fotorreceptor.

Se tendrá cuidado de evitar la luz dispersa, ya que el volumen entre el espejo y la baliza se encontrará muy iluminado.

Si el diámetro del área de salida de luz de la baliza es DB y el diámetro del área de entrada de luz del fotorreceptor es DF , entonces el diámetro del espejo reflector DE deberá ser:

$$DE > \frac{1}{2}(DB + DF)$$

ecuación 8

7.4 Colorímetro de triple estímulo [32]

Un colorímetro de triple estímulo se puede utilizar para medir el color de una fuente luminosa. Tal dispositivo está compuesto de tres fotodetectores, cada uno con filtro que se aproxima a una de las tres curvas cromáticas \bar{x} , \bar{y} y \bar{z} . Entonces, las tres salidas se disponen para dar los valores X , Y y Z , o se calculan para proporcionar las coordenadas cromáticas x , y . Además, ya que la curva Y es igual a $V(\lambda)$, la salida de Y se puede calibrar para proporcionar un determinado valor luminoso (p. ej. lux). En ocasiones, los colorímetros se combinan con la abertura de un metro de luminancia, a menudo con ópticas de entrada.

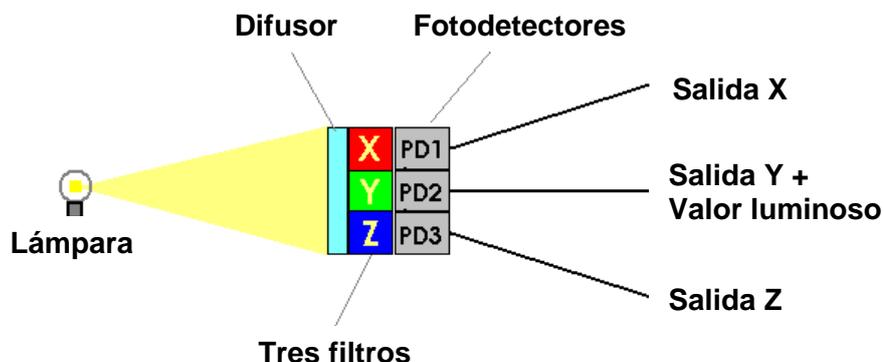


Figura 21 Esquema de un colorímetro de triple estímulo sencillo

Los colorímetros de triple estímulo tienen la ventaja de que permiten realizar una medición de color relativamente rápida. Sin embargo, los modelos más baratos pueden llegar a producir importantes errores porque sus filtros no siguen fielmente las curvas cromáticas. Tales errores son más notables en la medición de fuentes luminosas con una distribución espectral estrecha. Una calibración espectral relativa del colorímetro, mostrando la curva de cada filtro, podrá ser de ayuda para identificar tales errores.

Se proporciona un método para realizar mediciones de color empleando un colorímetro de triple estímulo en el ANEXO IV.

7.5 Monocromador [14]

Un monocromador es un dispositivo capaz de seleccionar bandas muy estrechas de luz (casi monocromáticas) de una entrada determinada de luz. Emplea una rendija de entrada,

algún medio para fraccionar la luz en las longitudes de onda que la componen (p. ej. una red de difracción o un prisma) y una rendija de salida. El ancho de banda de la luz monocromática de salida depende del espaciado de las líneas de la red, así como del ancho de rendija. Se puede girar la red de difracción para seleccionar las diferentes longitudes de onda de la luz.

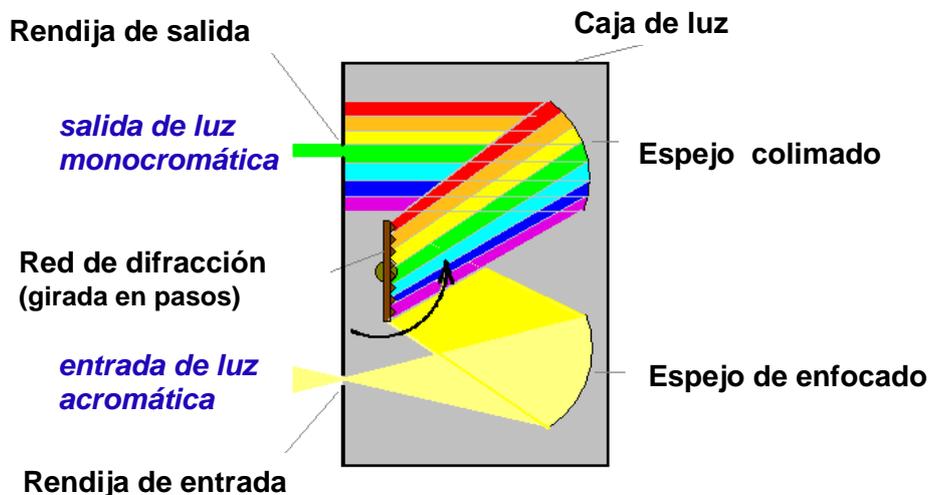


Figura 22 Esquema de un monocromador con motor de pasos del tipo Czerny-Turner

7.6 Espectroscopio, Espectrómetro, Espectrorradiómetro

- Un espectroscopio es un dispositivo utilizado para observar el espectro;
- Un espectrómetro es un espectroscopio equipado con la capacidad de medir longitudes de onda;
- Un espectrorradiómetro es un dispositivo empleado para determinar la distribución de la energía radiante en un espectro.

7.6.1 Espectrorradiómetro paso a paso o de barrido

Un espectrorradiómetro de barrido es un monocromador, tal como el de Czerny-Turner en la Figura 22, con un cabezal radiómetro (usualmente un fotodiodo o fotomultiplicador) acoplado a la rendija de salida. Con este dispositivo se puede medir la potencia radiométrica de cada longitud o banda de onda que compone la luz que pasa a través de la rendija de entrada.

Normalmente, la red de difracción se gira en incrementos y se toma una medición radiométrica a cada paso incrementado. Estos dispositivos son bastante lentos y puede que no sean adecuados para fuentes luminosas destelleantes. Son capaces, sin embargo, de alcanzar un gran nivel de precisión, pero también son proclives a la inestabilidad mecánica y necesitan calibraciones frecuentes.

7.6.2 Espectrorradiómetro en serie

Los espectrorradiómetros en serie emplean un monocromador fijo, en el cual el dispositivo de salida se reemplaza por una serie de dispositivos acoplados por carga (DAC), que funcionan como receptores individuales para cada ancho de banda. Los DAC registran la cantidad de carga, que depende del tiempo de exposición a la luz que se está midiendo.

Este tiempo de exposición se suele denominar tiempo de integración, y se puede variar para acomodar diferentes niveles de luz de entrada.

7.7 Fuentes luminosas calibradas [30]

Las fuentes calibradas son útiles para la realización de mediciones comparativas, pero no son necesarias cuando se emplea un fotómetro calibrado [21]. El método de comparación de medición se denomina, en ocasiones, «medición por sustitución», en el cual el elemento objeto del ensayo es reemplazado por la fuente luminosa calibrada, que se mide sobre el mismo recorrido de medición. Las fuentes calibradas en los laboratorios nacionales de normalización con referencia a las normas nacionales se denominan «lámparas estándar o normalizadas», «lámparas de referencia normalizadas» o «normas de transferencia». Dichas lámparas requieren fuentes de alimentación reguladas con esmero y, además, una medición de la tensión y de la corriente con niveles reducidos de incertidumbre. Los equipos utilizados para medir su tensión y corriente también se ajustarán a normas nacionales; en caso contrario, la «norma de transferencia» perdería todo sentido.

Las normas de transferencia se podrán calibrar para la intensidad luminosa, la temperatura de color, la radiancia espectral o la irradiancia. Un emisor selectivo calibrado, tal como una fuente LED, también se puede utilizar como una alternativa a la corrección espectral cuando no estuviera disponible la respuesta espectral relativa del fotómetro.

La medición por sustitución es útil cuando la transmitancia espectral del recorrido no es lineal, como, por ejemplo, cuando se realiza una medición a una distancia muy grande, o cuando se emplean ópticas de adaptación en el fotómetro, como un espejo reflector o una lente colectora. En cuanto a los espectrorradiómetros de barrido, que pueden sufrir un desplazamiento considerable de la calibración a corto plazo, se recomienda la utilización de una lámpara de referencia normalizada para la irradiancia espectral para calibrar el instrumento antes de cada sesión de medición.

8 PROCEDIMIENTOS GENERALES DE LABORATORIO

Los laboratorios de ensayo establecerán y mantendrán un sistema de calidad en consonancia con el tipo, alcance y volumen de las actividades de calibración y de ensayo que realizan. Todos los procedimientos para la realización de calibraciones y mediciones fotométricas se documentarán como parte del sistema de calidad.

8.1 Procedimientos y documentación por escrito

Se recomienda que se sigan las directrices sobre equipos de laboratorio establecidas en la norma ISO 17025 [20].

8.2 Identificación de los equipos de ensayo

Se incluirá, en los resultados del ensayo y en la documentación producida, un listado de todos los equipos empleados en la medición, incluyendo el número de modelo, el número de serie y detalles sobre la calibración de los mismos.

8.3 Calibración y trazabilidad

Todos los equipos de ensayo se calibrarán en un laboratorio de ensayos homologado y las calibraciones serán trazables a una norma nacional. Los equipos de ensayo se calibrarán en intervalos regulares de tiempo y, si son calibrados por el propio laboratorio, se emplearán equipos trazables a las normas nacionales. Cuando se emite un certificado de calibración de sustitución, las notas de calibración se revisarán para detectar variaciones indebidas con respecto a la calibración anterior. La existencia de grandes cambios en los valores de calibración puede llegar a afectar el presupuesto de incertidumbre de las mediciones anteriores.

Todos los equipos de ensayo se identificarán de forma individual. Los detalles de todos los equipos de ensayo se inscribirán en un registro, con indicación del fabricante, el número de modelo y el número de serie. Tal registro también indicará los plazos para las próximas calibraciones de cada uno de los equipos de ensayo para asegurar que se realicen en los intervalos de tiempo adecuados. Una vez haya finalizado la calibración, el laboratorio de ensayos pegará firmemente en los equipos de ensayo etiquetas de calibración, que indicarán el número de serie del certificado de calibración, el número de serie del equipo y la fecha de la próxima calibración. Asimismo, el laboratorio de ensayos despegará de los equipos de ensayo las etiquetas de calibración obsoletas.

8.4 Identificación de los equipos objeto de ensayos

Cada elemento objeto de ensayos se describirá e identificará de forma individual. Si no hubiera una etiqueta del fabricante, o si la etiqueta no contuviera información suficiente para poder identificar el equipo de forma individual, se pegará una etiqueta con una identificación única a efectos del ensayo. La información proporcionada en tal etiqueta se incluirá en los resultados del ensayo, así como en toda la documentación producida durante los ensayos.

8.5 Equipos objeto de ensayos

El equipo que será ensayado se revisará para verificar que aún esté en buen estado de funcionamiento. El sistema óptico deberá estar equipado con la fuente luminosa adecuada, la cual podrá haber sido suministrada por el fabricante o ser una lámpara de ensayo normalizada, y estará enfocado (si procede) de acuerdo con las instrucciones del fabricante o con los procedimientos normalizados de laboratorio.

Las lámparas de ensayo de laboratorio se seleccionarán para que cumplan rigurosamente con las dimensiones de diseño, el consumo de potencia nominal y la salida nominal de lúmenes. Las tolerancias de fabricación entre lámparas con las mismas especificaciones y del mismo fabricante pueden llegar a ser muy grandes, produciendo así grandes variaciones en la intensidad de la baliza. Parámetros como el espaciado entre los filamentos en espiral y el tamaño de los mismos también tienen un impacto considerable en la distribución de intensidad y, por lo tanto, se recomienda la realización de una inspección y selección minuciosa. Se redactará un procedimiento de ensayo para asegurar que las propiedades de la lámpara de ensayo de laboratorio estén dentro del 3% de las especificaciones del fabricante [11].

Cuando un cambiador de lámpara forme parte del elemento objeto del ensayo, las lámparas se instalarán en todas las posiciones del mismo donde podrían tener un impacto en la salida fotométrica del equipo que será ensayado. Las lámparas se envejecerán, poniéndolas en funcionamiento durante unas decenas de horas antes de su uso inicial [11]. Se tomará nota de que todas las fuentes luminosas, particularmente los LEDs y las lámparas de descarga, pueden necesitar varios cientos de horas de operación (envejecimiento) antes de que se utilicen a efectos de la medición.

Las señales luminosas de ayuda a la navegación marítima se ensayarán a su tensión nominal, y no a su corriente o potencia nominales. Mediante sensores ubicados lo más cerca posible a la entrada de la lámpara o a los circuitos de control de entrada, se realizará un seguimiento de la tensión y la misma se mantendrá constante a lo largo de todo el proceso de medición. También se realizará un seguimiento y registro de la corriente para detectar cualquier cambio en la potencia de entrada durante la medición y así posibilitar la corrección de la salida fotométrica medida (véase el apartado 8.11).

En el caso de fuentes luminosas de LEDs equipadas con circuitos de acondicionamiento, se realizará un seguimiento tanto de la tensión de entrada como de la corriente a dichos circuitos. Normalmente, los LEDs autónomos se tasan a una corriente determinada y no a una tensión, porque dE/dT es muy alto en el punto de operación; por lo tanto, ante la ausencia de circuitos de acondicionamiento, se controlará y se realizará un seguimiento de la corriente y no de la tensión. Cuando se realizan ensayos de intensidad de nuevas balizas y las que hayan estado en servicio durante varios años, se tomará en consideración el envejecimiento de los LEDs.

8.6 Condiciones ambientales

Las condiciones ambientales de las mediciones interiores se estabilizarán a los 25° C (+5°/-10° C) y al 60% ($\pm 10\%$) de humedad relativa. En el caso de las mediciones realizadas al aire libre, la temperatura y la humedad relativa durante el tiempo de la medición se anotarán. Cualquier cambio significativo de las condiciones ambientales durante el curso de la medición se registrará.

8.7 Condiciones de potencia/eléctricas

En los ensayos de equipos alimentados por una fuente de alimentación de c.c., la tensión de salida y/o la corriente se mantendrán dentro del $\pm 0,1\%$, o menos, salvo indicación al contrario por parte de la persona que solicita la medición. Cuando se controla la tensión de salida, el seguimiento de la tensión se realizará tan cerca como sea posible a la fuente luminosa. La tensión de ondulación no sobrepasará el 0,4% de la tensión de salida de c.c.

En cuanto a los ensayos de equipos alimentados por fuentes externas de c.a., la tensión o la corriente eficaz de salida se mantendrán dentro del $\pm 0,5\%$. La suma del valor eficaz (rms) de los componentes armónicos producidos por una distorsión de onda sinusoidal no deberá exceder el 3% del valor rms de la frecuencia fundamental. Si no se logra alcanzar una estabilización adecuada, podría resultar necesario un reajuste de la tensión de salida durante las mediciones.

8.8 Calentamiento de equipos

Antes del inicio de los ensayos o las mediciones, todos los equipos de ensayo alimentados por electricidad se encenderán y calentarán de acuerdo con las instrucciones de uso del fabricante o los certificados de calibración. Ante la ausencia de tales directrices, el laboratorio evaluará el rendimiento del equipo de ensayo para determinar el tiempo necesario de calentamiento para evitar el deslizamiento de cada equipo.

Los equipos objetos de ensayos se pondrán en funcionamiento a su potencia nominal durante un periodo suficiente de tiempo para asegurar su estabilidad. El tiempo de calentamiento elegido para cada tipo de fuente luminosa se documentará en los procedimientos de laboratorio, y dicho tiempo se utilizará de forma consistente.

8.9 Control de la luz dispersa y ambiental

El control de la luz dispersa incluye la eliminación de la luz del elemento objeto del ensayo que se refleja de las paredes, los suelos u otras superficies para evitar que llegue al fotodetector. El control de luz ambiental incluye la eliminación o reducción de la cantidad de luz proveniente de fuentes que no sean el elemento objeto del ensayo. Se podrá determinar el impacto de la luz ambiental mediante el apagado de la alimentación al elemento objeto del ensayo y registrando la salida del fotodetector. El impacto de ambos elementos se podrá determinar mediante la toma de mediciones con el elemento objeto del ensayo encendido, pero con el camino luminoso directo ocluido por una pantalla de un tamaño algo mayor que la abertura de la fuente luminosa.

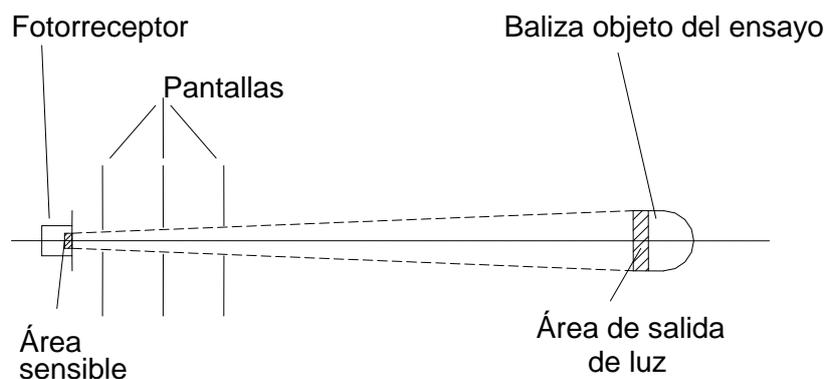


Figura 23 Reducción de luz dispersa mediante pantallas absorbentes

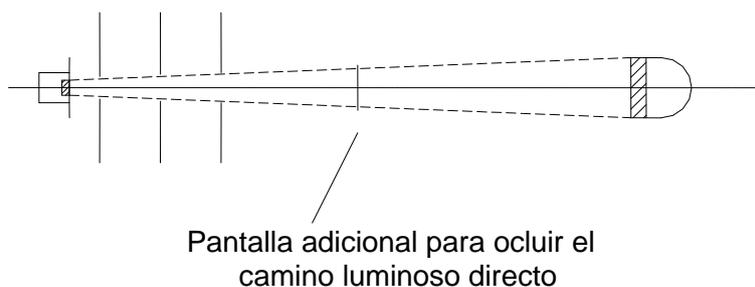


Figura 24 Disposición para determinar tanto la luz ambiental como la dispersa

8.10 Identificación de fuente/datos

Se identificarán claramente los datos de medición «en bruto» o «de origen» y se almacenarán de acuerdo con [20]. La utilización de tales datos en cualquier informe u hoja de ensayo posterior será completamente auditable, de tal forma que se podrá hacer referencia a los datos originales de medición sin ninguna ambigüedad.

8.11 Seguimiento del consumo de potencia del elemento objeto del ensayo

Se medirá y registrará el consumo de potencia del elemento objeto del ensayo durante la realización de la medición fotométrica. En cuanto a los sistemas eléctricos, el seguimiento del consumo de potencia se realizará a lo largo de todo el proceso de medición. En cuanto a otros sistemas, tales como los de gas o combustibles líquidos, el seguimiento del consumo de combustible se realizará, como mínimo, al inicio y al final del proceso de medición, o tomando una media durante el tiempo que dure la medición.

8.12 Sistema de registro

Se registrará toda la información de medición relevante. El medio de registro podrá ser manual, mediante bolígrafo y papel, o consistir en un trazador automático de gráficos o un dispositivo de almacenamiento electrónico, como un ordenador. El sistema de registro empleado tendrá un tiempo de respuesta lo suficientemente rápido como para registrar, de manera fiel, todos los datos de salida relevantes del sistema de medición.

8.13 Software

Se registrarán los detalles de todo el software empleado en cualquier proceso de medición. Se documentará el software desarrollado a medida y empleado en la obtención de datos, el análisis y/o la presentación de los resultados y una copia impresa del mismo se guardará junto con la otra documentación acerca de los procedimientos del ensayo. También se documentarán los algoritmos utilizados para manipular los datos.

8.14 Errores, incertidumbre y confianza

Una expresión de los resultados de una medición es incompleta si no incluye una manifestación de la incertidumbre asociada a ella. Los resultados de todas las mediciones manifestarán la horquilla para un determinado nivel de confianza, dentro de la cual se estima que los valores medidos se encontrarán. Todas las incertidumbres de los tipos A y B asociadas con el proceso de medición se evaluarán de acuerdo con la Guía ISO/IEC 98:1995, «Guía para la expresión de la incertidumbre en la medición» («*Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement*» – GUM) [9]. Para cada proceso de medición realizado, se elaborará un presupuesto de incertidumbre adecuado.

La evaluación de la incertidumbre del tipo A se realiza mediante el análisis estadístico de una serie de observaciones. La evaluación de la incertidumbre del tipo B se realiza a través de métodos que no consisten en el análisis estadístico de las observaciones como, por ejemplo, la incertidumbre expresada en el certificado de calibración de un equipo de ensayo.

8.14.1 Errores sistemáticos (caracterización)

Los errores fijos dentro del sistema de medición se evaluarán y, cuando sea posible, se corregirán mediante la utilización de un factor de corrección adecuado. Tales errores y correcciones se registrarán, pero no necesariamente se expresarán junto con los resultados de la medición. Las cifras adecuadas de la incertidumbre y la confianza asociadas con la corrección de errores se incluirán en el presupuesto de incertidumbre.

8.14.2 Incertidumbre típica combinada

La incertidumbre típica combinada se calcula mediante la combinación de las incertidumbres individuales que componen el presupuesto de incertidumbre, utilizando la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de todas las incertidumbres individuales.

8.14.3 Incertidumbre expandida

La incertidumbre expandida se obtiene mediante la multiplicación de la incertidumbre típica combinada por un factor de cobertura, k . Salvo cuando se determine otra cosa, se podrá asumir que la distribución de la probabilidad del resultado de la medición y la incertidumbre típica combinada es aproximadamente normal. La incertidumbre típica combinada es igual a la desviación típica de la distribución *gaussiana*. Un factor de cobertura adecuado se determinará para proporcionar un nivel de confianza del 95%.

8.14.4 Directrices para el muestreo

El muestreo consiste en tomar un número suficiente de mediciones de una determinada condición para minimizar el impacto de fluctuaciones menores en el proceso de medición. Se deberá alcanzar un factor de cobertura de entre 2 y 3, que sea consistente con la evaluación de las cifras de incertidumbre y los niveles de confianza [9]. Los procedimientos de muestreo se documentarán como parte de los procedimientos normalizados de laboratorio. Cualquier excepción a las directrices de muestreo normalizadas se expresará en los resultados del ensayo.

8.15 Notas/Observaciones:

Una copia de toda la información relevante de la medición, incluyendo observaciones, modificaciones, expresiones de requisitos y las instrucciones del fabricante del elemento objeto del ensayo, se guardará junto con los datos registrados.

8.16 Firmantes autorizados

La(s) persona(s) que realiza(n) la medición será(n) autorizada(s) para firmar por parte de la instalación o el laboratorio que realiza el trabajo. Un registro de la persona que realizó la medición, además de la fecha de la firma y el lugar donde se llevó a cabo la medición, se guardarán con los resultados del ensayo y deberán figurar en cualquier publicación posterior de los mismos.

8.17 Conservación de datos

La conservación de datos se realizará de acuerdo con los procedimientos locales del laboratorio.

9 MÉTODOS Y REQUISITOS DE LA FOTOMETRÍA

9.1 Fotometría de laboratorio estándar

La medición de la intensidad luminosa de una fuente luminosa en el laboratorio se suele realizar mediante la toma de una lectura de la iluminancia, en lúmenes por metro cuadrado (lux), de la fuente luminosa a una distancia medida en metros. Se podrá, entonces, calcular la intensidad luminosa en candelas mediante la multiplicación de la iluminancia por el cuadrado de la distancia, denominada la ley de la distancia fotométrica [5] (véase el apartado 5.1). La transmisividad de la atmósfera a lo largo de las distancias cortas en el laboratorio se podrá tomar como la unidad. La fuente luminosa y los receptores fotométricos se suelen montar en un banco óptico para reducir la incertidumbre de la medida de la distancia. Para determinar la intensidad luminosa de la fuente luminosa en más de una dirección, se podrá girar la fuente luminosa en torno a su centro luminoso y tomar varias lecturas de iluminancia en diferentes orientaciones. Se podrá emplear una esfera de integración para determinar el flujo luminoso total emitido por la fuente luminosa. Los fotómetros que se emplean para medir la iluminancia tienen una respuesta espectral fotópica que se aproxima a la del observador humano estándar, $V(\lambda)$ [6].

Siempre que la medida de la distancia sea relativamente larga con respecto al tamaño de la fuente luminosa (quince veces mayor, en términos generales), este método es sencillo y preciso para fuentes luminosas no enfocadas. No obstante, cuando se miden los aparatos de proyección de haces de luz, tales como un sistema compuesto de una fuente luminosa y una lente o espejo, mayores medidas de distancia son necesarias para asegurar la obtención de resultados libres de errores al utilizar este método. Surgen varios problemas a estas distancias mayores, tales como los efectos de la transmisividad y la alteración atmosférica, así como la dificultad de medir niveles de iluminancia mucho más reducidos. Los aparatos de proyección se podrán girar por diferentes ángulos y se podrán tomar lecturas de iluminancia para determinar la forma del haz proyectado. Se suele emplear un goniómetro para facilitar la medición de la intensidad con respecto al ángulo.

Cuando se mide la salida de fuentes luminosas aisladas, tales como las lámparas incandescentes, la cantidad total del flujo luminoso, en lúmenes, se suele obtener mediante la colocación de la fuente luminosa dentro de una esfera de integración, que retiene toda la emisión luminosa de la lámpara. Dichas esferas tienen que ser varias veces más grandes que la fuente luminosa que se está midiendo y requieren un calibrado cuidadoso, pero la salida es una medida útil del rendimiento de la lámpara. El flujo luminoso total es la cifra que los fabricantes de lámparas suelen citar.

Consejos adicionales sobre la fotometría básica se pueden encontrar en las publicaciones de la CIE [5], [8], [19] y [31].

9.2 Alineación

Se identificará un punto de referencia en el perímetro del elemento objeto del ensayo para que se identifique, claramente, la dirección de la radiación hacia el horizonte. Tal punto podrá ser una marca del fabricante o un punto colocado por el laboratorio de ensayos. Los equipos sometidos al ensayo se instalarán en el goniómetro y se alinearán con el sistema de medición, de manera que el punto de referencia esté alineado con la dirección de medida. Cuando sea posible, la altura de la mesa del goniómetro será ajustable para que se puedan alinear tanto el eje horizontal como el vertical de la óptica con los ejes de rotación del goniómetro. Si ello no fuera posible debido a las restricciones del diseño de la mesa del goniómetro, se corregirán los errores registrados en la distancia de medida causados por la inclinación de la mesa o se incluirán la incertidumbre presupuestada. El centro de la

abertura del fotodetector se ubicará en la línea perpendicular al eje de rotación del goniómetro. El proceso de alineación y la incertidumbre asociada formarán parte del procedimiento de documentación del laboratorio. Ya que el ángulo de incidencia será siempre cercano a cero, no existe la necesidad de realizar la corrección del coseno.

Cuando se emplea un espejo reflector plano, la distancia entre el elemento objeto del ensayo y el espejo será lo más cercana posible a la distancia que separa el espejo del fotómetro. Se deberá minimizar el ángulo de reflexión de la trayectoria de la luz. La perpendicular a la superficie del espejo deberá encontrarse en el plano definido por el eje óptico del elemento objeto del ensayo y el plano de referencia del goniómetro [19].

La medida de la distancia y la medida del ángulo serán conocidas y debidamente expresadas para todos los procedimientos de medición.

9.3 Respuesta del sistema fotométrico; $V(\lambda)$ y f_1'

La respuesta espectral global del sistema fotométrico empleado se aproximará estrechamente a la curva de eficiencia luminosa espectral $V(\lambda)$ del observador fotométrico estándar de la CIE para la visión fotópica (véase el apartado 6.1). Para los emisores de banda ancha, tales como las lámparas incandescentes, se podrá utilizar un valor de medición único de la respuesta espectral, que sería la cifra de la adecuación del ajuste (f_1') [6] del sistema, para determinar la incertidumbre de la medición. En cuanto a las fuentes luminosas con distribuciones espectrales estrechas o que varían rápidamente, tales como los LEDs o las lámparas de haluro metálico, la desviación de $V(\lambda)$ de la respuesta del sistema fotométrico en longitudes de onda específicas se tendrá que compensar mediante la utilización de la corrección espectral (véase el apartado 9.4).

9.4 Corrección espectral

Incluso los sistemas fotométricos con valores reducidos de f_1' pueden presentar errores significativos en los extremos del espectro visible. Si se está realizando una medición de una fuente luminosa con una distribución de potencia espectral que varía considerablemente con respecto a la de la fuente luminosa de calibración, particularmente si tiene una banda de distribución estrecha (como las fuentes LED), se realizará una corrección espectral. Un método aceptado de corrección consiste en la utilización de un factor de corrección espectral (SCF) [6], tal y como nos lo da la siguiente expresión:

$$SCF = \frac{\int_{\lambda} S_A(\lambda) S_{rel}(\lambda) d\lambda \int_{\lambda} S_t(\lambda) V(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda} S_A(\lambda) V(\lambda) d\lambda \int_{\lambda} S_t(\lambda) S_{rel}(\lambda) d\lambda}$$

ecuación 9

donde:

$S_t(\lambda)$ es la distribución de potencia espectral de la lámpara de ensayo;

$S_A(\lambda)$ representa los datos espectrales del iluminante A de la CIE;

$S_{rel}(\lambda)$ es la reponsividad espectral relativa del fotómetro.

Mediante esta ecuación, se puede obtener el factor de corrección para cualquier fuente luminosa con una distribución de potencia espectral conocida (véase el apartado 4.18). Si se emplea como referencia una fuente luminosa calibrada, se podrá sustituir su distribución de potencia espectral $S_R(\lambda)$ por $S_A(\lambda)$.

El factor de corrección tendrá un nivel de incertidumbre asociado, derivado del proceso de medición espectral y los detalles pertinentes de la calibración de los equipos empleados en la medición.

Un segundo método de corrección espectral consiste en la utilización de una fuente luminosa calibrada con la misma distribución de potencia espectral que la de la lámpara de ensayo. La medición de la fuente luminosa calibrada establecerá un factor de escala, que se podrá utilizar para corregir la iluminancia medida del elemento objeto del ensayo.

9.5 Medición de dependencia angular de intensidad luminosa [18]

La medición de dependencia angular, a veces denominada la distribución angular de intensidad luminosa (véase definiciones), se suele realizar mediante la utilización de un goniómetro. Un goniómetro consiste en una mesa de goniómetro (de inclinación y giro), sobre la cual se monta el elemento objeto del ensayo y un fotómetro, ubicado en la distancia, que mide la luz emitida por el elemento. A medida que el goniómetro se mueve o pasa por las varias posiciones angulares, el fotómetro registra la intensidad luminosa en cada ángulo. Existe una relación importante entre la resolución angular del goniómetro y la medida del ángulo del fotómetro (véase el apartado 9.9).

Para llevar a cabo las mediciones angulares con el goniómetro, suele ser necesario que el elemento objeto del ensayo emita una luz fija. En cuanto a las balizas giratorias, esto se puede lograr mediante la deshabilitación del mecanismo de rotación y fijando el mecanismo en una posición. Si el elemento objeto del ensayo emite más de un haz de luz, cada eje de haz o superficie se identificará con un punto de referencia claramente definido. Se realizarán trazados verticales y horizontales por separado para cada eje de haz.

Si la fuente luminosa de una baliza giratoria no es homogénea y la medición se realiza mediante la rotación de la baliza entera, incluyendo la fuente luminosa, en el goniómetro, se obtendrán datos de salida adicionales de la fuente luminosa aislada como, por ejemplo, una curva polar de la lámpara. Si la medición se realiza con la lámpara en una posición fija y no se la gira con el goniómetro, las mediciones de todos los haces de luz emitidos se realizarán con la fuente luminosa en dos posiciones diferentes, aquéllas que proporcionan la máxima y mínima intensidad.

En cuanto a las balizas omnidireccionales con una fuente luminosa de destellos, se pondrá dicha fuente en funcionamiento de manera continua, siguiendo las instrucciones de uso del fabricante. Si no estuvieran disponibles tales instrucciones, se buscará el consejo del fabricante. Se tomará en consideración que la intensidad continua de una baliza exhibiendo una luz fija podría variar con respecto a la intensidad de pico de la misma baliza cuando emite una luz de destellos (véase el apartado 11.4).

9.6 Requisitos mínimos de la resolución angular

Los requisitos mínimos para los dos tipos principales de sistemas ópticos de las ayudas a la navegación figuran a continuación:

9.6.1 Linterna omnidireccional – (haz en abanico)

- perfil horizontal, trazado de 360 grados, lecturas cada 1,0 grados o menos;
- perfil vertical hasta los puntos del 1% de la intensidad (o la lectura más reducida posible), lecturas cada 0,1 grados o menos.

Se registrarán, como mínimo, tres perfiles verticales equidistantes, uno de los cuales se tomará en la posición donde la intensidad en el eje es la más cercana posible al valor del 10 por ciento del perfil horizontal. Podrían ser necesarios perfiles verticales adicionales para realizar una investigación adecuada de las irregularidades en el perfil horizontal.

9.6.2 Balizas direccionales y giratorias, y proyectores de precisión

- perfil horizontal hasta los puntos del 1% de la intensidad (o la lectura más reducida posible), lecturas cada 0,1 grados o menos;
- perfil vertical hasta los puntos del 1% de la intensidad (o la lectura más reducida posible), lecturas cada 0,1 grados o menos.

9.7 Medición de dependencia temporal de intensidad luminosa

Para determinar la intensidad eficaz de una señal luminosa de ayuda a la navegación omnidireccional que destellea con un carácter determinado, se realizará una medición de la dependencia temporal del perfil de intensidad luminosa. No será necesario medir los valores absolutos de la intensidad luminosa instantánea, siempre y cuando la intensidad de pico durante el destello sea igual a la intensidad medida cuando el elemento objeto del ensayo emite una luz fija. Ello requiere que la duración de un destello generado por el cierre de contactos (como en el caso de una lámpara incandescente de tungsteno que se enciende y apaga) sea lo suficientemente larga como para garantizar que se alcance la salida plena de la fuente luminosa. Algunos ejemplos de los tipos de iluminante que podrían presentar diferentes valores para la intensidad instantánea de pico y la intensidad continua son:

- Una lámpara de filamento de tungsteno cuyo tiempo para alcanzar la incandescencia plena es mayor que el tiempo de cierre de contactos (CCT, del inglés «*Contact-Closure Time*») del dispositivo que controla la alimentación de la lámpara; [2]
- Un LED alimentado con corriente constante, cuya intensidad luminosa disminuye con el tiempo como resultado de un aumento de su temperatura de unión.

Se tendrá cuidado, por lo tanto, de asegurar que tales dispositivos alcancen la incandescencia plena durante la medición del perfil del destello o de que se conozca la relación entre la intensidad instantánea de pico y la intensidad continua. La última se podrá tratar como un error al que se le aplica un factor de corrección con un nivel de incertidumbre asociado.

En cuanto a las balizas giratorias, se podrá trazar la intensidad luminosa con respecto al tiempo, permitiendo que la baliza gire bajo su propia potencia y registrando cada haz de luz cuando pasa por el instrumento de medición. Con este método, la fuente luminosa no suele girar. Si la fuente luminosa no fuese homogénea, se realizarán mediciones de todos los haces de luz emitidos con la fuente luminosa en dos posiciones diferentes, aquéllas que proporcionan la máxima y mínima intensidad.

9.8 Distancia fotométrica mínima

Antes de comenzar la medición, se estimará la distancia fotométrica mínima del elemento objeto del ensayo. Ello consiste en realizar el cálculo de la distancia de cruce de un aparato de proyección, tal como una luz de ayuda a la navegación marítima. En su libro sobre la

fotometría, John W. T. Walsh describe un método para determinar la distancia de cruce [8], que figura a continuación:

$$d = \frac{R^2}{4f} + \frac{R}{r} \left(f + \frac{R^2}{4f} \right)$$

ecuación 10

donde:

- d = la distancia de cruce
- f = la distancia focal del sistema óptico
- R = el radio de la abertura de la óptica
- r = el radio de la fuente luminosa

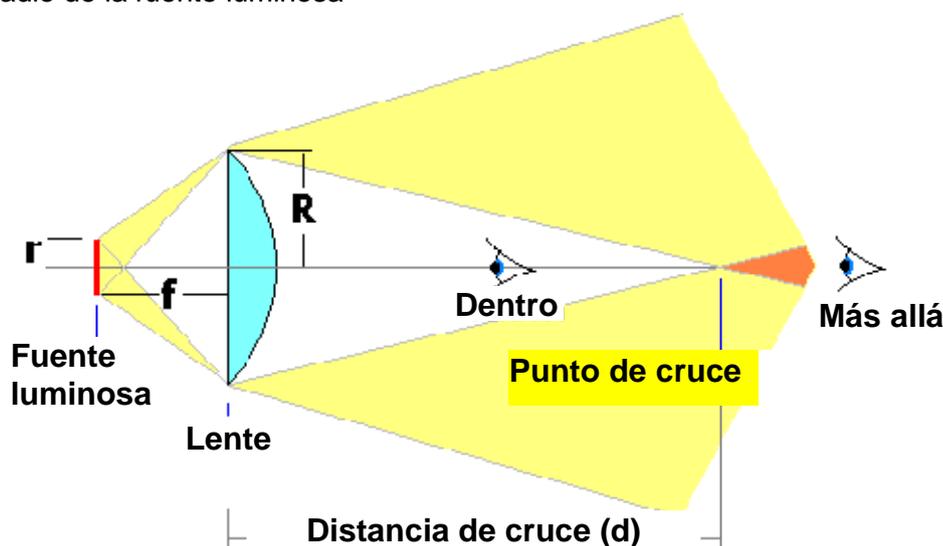


Figura 25 Distancia de cruce

Una aproximación a la distancia de cruce se puede obtener mediante la siguiente fórmula:

$$d = 2 \frac{fR}{r}$$

ecuación 11

Tal aproximación sólo es válida para un sistema de lentes ópticas con un ángulo de captación de aproximadamente 63°. Si existe una notable diferencia en el ángulo de captación, se utilizará la fórmula completa, tal y como la recomienda Walsh,.

La ecuación 11 es válida para elementos ópticos circulares con una fuente luminosa esférica; sin embargo, cuando el sistema óptico es más grande en una dimensión que en otra como, por ejemplo, es el caso de una lente rectangular con una fuente luminosa cilíndrica, las distancias de cruce vertical y horizontal serán diferentes. En tales casos, la fórmula se puede expresar de la siguiente manera:

$$d = 2 \frac{fH}{h}$$

ecuación 12

donde:

d = la distancia de cruce
 f = la distancia focal del sistema óptico
 H = la altura de la abertura de la óptica
 h = la altura de la fuente luminosa

o:

$$d = 2 \frac{fW}{w}$$

ecuación 13

donde:

d = la distancia de cruce
 f = la distancia focal del sistema óptico
 W = el ancho de la abertura de la óptica
 w = el ancho de la fuente luminosa

Se calcularán tanto la distancia de cruce de la altura como la del ancho y se empleará la mayor de las dos. En cuanto a una baliza omnidireccional, tan sólo la distancia de cruce vertical es relevante y, por lo tanto, tan sólo la ecuación 12 es pertinente.

En cuanto a un proyector de sectores de precisión, la distancia de cruce se podrá expresar de la siguiente forma [27]:

$$d = 2 \frac{R}{\alpha}$$

ecuación 14

donde:

d = la distancia de cruce
 R = el radio de la abertura óptica
 α = la resolución angular solicitada

La distancia fotométrica mínima se podrá tomar como el doble de la distancia de cruce calculada.

En los casos en que las dimensiones de los componentes ópticos se desconocen, se podrá determinar la distancia fotométrica mínima mediante la medición de la intensidad a varias distancias diferentes de la baliza, pero siempre en la misma coordenada radial, evaluando la distancia más allá de la cual la intensidad medida llegue a ser consistente [28]. En la práctica, tal método se limitará a pequeñas balizas selladas, cuyos componentes no se pueden medir.

9.9 Medida de la abertura y medida del ángulo

La medida de la abertura es el tamaño físico de la superficie activa del fotorreceptor o, dicho de otra manera, la zona que recibe la luz que se está midiendo. A veces, se expresa como un área o, si la abertura es circular, como un radio o un diámetro.

La medida del ángulo se define por la abertura en la medida de la distancia y suele referir a una fuente en punto que es el objeto de la medición. La medida del ángulo cobra importancia cuando se lleva a cabo la goniometría, en donde se traza un gráfico de intensidad con respecto al ángulo. La medida del ángulo describe el ángulo integral sobre el cual se realiza cada medición incremental y, por lo tanto, se aproximará al ángulo incrementado del goniómetro.

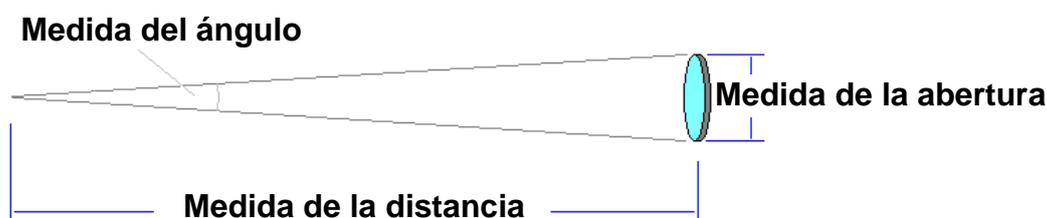


Figura 26 Medida del ángulo

Siempre que $a \ll d$, la medida del ángulo podrá calcularse de la siguiente forma:

$$\theta = 2 \times \arctan \frac{a}{2d} \approx \arctan \frac{a}{d} \approx \frac{a}{d} [\text{radianes}]$$

ecuación 15

o siempre que $r \ll d$:

$$\theta = 2 \times \arctan \frac{r}{d} \approx \frac{2 \cdot r}{d} [\text{radianes}]$$

ecuación 16

donde:

- θ es la medida del ángulo
- a es el diámetro de la medida de la abertura
- r es el radio de la medida de la abertura
- d es la medida de la distancia

9.10 Métodos de medición detallados

Además de estos métodos de medición y requisitos generales, se han revisado y aprobado, para su inclusión en este documento, dos métodos detallados para la fotometría de los aparatos de proyección de las señales luminosas de ayuda a la navegación: la fotometría Zero Length (ANEXO II) y la telefotometría al aire libre (ANEXO III). La mayoría de los equipos y los procedimientos de medición son iguales para todos los métodos. Los requisitos específicos de ambos métodos se tratan en sus secciones respectivas.

Se han revisado y aceptado estos métodos detallados, ya que proporcionan resultados equivalentes dentro de las incertidumbres expresadas. No se excluyen otros métodos de

medición, pero también deberán cumplir con los mismos criterios de trazabilidad y de evaluación de incertidumbre establecidos en esta recomendación.

10 MÉTODOS Y REQUISITOS DE LA COLORIMETRÍA

10.1 Colorimetría de laboratorio estándar

La medición del color de una fuente luminosa en el laboratorio se lleva a cabo mediante uno de dos métodos; la utilización de un colorímetro de triple estímulo (véase el apartado 7.4), o bien de un espectrorradiómetro (véase los apartados 7.5 y 7.6). Los resultados de cualquiera de estos métodos se reducirán a coordenadas x , y , que hacen posible trazar un punto de color en el diagrama cromático de la CIE 1931 (véase el apartado 6.5) [24]. La transmisividad de la atmósfera a lo largo de distancias cortas en el laboratorio se podrá tomar como la unidad. La fuente luminosa se suele montar en una mesa óptica para reducir la incertidumbre de la medida de la distancia. Para determinar el color de la fuente luminosa en más de una dirección, se podrá girar la fuente luminosa en torno a su centro luminoso y realizar varias mediciones en diferentes orientaciones. Para garantizar que una fuente luminosa ilumine de forma plena y homogénea la medida de la abertura, se podrá utilizar un difusor o esfera de integración.

Siempre que la distancia de medida de sea relativamente larga con respecto al tamaño de la fuente luminosa (como regla general, quince veces mayor que la dimensión más amplia de la fuente luminosa), este método es sencillo y preciso para fuentes luminosas aisladas o sin enfocar, cuando la medida del ángulo carece de importancia. No obstante, cuando se realiza la medición de aparatos de proyección de haces de luz, tales como un sistema compuesto de una fuente luminosa y una lente o un espejo, podría llegar a ser importante la medida del ángulo y la regla general ya no sería de aplicación, especialmente cuando se están midiendo diferentes sectores de colores. También cobra importancia cuando se considera el color observado de una baliza compuesta de una serie de LEDs, que podría exhibir diferentes colores individuales. Si es necesario que la medida del ángulo sea reducida, entonces, o bien se incrementará la medida de la distancia o bien se reducirá la medida de la abertura. A medidas de distancia mayores, los niveles más reducidos de iluminancia en la medida de la abertura podrían aumentar la incertidumbre de la medición de forma considerable debido al «ruido» de los instrumentos. Se podrá emplear un goniómetro para facilitar la medición del color con respecto al ángulo.

Cuando se mide el color global de una luz, la medición podrá llevarse a cabo colocando la baliza en una esfera de integración. Sin embargo, si se está midiendo la dependencia angular del color (por ejemplo, de una luz de sectores), se deberá emplear una distancia colorimétrica mínima. La distancia de cruce, definida en el apartado 9.8, se podrá utilizar a estos efectos.

La temperatura de unión de un LED es proporcional a su longitud de onda y, por lo tanto, es probable que el color de un LED cambie durante su funcionamiento a medida que el dispositivo calienta la unión. Esto significa que puede haber una diferencia considerable entre un LED que exhibe un carácter rítmico con un ciclo de servicio bajo y otro que presenta un ciclo de servicio alto (p. ej. de ocultaciones) o una luz continua. Antes de realizar cualquier medición de color, se recomienda tomar una media del color a lo largo de la duración del destello y que se le permita al LED estabilizarse a su temperatura de funcionamiento.

Consejos adicionales sobre la colorimetría básica se pueden encontrar en las publicaciones de la CIE [14], [24], [30], [33], [34].

10.2 Alineación

Siempre que sea posible, el punto de referencia, identificado en el apartado 9.2 para la medición fotométrica, será el mismo para la colorimetría. Se proporcionará información acerca de la distancia de medición y la medida del ángulo (véase el apartado 9.9).

10.3 Respuesta espectral del sistema de medición

Los colorímetros de triple estímulo tienen una respuesta espectral que se aproxima al del observador colorimétrico estándar (véase el apartado 6.4) [24]. Sin embargo, como en el caso de los fotómetros, los tres filtros empleados para obtener la respuesta inevitablemente introducen errores. Ya que el proceso de medición consiste en la combinación de las respuestas de los tres filtros, la corrección del desajuste espectral es mucho más complicada en el caso de los colorímetros de triple estímulo que en el de los fotómetros. Los errores son más probables cuando se miden fuentes luminosas con una distribución espectral estrecha (p. ej. LEDs) y cuando tal distribución se concentra en la parte menos sensible del espectro visible.

Idealmente, los espectrorradiómetros tendrían una respuesta plana en términos radiométricos a lo largo del espectro visible, pero, en la práctica, nunca se da el caso. La calibración de los espectrorradiómetros con una lámpara denominada distribución de potencia espectral (SPD) (véase el apartado 7.7) se suele llevar a cabo antes y después de cada sesión de medición. Se logra la corrección de la respuesta espectral del sistema mediante la comparación de los datos obtenidos durante la sesión de la lámpara estándar con los de la hoja de calibración de la misma.

10.4 Iluminación de la abertura de medición.

A la hora de medir el color, es importante que la luz que se medirá ilumine, de forma plena y homogénea, la abertura de entrada del instrumento de medición. Ello se puede lograr mediante la inserción de un difusor o una esfera de integración entre la fuente luminosa y la la abertura de medición. Sin embargo, tales dispositivos pueden llegar a atenuar mucho la entrada de luz al instrumento.

10.5 Consideraciones acerca de la fluctuación rápida de la intensidad de la fuente luminosa

Como en el caso de los fotómetros, la fluctuación rápida de la intensidad radiante de la fuente luminosa puede causar errores de medición. La respuesta temporal del instrumento de medición deberá ser lo suficientemente rápida como para seguir la fluctuación, o bien tener la capacidad de integrar la fluctuación con la suficiente precisión como para dar una media a lo largo del intervalo de medición necesario.

10.6 Medida de la distancia mínima

En cuanto a las balizas de ayuda a la navegación, el área iluminada de la baliza se tomará en consideración cuando se realizan mediciones del color. En el caso de lámparas incandescentes aisladas o filtradas, el color cambia muy poco cuando se percibe desde ángulos diferentes. Sin embargo, esto no es necesariamente el caso con respecto a los grupos o series de LEDs, en que un cambio del ángulo de visión revelará a un grupo diferente de fuentes luminosas.

A menudo, la medida de la distancia se ve limitada por la sensibilidad del instrumento de medición. En ocasiones, será posible emplear un aumento óptico para incrementar la entrada de luz en la abertura de medición. También se podrá utilizar un sistema de medición de «Zero Length», tal y como se describe en el ANEXO II para la fotometría, con buenos resultados para la colorimetría. No obstante, la utilización de elementos ópticos en el recorrido introduce distorsiones espectrales y tales errores se deberán corregir. La utilización de una lámpara espectral estándar (p. ej. medición por sustitución) puede ayudar en la eliminación de dichos errores.

10.7 10.7 Métodos de medición detallados

Además de estos métodos de medición y requisitos generales, dos métodos detallados para la colorimetría de los aparatos de proyección, como las señales luminosas de ayuda a la navegación, se han revisado y aprobado para su inclusión en este documento: la colorimetría de triple estímulo (ANEXO IV) y la espectrorradiometría (ANEXO V). En la actualidad, las incertidumbres de medición de ambos métodos se encuentran en proceso de revisión.

11 PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

Se elaborará un informe sobre el ensayo que contendrá todos los resultados relevantes anotados para identificar con claridad el elemento objeto del ensayo, incluyendo el montaje óptico y la fuente luminosa (si fuesen separables). Asimismo, se identificarán los procedimientos del ensayo (fotometría de laboratorio estándar, Zero Length o telefotometría al aire libre). Se proporcionarán las condiciones del ensayo, incluyendo la tensión, el consumo de corriente del elemento objeto del ensayo y/o de la fuente luminosa (si estuviera equipada con alimentación independiente). Los resultados de las mediciones de las lámparas de ensayo de laboratorio empleadas se presentarán con los resultados del elemento objeto del ensayo.

Las unidades de los resultados de medición serán las siguientes:

tiempo	segundos (s)
intensidad luminosa	candelas (cd)
ángulo	grados (°)
alcance luminoso	millas náuticas (M)
cromaticidad	valores x, y de acuerdo con el diagrama de la CIE 1931

11.1 Intensidad luminosa con respecto al ángulo

Los resultados de la dependencia angular de intensidad luminosa se presentarán gráficamente para ilustrar con claridad el rendimiento de la linterna. Los gráficos serán lineales y anotados para identificar las causas de las irregularidades en las mediciones de intensidad, tales como sombras causadas por los soportes del filamento, los efectos de las juntas de las lentes, etc.

11.1.1 Valores principales de una distribución simétrica de intensidad

Una distribución de intensidad en un plano, que es simétrica con respecto a un eje de referencia (punto de referencia), se puede caracterizar mediante tres valores:

- intensidad máxima en el eje de referencia: I_{\max}
- ancho a la mitad de altura: FWHM (del inglés, «Full Width at Half Maximum»)
- ancho a la décima parte de altura: FWTM (del inglés, «Full Width at Tenth Maximum»)

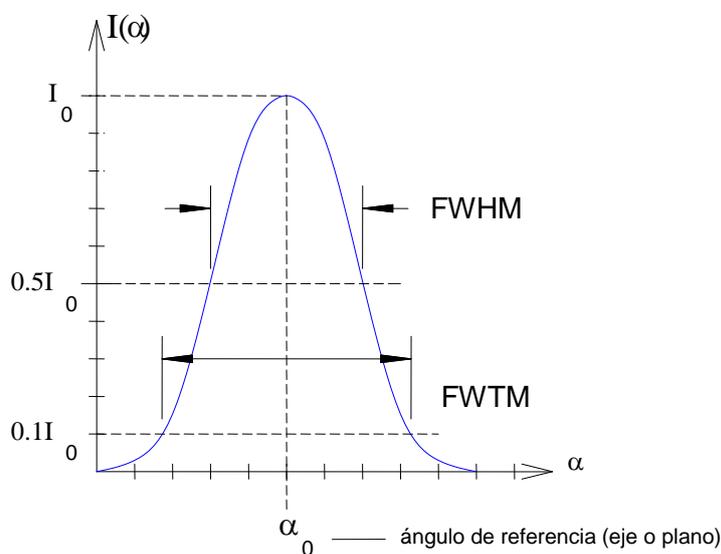


Figura 27 Distribución de intensidad simétrica

En la práctica, las distribuciones no son exactamente simétricas y podría existir un máximo de menor valor.

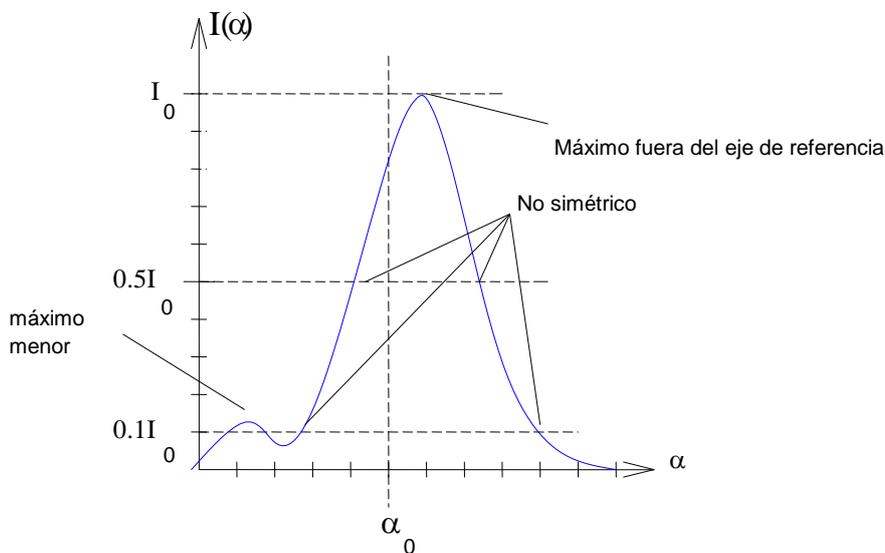


Figura 28 Distribución de intensidad asimétrica

El valor I_{\max} expresado será la de la intensidad en el eje de referencia. Si se expresara un valor I_{\max} que no estuviera en el eje de referencia, se expresarán con claridad tanto el valor de intensidad como el ángulo en que se midió.

Los valores del ancho a la mitad de altura (FWHM) expresados corresponderán a los ángulos a cada lado del eje de referencia donde la intensidad cae por vez primera por debajo del 50% de I_{\max} . Adicionalmente, se podrá expresar un valor global del ancho a la mitad de altura (FWHM), pero tal valor se identificará claramente como el «ancho global a la mitad de altura» o, alternativamente, como «divergencia global al 50%».

Los valores del ancho a la décima parte de altura (FWTM) expresados corresponderán a los ángulos a cada lado del eje de referencia donde la intensidad cae por vez primera por debajo del 10% de I_{\max} . Adicionalmente, se podrá expresar un valor global del ancho a la décima parte de altura (FWTM), pero tal valor se identificará claramente como el «ancho global a la décima parte de altura (FMHM)» o, alternativamente, como «divergencia global al 10%».

11.1.2 Valores reducidos para ensayos de tipo o de aprobación de tipo

Cuando se especifica o se espera una distribución simétrica para ensayos de aprobación de tipo pero los resultados presentan una distribución asimétrica, los valores expresados se caracterizarán por la intensidad en el eje de referencia I_0 , así como por los ángulos globales reducidos:

$$\text{Ancho a la mitad de altura (FWHM)}_{\text{rojo}} = 2 \times \min\{\Delta_{H1}, \Delta_{H2}\}$$

$$\text{Ancho a la décima parte de altura (FWTM)}_{\text{rojo}} = 2 \times \min\{\Delta_{T1}, \Delta_{T2}\}$$

Este es el caso para que el rendimiento no esperado de una baliza se vea reflejado en los valores expresados más reducidos de intensidad y de ángulos de divergencia.

Donde:

$\min\{\Delta_{H1}, \Delta_{H2}\}$ es el más reducido de los dos valores Δ_{H1} o Δ_{H2} .

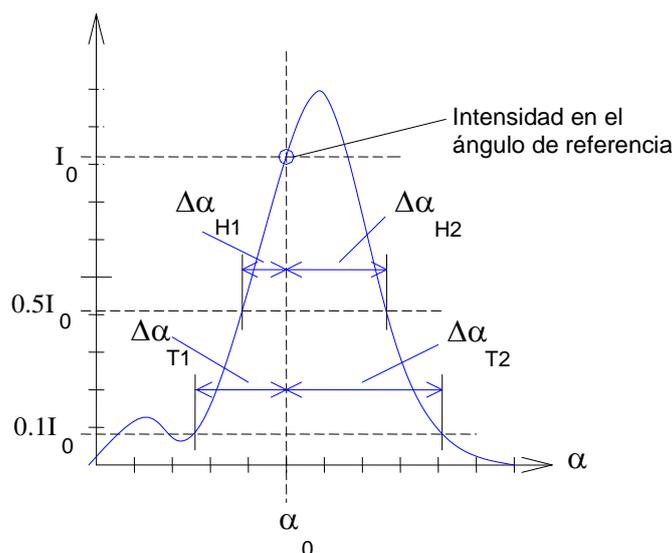


Figura 29 Distribución de intensidad asimétrica presentando valores reducidos

11.1.3 Valores principales para balizas omnidireccionales (haces en abanico)

- Perfil horizontal

Los gráficos de los perfiles horizontales se trazarán sobre $\pm 180^\circ$ a partir del plano de referencia vertical o punto de referencia. Se expresarán los valores principales de la intensidad luminosa que figuran a continuación para el perfil horizontal de una señal luminosa omnidireccional, preferiblemente anotándolos en el gráfico:

- intensidad máxima: I_{\max}
- intensidad mínima: I_{\min}
- intensidad media: I_{media}
- intensidad del 10 por ciento: $I_{10 \text{ ptil}}$

El valor del 10 por ciento, que es igual o excedido por el 90% de las mediciones individuales de la intensidad luminosa en el plano horizontal, será el valor utilizado para definir la intensidad fija (continua) de la baliza.

Nota:

La intensidad luminosa de las fuentes luminosas LED ensayadas podría variar considerablemente con la temperatura de unión del LED y ello podría ser una consecuencia del ciclo de operación como, por ejemplo, el carácter del destello. Es, por lo tanto, fundamental asegurar que se mida e identifique con claridad la intensidad de pico (I_0) en el modo destelleante del carácter especificado y tenerla claramente etiquetada para evitar que se confunda con la intensidad fija (continua).

- Perfiles verticales

Las mediciones realizadas en por lo menos tres planos verticales, preferiblemente incluyendo el plano vertical de referencia o punto de referencia y equidistantes del mismo, resultarán en unos gráficos de los perfiles verticales trazados entre los puntos en que la intensidad cae por debajo del 1% de la intensidad máxima. Preferiblemente, se anotará cada gráfico con los valores principales: I_{\max} , ancho a la mitad de altura (FWHM) y ancho a la décima parte de altura (FWTM).

Entonces, la media de todos los resultados del ancho a la mitad de altura (FWHM) y del ancho a la décima parte de altura (FWTM), por encima y por debajo del plano de referencia horizontal se expresarán (p. ej. -3,1, +4,2 grados).

En cuanto a los ensayos de aprobación de tipo, cuando se espera un perfil simétrico en torno al punto de referencia, una distribución asimétrica delata una deficiencia de calidad. Se recomienda, por lo tanto, la utilización de los valores globales reducidos del ancho a la mitad de altura (FWHM) y del ancho a la décima parte de altura (FWTM), tal y como se describen en el apartado 11.1.1.

11.1.4 Balizas giratorias (haces concentrados)

Se trazarán gráficos de los perfiles vertical y horizontal entre los puntos donde la intensidad cae por debajo del 5% de la intensidad máxima. Se expresarán los principales valores de I_{\max} , el ancho a la mitad de altura (FWHM) y el ancho a la décima parte de altura (FWTM), preferiblemente anotándolos en cada gráfico. Se podrá convertir la variación horizontal de intensidad angular en un perfil de dependencia temporal a unas determinadas velocidades

de rotación para realizar el cálculo de la intensidad eficaz y de la duración del destello. En cuanto a las balizas giratorias que emiten más de un haz de luz, se mostrarán los resultados de todos los haces. Se utilizará el haz de menor intensidad eficaz para realizar el cálculo del alcance nominal de la baliza.

Si la fuente luminosa de la baliza no es homogénea y la medición se realizó mediante la rotación de la baliza entera, incluyendo la fuente en la escala del goniómetro, se presentarán datos de salida adicionales para una fuente luminosa aislada como, por ejemplo, una curva polar. Si se realizó la medición con una lámpara no homogénea en una posición fija y ésta no fue girada con la mesa del goniómetro, se presentarán los resultados de la medición de las posiciones de la fuente luminosa que presentan las intensidades máxima y mínima.

11.1.5 Balizas direccionales

Se trazarán los gráficos de los perfiles vertical y horizontal, bien sobre la zona de cobertura de diseño de la baliza, o bien hasta los ángulos horizontales en que la intensidad cae por debajo de 1% de la intensidad máxima, el que sea mayor. Cuando proceda, también se mostrará la zona de cobertura de diseño en el gráfico. Los valores principales de I_{max} , el ancho a la mitad de altura (FWHM) y el ancho a la décima parte de altura (FWTM) se expresarán tanto en el gráfico del plano horizontal como en el del plano vertical, preferiblemente anotándolos en cada gráfico. Se utilizarán los puntos al 50% para definir las divergencias vertical y horizontal del haz de luz, que se mostrarán como ángulos positivos o negativos con referencia al plano vertical de referencia. También se mostrarán los puntos al 10% en el gráfico, pero no será necesario expresarlos.

11.2 Intensidad luminosa con respecto al tiempo

En cuanto a las señales luminosas de ayuda a la navegación que destellean mediante una fuente luminosa eclipsada o de conmutación, se trazará el perfil instantáneo de intensidad luminosa con respecto al tiempo (el perfil del destello), con la intensidad luminosa como la variable dependiente (la ordenada) y el tiempo como la variable independiente (la abscisa). El trazado será lineal e incluirá el ciclo entero de la característica del destello, mostrando tanto el periodo de encendido como el de apagado. Se podrán emplear curvas secundarias para ilustrar fluctuaciones de breve duración de la intensidad luminosa instantánea.

En cuanto a las balizas giratorias para las que la intensidad luminosa instantánea se traza con respecto al tiempo, dejando la baliza girar con sus propios medios, los trazados serán lineales y mostrarán el perfil de la intensidad luminosa con respecto al tiempo de una revolución completa de la baliza. También se emplearán curvas secundarias para ilustrar de forma individualizada y con mayor detalle los haces de luz emitidos. Si la distribución espacial de la fuente luminosa no es homogénea, se presentarán los resultados de medición de todos los haces de luz emitidos de las posiciones de la fuente luminosa que presentan las intensidades máxima y mínima. Los periodos entre los tiempos en que la intensidad cae por debajo o se incrementa por encima del 50% de la intensidad de pico (I_0) se emplearán para determinar el carácter rítmico de la luz.

11.3 Duración del destello

La duración del perfil del destello medido se tomará desde el punto temporal en que la intensidad excede por primera vez el 50% del valor de la intensidad de pico hasta el punto temporal en que la intensidad cae finalmente por debajo del 50% del valor de la intensidad

de pico. El final de un destello se considerará como el punto en que la intensidad cae por debajo del 5% del valor de la intensidad de pico durante más de 100 ms.

11.4 Intensidad eficaz

Después de que se haya calculado de acuerdo con el método establecido en la Recomendación de IALA E-200-4 relativa a las Señales Luminosas Marítimas – Parte 4 - Determinación y cálculo de la intensidad eficaz, la intensidad eficaz de una luz de ayuda a la navegación, se presentará en los resultados finales. En el caso de una baliza omnidireccional, se utilizará el valor del 10 por ciento de la curva horizontal para escalar la intensidad eficaz así calculada. Se tomará nota de que la función para realizar los cálculos de un valor percentil se encuentra disponible en la mayoría de los programas informáticos de hoja de cálculo.

Asimismo, se tomará nota de que algunas fuentes luminosas tienen diferentes intensidades para los modos continuo y de destellos (p. ej. LEDs). Por lo tanto, cuando se realiza la medición de la intensidad luminosa de una fuente luminosa continua con respecto al ángulo, la intensidad medida en un ángulo determinado será diferente de cuando la fuente luminosa destellea. En tal caso, se podrá realizar la medición de la intensidad con respecto al tiempo para ambos modos en la misma referencia angular (p. ej. el punto de referencia), asegurando que la fuente luminosa alcance la estabilidad en cada uno de ellos. Se podrá calcular y utilizar el ratio de las intensidades continua y de destellos (máxima o eficaz) para escalar la cifra del 10 por ciento. Se expresará el carácter rítmico empleado durante la medición de la intensidad con respecto al tiempo junto con el valor de la intensidad eficaz.

11.5 Corrección espectral

Cuando el resultado fotométrico se haya corregido mediante la aplicación del factor de corrección espectral, se expresará con claridad el valor de tal factor, así como la forma en que fue aplicada.

11.6 Factor de condiciones de servicio

Cuando proceda, se podrá aplicar a la intensidad medida un factor de condiciones de servicio. Tal factor toma en consideración la reducción de intensidad a causa de la degradación del equipo a lo largo de su vida útil y del periodo de servicio desde que entra en servicio. Se expresarán con claridad los detalles de tal factor, así como la forma en que se aplicó.

11.7 Color de la luz

Se expresará el color medido de la luz en coordenadas x, y de acuerdo con el diagrama cromático de la CIE 1931 (véase el apartado 6.5). También se informará sobre el cumplimiento con las regiones cromáticas relevantes de IALA de acuerdo con la Recomendación de IALA E-200-1 relativa a las Señales Luminosas Marítimas – Parte 1 - Colores. Por lo menos tres mediciones de color se tomarán en diferentes puntos dentro de la zona de cobertura.

Si el equipo estuviera compuesto por más de una fuente luminosa, como, por ejemplo, una serie de LEDs, es probable que existan variaciones entre una fuente luminosa y otra. Además, el color de algunos tipos de LEDs varía con el ángulo de visión, particularmente

los LEDs blancos de capa de fósforo. Para tales dispositivos, es importante que se mida el color en tantos ángulos como sea posible dentro de la zona de utilización. Tal y como se ha mencionado en el apartado 10.1, se deberá permitir al dispositivo de medida que alcance una temperatura estable antes de iniciar las mediciones, y se proporcionará información sobre el color medio durante la duración del destello.

Si todos los puntos caen dentro del límite recomendado, los resultados se podrán mostrar como una nube de puntos en un diagrama cromático. No obstante, si existieran desviaciones de color con respecto a las regiones recomendadas, un trazado cartesiano (o lineal) de la cromaticidad x , y con respecto al ángulo será preferible, ya que los ángulos en que ocurren tales desviaciones se podrán ver.

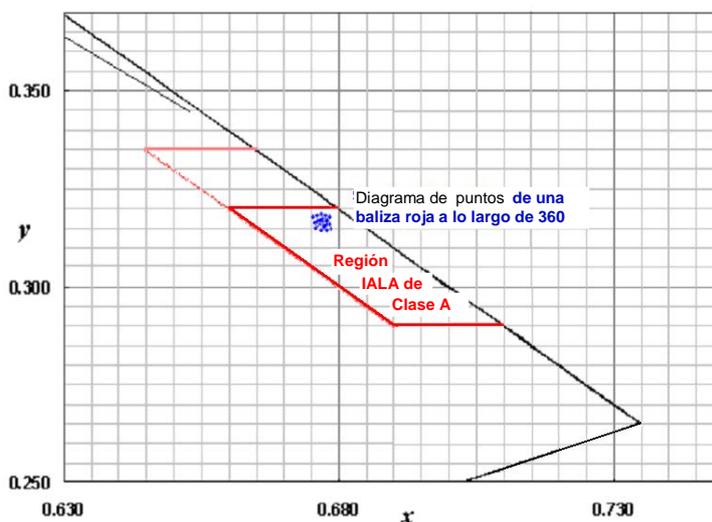


Figura 30 Diagrama de puntos de una baliza LED roja a lo largo de 360°

11.8 Luces de sectores

Si el color de la luz emitida por el equipo ensayado varía con el ángulo como, por ejemplo, una luz de sectores con sectores blanco, rojo y verde, se ensayará el color en por lo menos tres puntos dentro de cada sector de color. Se expresarán los resultados de todas las mediciones.

Si es necesario definir el ángulo o sector de incertidumbre (a veces denominado el ángulo de indecisión) en el límite entre dos sectores de colores diferentes, se podrán tomar mediciones del color en intervalos angulares a través del límite. El ángulo de incertidumbre se define como la distancia angular desde el punto en que el color sale de la región de IALA del primer sector hasta el punto en que el color entra dentro de la región de IALA del segundo color. El límite de sector entre los dos colores se tomará como el centro del ángulo de incertidumbre. El arco de sector expresado se tomará entre los límites del sector y la incertidumbre expresada, definida como la mitad del ángulo total de indecisión en cada límite:

p. ej. Arco del sector rojo medido $-132,5^{\circ}$ a $-128,2^{\circ} = 4,3^{\circ} \pm 0,4^{\circ}$.

Cuando el ángulo de indecisión sea diferente para cada límite, entonces los dos ángulos se proporcionarán por separado, citando el ángulo más positivo primero:

p. ej. Arco del sector rojo medido $-132,5^{\circ}$ a $-128,2^{\circ} = 4,3^{\circ} +0,4^{\circ}/-0,3^{\circ}$.

A la hora de realizar mediciones de color con respecto al ángulo, es importante asegurar que los incrementos angulares sean similares a la medida del ángulo del instrumento (véase el apartado 9.9); de no ser así, se registrarán incorrectamente las transiciones bruscas de color (véase la Directriz 1041 de IALA acerca de las Luces de Sectores). La Figura 31 muestra un trazado cartesiano (o lineal) de las coordenadas cromáticas x, y con respecto al ángulo horizontal de una baliza omnidireccional blanca con un sector rojo. La línea vertical amarilla muestra donde el color de la luz sale de la región roja de Clase A de IALA y la línea azul vertical donde entra en la región blanca de Clase A de IALA. El ángulo de incertidumbre cubre 0,8°, desde -56,6° a -55,8°.

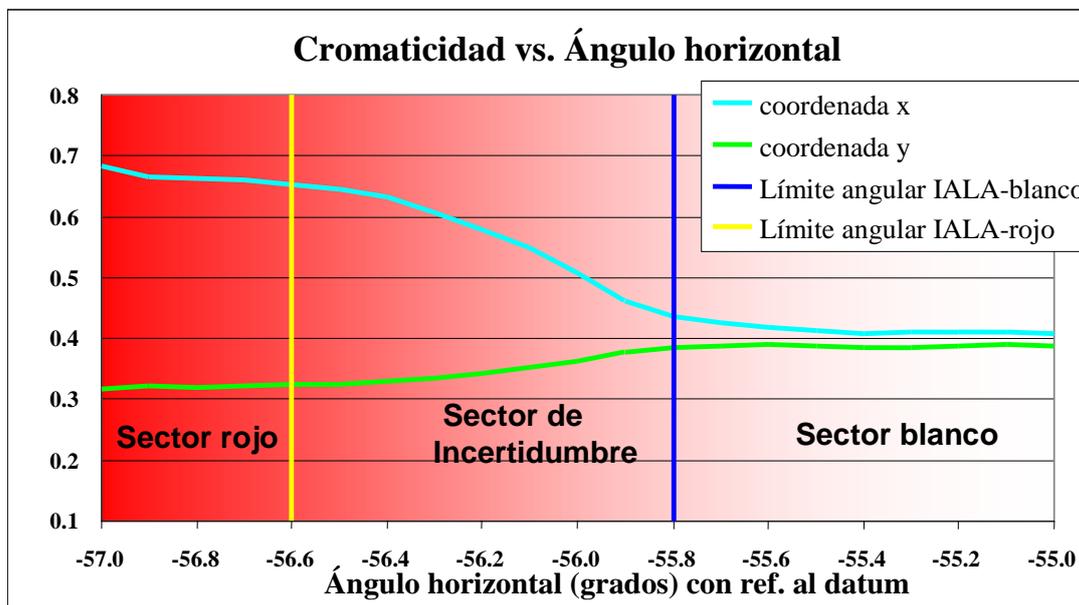


Figura 31 Trazado de cromaticidad a través del límite entre los sectores rojo y blanco

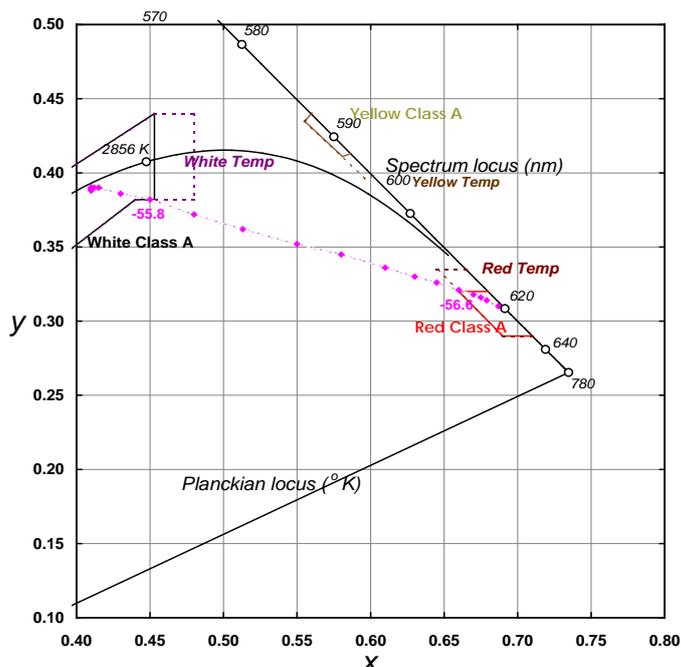


Figura 32 Como la Figura 31, pero trazado en un diagrama cromático de la CIE 1931 parcial

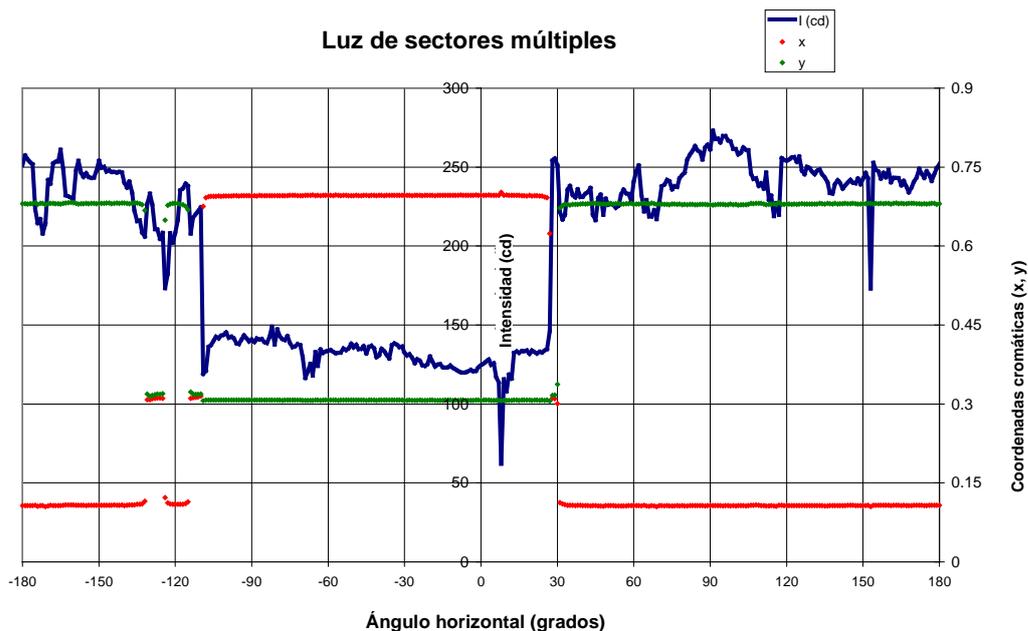


Figura 34 Trazado de 360 grados de una luz de sectores mostrando la intensidad y la cromaticidad en intervalos de 1°

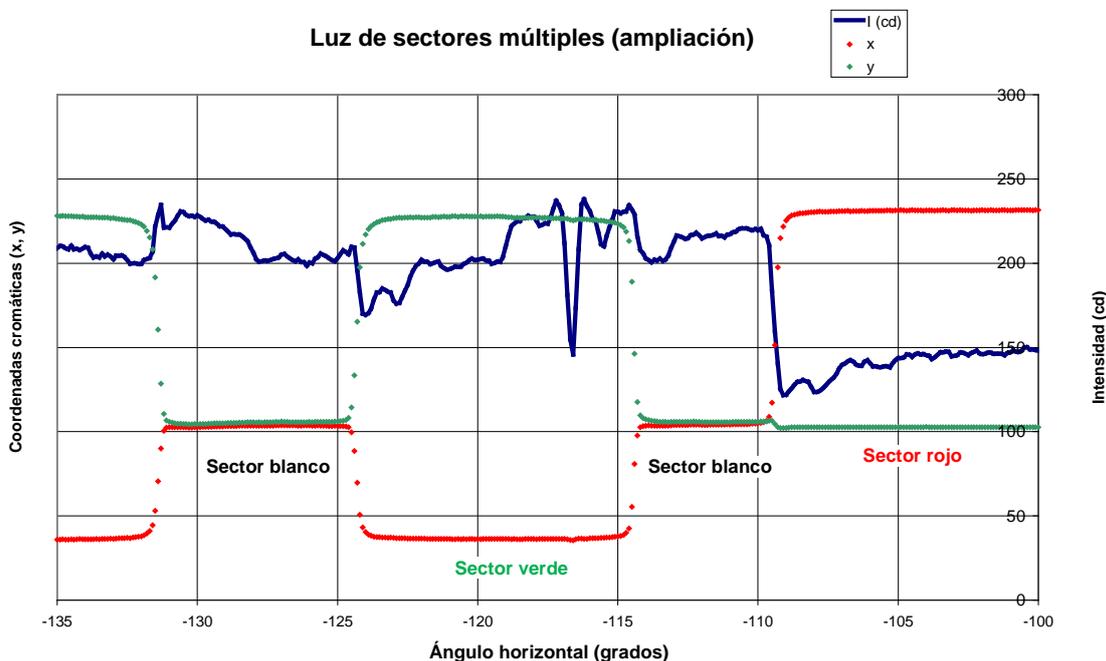


Figura 35 Trazado parcial de la luz de sectores mostrada en la Figura 34, en intervalos de 0,1°

11.9 Distribución de potencia espectral

Se podrá presentar el gráfico de la distribución de potencia espectral (SPD) de una medición espectrorradiométrica. Las unidades de longitud de onda del espectro visible se trazarán como la variable independiente (abscisa) y la potencia (relativa o en vatios) se trazará como la variable dependiente (ordenada).

11.10 Alcance nominal

Se calculará y expresará el alcance nominal del valor más bajo de intensidad eficaz que resulte entre todos los destellos que forman la característica o la intensidad eficaz más reducida que resulte entre todos los paneles de un sistema óptico giratorio de acuerdo con la Recomendación de IALA E-200-2 relativa a las Señales Luminosas Marítimas – Parte 2 - Cálculo, Definición y Notación del Alcance Luminoso, y tal alcance nominal se expresará.

11.11 Incertidumbre y certeza

Se presentarán los resultados de todas las mediciones junto con una expresión de los niveles de incertidumbre y confianza, tal y como se ha establecido en el apartado 8.14.2 (véase también el ANEXO VI).

12 REFERENCIAS

- [1] International Asociación of Marine Aids to Navigation and Lighthouse Authorities (IALA), «Recomendaciones sobre los colores de señales luminosas en ayudas a la navegación», diciembre de 1977.
- [2] IALA, «Recomendaciones relativas a la determinación de la intensidad luminosa de una luz de ayuda a la navegación marítima», diciembre de 1977.
- [3] Schmidt-Clausen, H.J., «Über das Wahrnehmen verschiedenartiger Lichtimpulse bei veränderlichen Umfeldleuchtdichten» (Sobre la percepción de varios destellos de luz con luminancias diferentes del entorno), Darmstadt Disertación D17, Universidad de la Tecnología de Darmstadt, 1968.
- [4] Graham, C.H., ed. «Vision and Visual Perception», John Wiley & Sons, Inc., Nueva York, 1965.
- [5] Comisión Internacional de Iluminación (CIE), Publicación N.º 18.2, «The Basis of Physical Photometry», 1983.
- [6] CIE, Publicación N.º 69, «Methods of Characterising Illuminance Meters and Luminance Meters», 1987.
- [7] National Institute of Standards and Technology (NIST), Publicación Especial 250-37, «Photometric Calibrations», Departamento de Comercio de EE.UU., julio de 1997.
- [8] John W. T. Walsh, «Photometry», Dover Publications, 1965.
- [9] ISO/IEC, Guía 98:1995, «Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement», 1995.
- [10] CIE, Publicación N.º 43, «Photometry of Floodlights» (Apéndice C.2), 1979.
- [11] Illuminating Engineering Society (IES), Publicación LM-54-1991, «IES Guide to Lamp Seasoning», 1991.
- [12] J. Johnson, «Zero-Length Searchlight Photometry System», Illuminating Engineering, Vol. 57, N.º 3, marzo de 1962, p. 187.
- [13] IES, Publicación LM-11-84, «IES Guide for Photometric Testing of Searchlights», julio de 1984.

- [14] CIE, Publicación N.º 63, «The Spectroradiometric Measurement of Light Sources», 1984.
- [15] «Recomendación E-110 de IALA relativa a los caracteres rítmicos de las luces en ayudas a la navegación», mayo de 1998.
- [16] CIE, Publicación N.º 86, «CIE 1988 2º Spectral Luminous Efficiency Function for Photopic Vision», 1990.
- [17] CIE, Publicación N.º 127, «Measurement of LEDs» (Informe Técnico), 1997.
- [18] CIE, Publicación N.º 70, «The Measurement of Absolute Luminous Intensity Distributions», 1987.
- [19] CIE Publicación N.º 121, «The Photometry and Goniophotometry of Luminaires», 1996.
- [20] ISO/IEC 17025, «General Requirements for the Competence of Testing and Calibration Laboratories», 1999.
- [21] CIE, Norma 149-2002 «Use of Tungsten Filament Lamps as Secondary Standard Sources».
- [22] «Modified Allard Method for Effective Intensity of Flashing Lights», Yoshi Ohno y Dennis Couzin, Simposio de la CIE, 2002.
- [23] Práctica Recomendada Aeroespacial, SAE ARP 5029 «Measurement Procedures for Strobe Anti-collision Lights».
- [24] CIE, Publicación N.º 15, «Colorimetry 3rd Edition», 2004.
- [25] CIE, Publicación N.º 84, «Measurement of Luminous Flux», 1989.
- [26] CIE, Publicación N.º 102, «Recommended File Format for Electronic Transfer of Luminaire Photometric Data», 1993.
- [27] Vías Navegables Federales de Alemania, «Minimum Photometric Distance», 2006-01-31,
- [28] Vías Navegables Federales de Alemania, «Determination of Photometric Distance», 2006-01-31,
- [29] CIE S 014-1/E:2006, «CIE Standard Colorimetric Observers».
- [30] CIE S 014-2/E:2006, «CIE Standard Illuminants for Colorimetry».
- [31] CIE S 010/E:2004, «Photometry - The CIE System of Physical Photometry».
- [32] CIE, Publicación N.º 179, «Methods for Characterizing Tristimulus Colorimeters for Measuring the Colour of Light», 2007.
- [33] CIE, Publicación N.º 53, «Methods of Characterizing the Performance of Radiometers and Photometers», 1982.
- [34] CIE, Publicación N.º 10527(E), «Colorimetric Observers», 1991 (S002, 1986).
- [35] CIE, Publication N.º 17.4, «International Lighting Vocabulary», 1987.

ANEXO II MÉTODO DE MEDICIÓN DETALLADO

Zero Length

1 INTRODUCCIÓN

El método Zero Length es una metodología para aproximar las condiciones de campos lejanos a una distancia cercana. La técnica principal del método Zero Length consiste en la utilización de un espejo paraboloide para ubicar, en términos ópticos, el detector a una distancia infinita de la fuente y así fuera del campo cercano. Una onda plana de entrada, que incide en un espejo paraboloide cóncavo, se convierte en una onda esférica convergente. La imagen que así resulta se mide con el detector en el punto focal del espejo [12]. La Illuminating Engineering Society (IES) ha presentado este método como una alternativa a la medición fotométrica de focos [13]. La Figura 36 muestra un sistema Zero Length.

El espejo tendrá que ser capaz de enfocar los rayos colimados que emanan desde todas las secciones de la superficie del espejo a un punto no mayor a la apertura del fotómetro y, al mismo tiempo, excluir los rayos fuera del eje. El diámetro del espejo no excederá la dimensión de mayor tamaño de los componentes ópticos ensayados. Se recomienda la utilización de un espejo de cara reflectante anterior para minimizar las pérdidas. Como en el caso de un espejo reflector, la reflectividad espectral relativa del espejo se medirá y se utilizará para realizar el cálculo del factor de corrección de desajuste espectral.

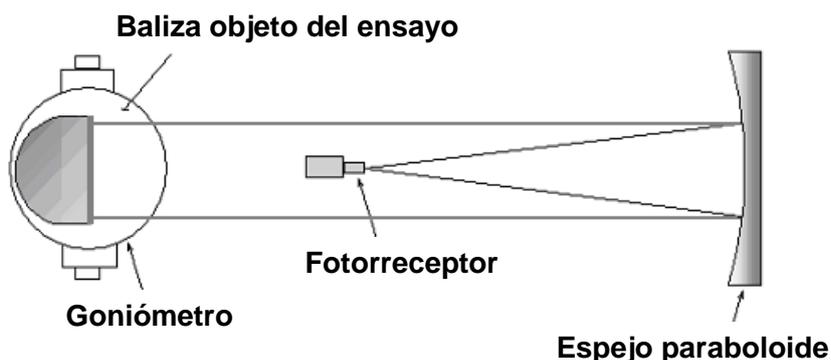


Figura 36 Sistema Zero Length.

La resolución angular depende de la distancia focal f y del tamaño de la medida de apertura del cabezal del fotómetro (véase la Figura 37).

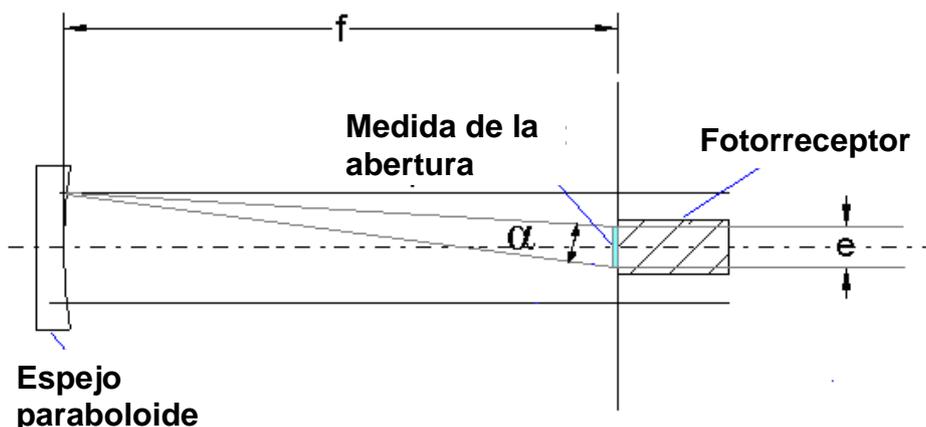


Figura 37 Geometría Zero Length mostrando la resolución angular

Como una aproximación, la resolución angular se puede expresar de la siguiente forma:

$$\tan \alpha \approx \alpha \approx \frac{e}{f}$$

ecuación 17

2 ZERO LENGTH FUERA DEL EJE

Es posible sacar el fotorreceptor del recorrido directo de la señal luminosa proveniente del elemento ensayado mediante el uso de un espejo paraboloidal fuera del eje. Esto es particularmente importante a la hora de medir ópticas de menor tamaño, para las cuales el grado de ocultación podría ser llegar a ser una proporción importante de la señal luminosa. La inclinación de un sistema centrado logrará el mismo resultado, pero a costa de un mayor nivel de incertidumbre en la medición.

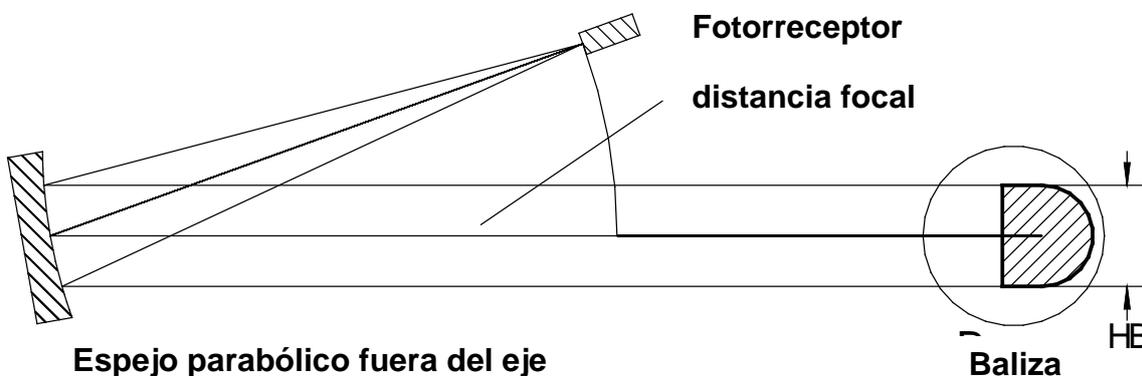


Figura 38 Geometría Zero Length fuera del eje

3 CALIBRACIÓN O CARACTERIZACIÓN DEL SISTEMA ZERO LENGTH

En teoría, todos los rayos colimados dentro del eje que inciden en el espejo paraboloide se juntarán en el punto focal del mismo. En la práctica, sin embargo, habrá pérdidas a causa de la reflectividad espectral global del espejo, la falta de homogeneidad del recubrimiento reflectante del espejo y aberraciones en la curvatura del mismo. El método que se describe continuación se podrá utilizar para determinar las pérdidas del sistema Zero Length. Mida la iluminancia de una fuente luminosa continua a varias distancias del fotómetro. Colocando la fuente en una caja de luz con una abertura variable permitirá la generación de una fuente de tamaño muy reducido y, por lo tanto, la iluminancia podrá cumplir con la ley de la distancia fotométrica dentro de los límites del recorrido de medición. Es necesario alinear con precisión la caja de luz con respecto al detector. Se realizará un seguimiento de la corriente de la lámpara y se controlará. Tome una a serie de mediciones a distancias más allá de la distancia mínima necesaria para la aplicación de la ley de la distancia fotométrica. Determine la intensidad de la fuente y la varianza a partir de la serie de mediciones. Traslade la caja de luz al goniómetro y alinéela con el espejo y el fotómetro. Realice un seguimiento de la corriente de la lámpara y contrólela, ya que la iluminancia (E_{medida}) se mide por medio del sistema Zero Length. Utilizando la intensidad determinada a partir de las mediciones directas ($I_{directa}$), calcule la longitud «corregida» del camino luminoso,

$$r_{corr} = \sqrt{\frac{I_{directa}}{E_{medida}}}$$

ecuación 18

donde:

$I_{directa}$ está en candelas

E está en lux

R_{corr} está en metros

Entonces, se emplea la longitud corregida del camino luminoso del sistema Zero Length, r_{corr} , para calcular la intensidad luminosa del(los) elemento(s) ensayado(s). La determinación de la longitud corregida del camino luminoso del sistema Zero Length se realizará cada vez que se registran nuevos datos. Los cambios de la longitud corregida que no se puedan explicar en el presupuesto de incertidumbre se examinarán para determinar si son causados por a algún error sistemático o el mal funcionamiento del equipo.

La varianza registrada durante la serie de mediciones directas de la caja de luz incluye los efectos de una proporción significativa de los elementos que forman parte del presupuesto de incertidumbre global del sistema Zero Length. Se podrá utilizar la varianza como el nivel de incertidumbre no expandida para dichos elementos.

ANEXO III MÉTODO DE MEDICIÓN DETALLADO

Telefotometría de campo

1 INTRODUCCIÓN

Debido al hecho de que algunas luces de ayuda a la navegación son sistemas de proyección con distancias fotométricas que exceden los 100 metros, todo o parte del camino luminoso podría llegar a estar ubicado al aire libre. Las Recomendaciones de IALA relativas a la determinación de la intensidad luminosa de una luz de ayuda a la navegación marítima, del año 1977 [2], proporcionan una recomendación global para este tipo de medición. Las ventajas de tal método consisten en que no es necesario un edificio grande y que la luz dispersa, que rebota de las paredes, no distorsionará el resultado de la medición. Otra ventaja adicional de este método es que permite la realización de mediciones fotométricas de faros *in situ*. Las desventajas de la telefotometría de campo son que los niveles de luz ambiental, tales como la luz diurna, pueden ser altos y/o variables y que las condiciones meteorológicas pueden llegar a afectar el camino luminoso. Por lo tanto, el tiempo de la medición puede llegar a ser importante y los ensayos podrán verse limitados a periodos de buen tiempo o de noche.

Un problema adicional de las mediciones fotométricas a larga distancia consiste en que el fotómetro podría no ser lo suficientemente sensible como para medir la iluminancia de una fuente luminosa ubicada a una distancia de unos cientos de metros. Una solución a este problema consiste en el uso de un receptor de fotómetro sensible (p. ej. un fotomultiplicador); otra consiste en utilizar un dispositivo de aumento óptico (p. ej. un teleobjetivo o un telescopio) delante del receptor. A distancias extremas, ambas opciones pueden llegar a ser necesarias.

Las mediciones al aire libre se pueden dividir en dos tipos:

- Las que se realizan en un campo de medición de luz al aire libre, donde el elemento objeto ensayado se monta en una escala de goniómetro y se mide su intensidad con respecto al desplazamiento angular; y
- Las de un faro *in situ* en las que no se emplea un goniómetro y se mide el carácter de la luz con respecto al tiempo y se emplean prismas de poca profundidad para obtener un trazado del perfil vertical del haz.

Como en el caso de la fotometría de laboratorio estándar, la longitud del recorrido utilizado en la telefotometría de campo deberá ser mayor a la distancia de cruce del elemento objeto del ensayo. Se podrá emplear un espejo reflector plano para duplicar la longitud del recorrido del haz luminoso. Se resguardará el fotómetro de la luz dispersa emitida por el elemento objeto del ensayo cuando se refleja el camino luminoso.

2 EQUIPOS ADICIONALES NECESARIOS PARA LA TELEFOTOMETRÍA AL AIRE LIBRE

2.1 Telefotómetro

Los valores muy reducidos de iluminancia que se pueden encontrar cuando se emplea un campo de medición al aire libre pueden resultar en la necesidad de acoplar un telescopio de captación al fotómetro. El telescopio deberá ser capaz de captar la luz proveniente del

elemento ensayado y de cualquier fuente de referencia que se pueda utilizar. También deberá estar equipado con un diafragma para que se pueda ajustar el ángulo de admisión para excluir la iluminación de fondo no deseada. La utilización de un telescopio, o de cualquier otro dispositivo similar, en el recorrido de la medición óptica podrá llegar a alterar el factor de corrección espectral (SCF).

2.2 Luz de referencia

Para superar las incertidumbres causadas por la transmisividad atmosférica cambiante a lo largo de un recorrido de medición de mayor longitud, se empleará una luz de referencia. Ésta será una fuente luminosa de una intensidad conocida, preferiblemente calibrada según las normas nacionales, y con una alimentación de tensión y corriente controlada.

En la práctica, se realizan dos mediciones, una del elemento ensayado y otra de la luz de referencia, que se coloca en la misma (o equivalente) posición física que el elemento ensayado. Entonces, se comparan las dos lecturas. Este método no depende de mediciones precisas de la distancia ni requiere la calibración del fotómetro a unas unidades absolutas. No obstante, la salida del fotómetro deberá ser directamente proporcional a la entrada de iluminancia. Cualquier falta de linealidad se tomará en consideración en el presupuesto de incertidumbre. En tanto que sea posible, el recorrido desde la luz de referencia al receptor será igual al que va desde el elemento objeto del ensayo al receptor.

3 PROCEDIMIENTOS DE CALIBRACIÓN

La utilización de una luz de referencia como punto de comparación elimina la necesidad de la calibración absoluta del sistema de medición luminoso. No obstante, es necesario realizar la calibración de la luz de referencia, así como de los equipos de ensayo. Además, se evaluará y se cuantificará la incertidumbre de las mediciones debido a las relaciones geométricas entre la luz de referencia, el elemento ensayado y el fotómetro.

4 CONDICIONES ATMOSFÉRICAS Y LUZ AMBIENTAL

Una de las mayores incertidumbres de la fotometría al aire libre es la causada por las condiciones atmosféricas cambiantes durante las mediciones. Las que contribuyen más a la cifra de incertidumbre son la visibilidad cambiante y el centelleo.

Puede producirse un error considerable cuando la visibilidad varía entre cuando se realiza la medición del elemento objeto del ensayo y la medición de la luz de referencia. Si la visibilidad cambia mucho a causa de la niebla o la lluvia, no se realizarán las mediciones.

Como en el caso del «ruido», una variación de la luz recibida a causa del centelleo puede aumentar la incertidumbre de la cifra de intensidad resultante. Se puede reducir tal variación aumentando el tiempo de respuesta del fotómetro o promediando la lectura del mismo. Se tendrá cuidado, no obstante, a la hora de medir las luces de destellos. Un incremento en el tiempo de respuesta del fotómetro puede causar una distorsión en el perfil del destello medido. El tiempo de respuesta utilizado deberá ser inferior a la décima parte de la duración esperada entre los puntos al 50% de la intensidad del destello. Se tomarán varias mediciones y, entonces, se podrá calcular una media para cada perfil del destello.

Una variación en la luz ambiental, por ejemplo, cuando la medición se realiza de día, puede producir un error similar al error de compensación del cero. Se tendrá cuidado de asegurar

que no varíen de manera significativa las lecturas del fotómetro tomadas en condiciones de luz ambiental, o sea, cuando el elemento ensayado y la luz de referencia estén apagados.

5 REGISTRO DE CONDICIONES AMBIENTALES

Cuando se realizan las mediciones, se registrarán las siguientes condiciones ambientales:

- las condiciones meteorológicas generales;
- la visibilidad;
- la temperatura; y
- la humedad relativa.

Dichos datos se almacenarán con los datos de las mediciones del elemento ensayado en el campo de medición. Unas medidas de visibilidad en el recorrido óptico de medición pueden ser de utilidad durante las horas de oscuridad.

6 ALINEACIÓN DEL TELEFOTÓMETRO

Empleando una mira u otro aparato similar, mire a lo largo del recorrido óptico del telescopio y ajuste la alineación del mismo y enfóquelo hasta que el elemento ensayado se vea con nitidez en el centro del ocular. Entonces, se ajusta la abertura de salida hasta que solamente se vea el elemento ensayado.

Se deberá, entonces, encender el elemento objeto del ensayo y se le permite alcanzar su nivel pleno de brillo. Cuando se observe a través del ocular más de una vez, se tendrá cuidado de evitar demasiado resplandor en los ojos. Se podrá utilizar un filtro en el ocular para incrementar el nivel de comodidad. A continuación, se gira la mesa del goniómetro hasta los ángulos de medición deseados para asegurar que no haya ninguna ocultación de las superficies emisoras de luz por los componentes en el recorrido óptico. Cuando la imagen sea satisfactoria en todas las posiciones, la salida del recorrido óptico del telescopio se dirige al receptor del fotómetro.

7 PROCEDIMIENTOS DE MEDICIÓN DE LA TELEFOTOMETRÍA DE CAMPO

Asegúrese de que el fotómetro esté encendido y calentado. Deberá ser posible realizar una medición de la luz que llega al receptor del elemento ensayado en el dispositivo de lectura del fotómetro. Podría ser necesario ajustar el mando de aumento del fotómetro hasta que se obtenga una lectura satisfactoria. Para asegurar que la lectura obtenida proviene de la luz recibida, se podrá interrumpir el camino luminoso, observando el efecto en la lectura.

Entonces, el elemento ensayado se apagará y se observará la lectura del fotómetro. Si la lectura no es cero, debido a la luz ambiental, se podrá emplear una compensación del cero para reducir la lectura del fotómetro a las condiciones de luz ambiental. No obstante, se tendrá cuidado de no permitir que la lectura se ponga por debajo de cero cuando las condiciones ambientales son variables, a no ser que sea adecuado el sistema de registro.

Complete las mediciones de la dependencia angular y temporal de la intensidad luminosa del elemento ensayado, tal y como se describen en el apartado 9.7.

Después de la medición del elemento ensayado, monte la luz de referencia en la mesa del goniómetro y asegure que se encuentre en la misma posición en la que estaba el elemento ensayado con relación al fotómetro. Deje que se establezca la salida de la luz de referencia de acuerdo con los datos de referencia de la calibración de la lámpara. Tan pronto como sea posible después de la medición del elemento ensayado, tome por lo menos dos mediciones de la intensidad luminosa de la luz de referencia.

Entonces, la luz de referencia se moderará con menos potencia (o se cubrirá con una pantalla, en función de las condiciones de la calibración) y se tomarán más lecturas de la luz ambiental con el fotómetro (o de la luz ambiental más la luz dispersa). El valor medio que resulte para la luz de referencia menos la luz ambiental (o la luz ambiental más la luz dispersa) y las incertidumbres asociadas se calcularán y se registrarán.

Se tomarán por lo menos tres mediciones para obtener los valores medio y de incertidumbre.

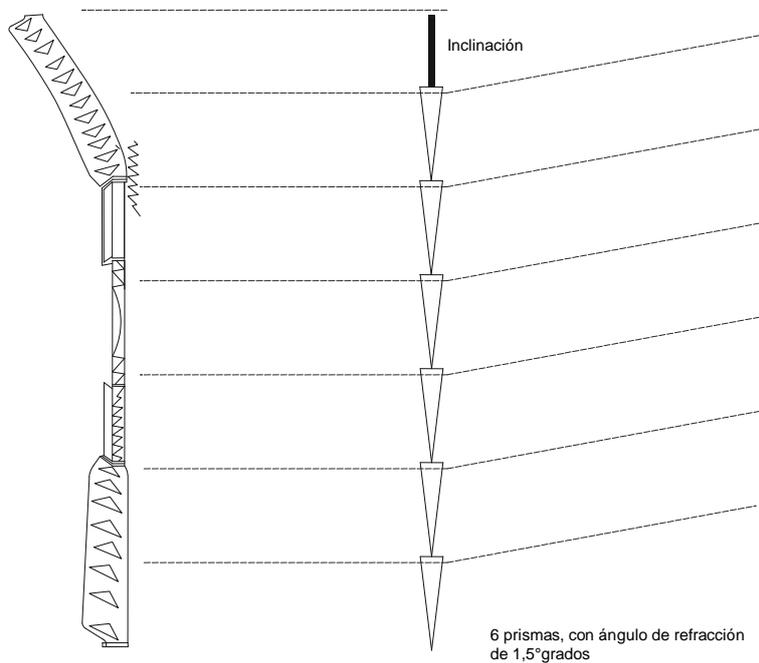
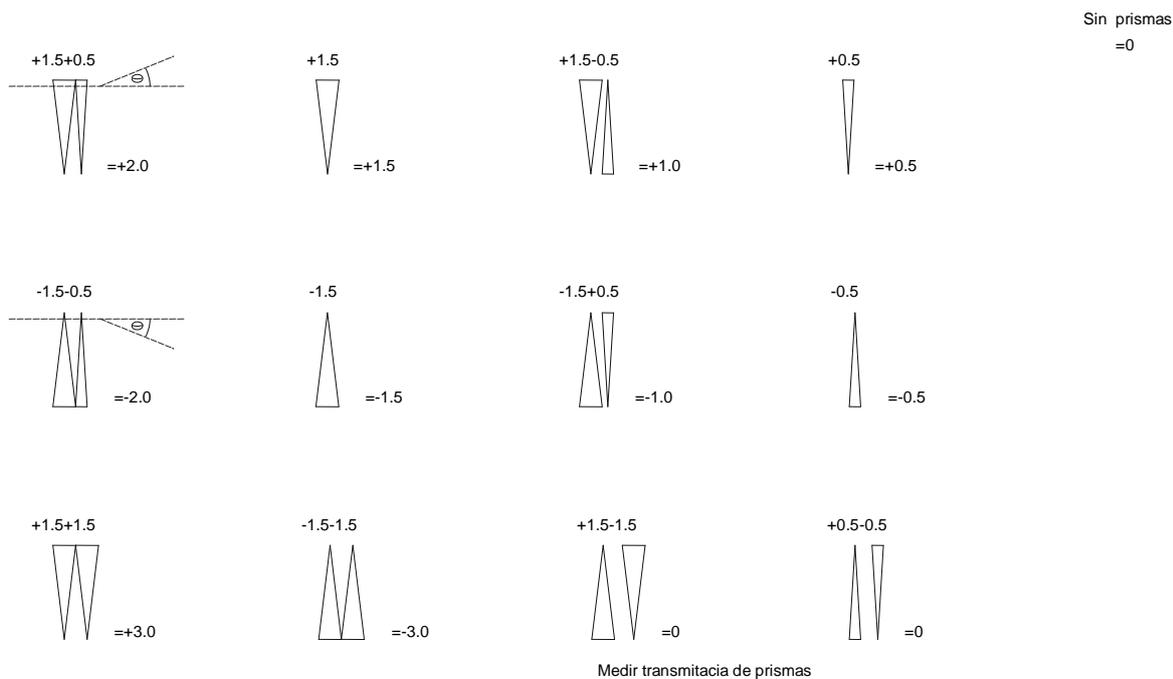
8 8 EQUIPOS ADICIONALES PARA LA MEDICIÓN *IN SITU*

8.1 Prismas y bastidor de prismas

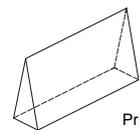
En el caso de mediciones *in situ* de sistemas ópticos grandes como, por ejemplo, la linterna de un faro, podría no ser factible ni montar el elemento objeto del ensayo en una mesa de goniómetro ni inclinar el elemento. En tales casos, se podrá medir el perfil vertical del haz de luz mediante la colocación de perfiles prismáticos en el plano focal del elemento objeto del ensayo para «inclinarse» el haz mediante la refracción. Dos juegos de dichos prismas, cada uno con una desviación de $0,5^\circ$ y $1,5^\circ$, permiten la toma de mediciones a lo largo de $\pm 2^\circ$ en intervalos de $0,5^\circ$, dando un total de nueve puntos en el trazado del haz vertical. Es posible conseguir un paso adicional a $\pm 3^\circ$ mediante la adición de un segundo juego de prismas de $1,5^\circ$, dando un total de 11 puntos. La transmisividad espectral relativa de los prismas, individualmente y en conjunto, se determinará y registrará (véase la Figura 39).

8.2 Proyector de referencia

Para las mediciones de largo alcance de balizas de alta intensidad, se empleará un proyector de referencia calibrado de alta intensidad como la luz de referencia. El proyector de referencia deberá tener una intensidad comparable, dentro de los márgenes a la magnitud, a la del elemento objeto del ensayo.



Prismas ubicados en frente de un óptico de sección Fresnel Refractan el haz hacia arriba 1,5°.



Prisma típico compuesto de perfil acrílico

Figura 39 Utilización de prismas para desviar un haz de luz a través de un ángulo vertical

9 PROCEDIMIENTOS ADICIONALES PARA LA MEDICIÓN *IN SITU*

En general, las mediciones *in situ* se realizan sobre las ópticas existentes de faros. Ya que los lugares de medición en los que se emplea la telefotometría se deben ubicar en tierra firme, se recordará que las mediciones *in situ* sólo suelen ser factibles en una o dos direcciones dentro de la zona de utilización de la luz. Durante el curso de las mediciones, la disponibilidad operativa del faro se podrá ver afectada. Por lo tanto, se emitirán los avisos a los navegantes pertinentes.

9.1 Elección del emplazamiento de medición

A la hora de realizar las mediciones de luz en el campo, el primer requisito consiste en encontrar un emplazamiento adecuado de medición. Tal emplazamiento será un lugar en donde sea posible montar el equipo fotométrico de manera estable y preferiblemente lejano de condiciones meteorológicas adversas o de las interferencias producidas por fuentes luminosas superfluas. Toda la óptica que se va a medir deberá estar claramente visible desde el emplazamiento de medición.

Se realizarán los cálculos de la distancia de cruce de la óptica que se está midiendo para establecer la distancia fotométrica mínima. Un vez que se haya establecido esta distancia mínima, se buscará un emplazamiento de medición ubicado más allá de la distancia fotométrica mínima y, además, dentro de un grado, más o menos, de una línea entre el centro del elemento óptico y el horizonte. Esta tolerancia vertical de dos grados es aproximada y depende del perfil vertical del haz de la luz que se va a medir. Mientras más cercano esté el emplazamiento de medición al centro nominal del haz de luz, menos incertidumbre de medición habrá.

9.2 Configuración del telefotómetro

El diafragma del telefotómetro se configurará para admitir la luz proveniente de la óptica que se está midiendo, así como la de la lámpara de referencia. El campo que estuviera fuera del campo de interés se bloqueará. Es preferible montar el equipo de día, ya que el campo de visión se podrá ver con claridad y cualquier obstrucción potencial se podrá compensar.

9.3 Configuración de la óptica del faro

Se deberá inspeccionar y limpiar el elemento óptico del faro que se va a medir. Se tomará nota del tipo de óptica y de sus dimensiones, además de los detalles del fabricante, así como cualquier fallo o defecto que se detecte en su funcionamiento.

La óptica deberá estar provista de lámparas que cumplen con las dimensiones de diseño, consumo de potencia nominal y salida nominal de lúmenes. Se colocará la fuente luminosa en la óptica de acuerdo con los procedimientos establecidos, tanto por el fabricante de la misma como por el organismo responsable de la señalización y el balizamiento.

Si la óptica es del tipo giratorio con varios ejes emisores de luz, se identificará y se numerará cada uno de ellos, si no lo hubiera hecho de antemano el fabricante. Ello se podrá realizar mediante la identificación de una marca única en la parte giratoria del elemento objeto del ensayo (p. ej. la marca del *datum* o el gozne de la puerta del elemento óptico) y numerando cada haz o eje desde tal punto en dirección contraria al sentido de rotación.

9.4 Configuración del bastidor de prismas y de los prismas

Instale el bastidor de prismas entre la óptica y el emplazamiento de medición, para que incluya la zona más amplia posible de la lente (o lentes). Cualquier área restante de la(s) superficie(s) emisora(s) se deberá ocultar con una pantalla para evitar que luz emitida por la óptica pueda pasar por fuera del bastidor en dirección al emplazamiento de medición (véase la Figura 39). Se tomará nota de que la existencia de cualquier área ocultada incrementará la incertidumbre de la medición del perfil del haz de luz, ya que los reflectores/refractores superiores e inferiores podrían ejercer un efecto en la forma del haz de luz.

9.5 Configuración del proyector de referencia

Se instalará un proyector de referencia por fuera de la linterna, p. ej. en el pasamanos de la galería y tan cerca como sea posible a la óptica y se dirigirá en dirección al emplazamiento de medición. El recorrido entre el proyector de referencia y el emplazamiento de medición deberá encontrarse libre de obstáculos.

9.6 Realización de la medición

Las mediciones podrán comenzar tan pronto como lo permitan las condiciones. Se tomará en cuenta de que las condiciones cero son las de la luz ambiental; si la misma varía de manera considerable, p. ej. a causa de nubes pasajeras que pasan por delante del sol, las incertidumbres de la medición aumentarán. La mayoría de las mediciones de campo de luces se tendrán que realizar de noche y en buenas condiciones meteorológicas.

Al iniciar, primero habrá que alinear el proyector de referencia para que el centro de su haz de luz se dirija hacia el emplazamiento de medición. La cantidad de variaciones en la lectura de la luz de referencia es un buen indicador de la adecuación de las condiciones.

Se realizarán, entonces, las mediciones con diferentes prismas para determinar el perfil vertical del haz. Cada conjunto de prismas se introduce y se registra(n) el(los) perfil(es) del destello de la óptica. Cada conjunto de medición incluirá una muestra de la luz de referencia y otra de la luz ambiental. Se registrará también el ajuste del alcance del telefotómetro.

Cuando se hayan registrado todas las posiciones relevantes de los prismas, se desmontarán, así como el bastidor de prismas y las pantallas. Entonces, se registrarán los destellos del elemento óptico sin obstrucción alguna, así como la luz de referencia, la luz ambiental y los ajustes del fotómetro. Se tomarán por lo menos tres mediciones de cada perfil del destello.

Como mínimo, se realizarán tres mediciones completas de cada característica completa para obtener los valores medio y de incertidumbre. Es probable que las incertidumbres dominantes de la medición tengan que ver con una variación en las condiciones del camino luminoso y con la alineación de la luz de referencia. Las distancias extremas de medición exigen la realización de un elevado número de mediciones repetidas para reducir la incertidumbre.

ANEXO IV MÉTODO DE MEDICIÓN DETALLADO

Colorimetría de triple estímulo

1 GEOMETRÍA DE LA MEDICIÓN

La disposición normal para la colorimetría de triple estímulo es exactamente igual a la de la fotometría, salvo que se reemplaza el receptor fotométrico por un receptor colorimétrico.

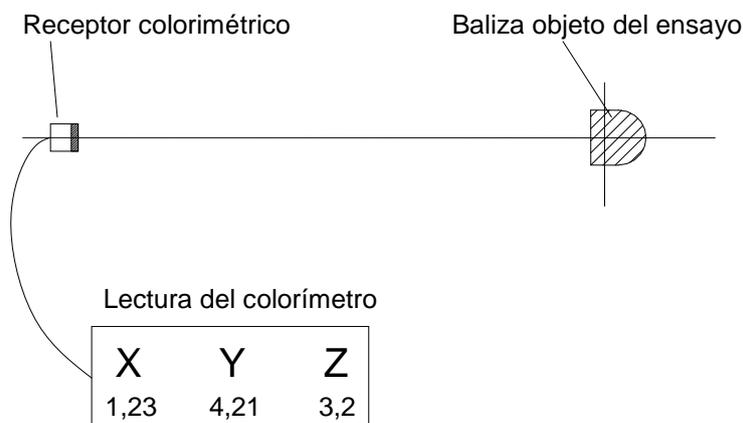


Figura 40 Disposición normal

En cuanto a las fuentes luminosas con una distribución de intensidad estrecha, se tendrá que aumentar la distancia entre la baliza y el colorímetro para asegurar que se alcance el alto nivel de homogeneidad necesario. Unos difusores son necesarios para la entrada óptica del receptor a fin de que la luz que se va a medir se reparta por los tres fotodetectores con un alto grado de homogeneidad.

Para ensayar que la disposición sea la adecuada, el colorímetro se girará en torno al eje. No debería cambiar la salida de datos durante la rotación.

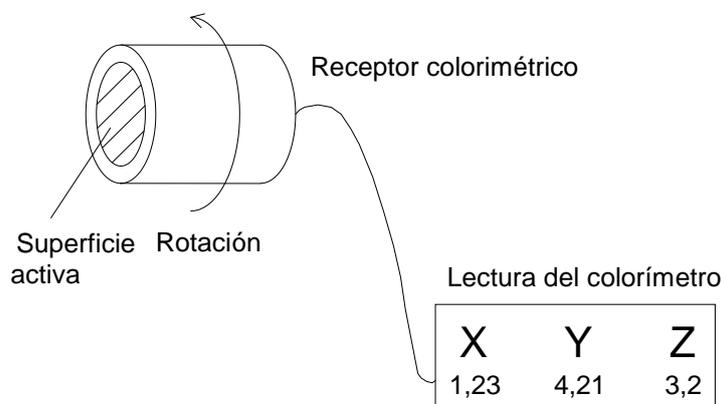


Figura 41 Prueba simple para la configuración del colorímetro

Debido al tamaño del área que se iluminará y la necesidad de alcanzar un alto grado de homogeneidad, la utilización de un difusor requiere una medida de distancia relativamente larga. Sin embargo, la mayoría de los colorímetros de triple estímulo son bastante

insensibles y la necesidad de una medida de distancia larga excluye su utilización para las luces con intensidades bajas. Para mejorar el rendimiento de un colorímetro de triple estímulo, se puede emplear una esfera de integración. El interior de tal esfera deberá ser neutro en términos espectrales.

Independientemente del método empleado para obtener un alto grado homogeneidad de iluminancia en la entrada del colorímetro, se tendrá cuidado de garantizar que toda distorsión espectral se vea compensada.

2 APLICACIÓN 1

En la aplicación 1, se emplea una pequeña esfera de integración con una abertura.

Se mide el haz de luz que llega a la abertura. La esfera de integración actúa como un difusor de la luz. Una pantalla será necesaria para evitar que la luz directa alcance el colorímetro. Es posible realizar una calibración de la iluminancia y un cálculo de la intensidad luminosa (la abertura actúa como un fotodetector).

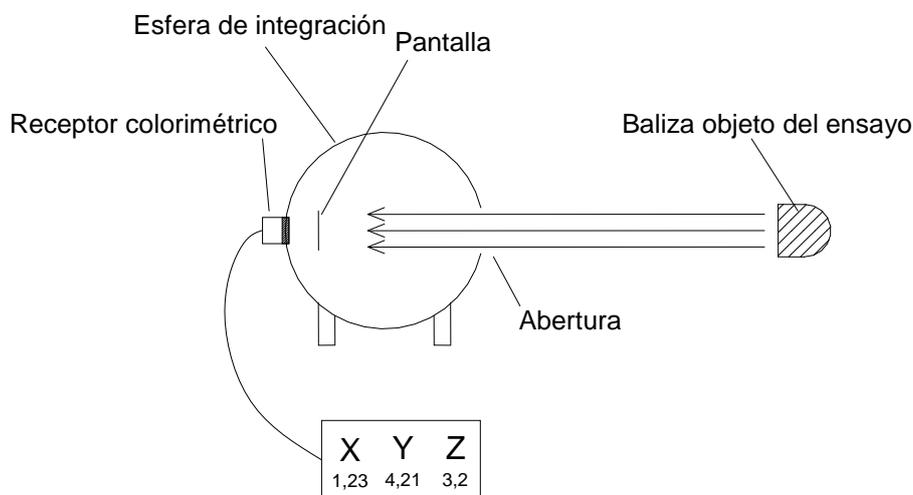


Figura 42 Baliza fuera de la esfera

3 APLICACIÓN 2

La segunda aplicación requiere la utilización de una esfera de integración grande y la linterna que se está ensayando se coloca en el interior de la misma. La media de toda la luz se emplea para medir las curvas cromáticas. Una pantalla será necesaria para evitar que la luz directa alcance el colorímetro. Es posible realizar el calibrado del flujo luminoso.

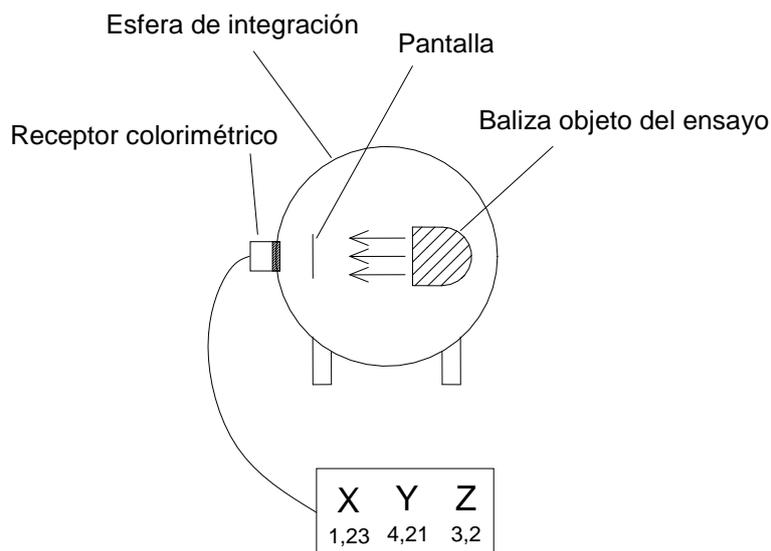


Figura 43 Baliza en el interior de la esfera

4 ESPECTRO

La respuesta espectral de cada fotodetector deberá aproximarse a las curvas de equilibrio cromático x , y , z . El error residual entre la respuesta espectral (x_C , y_C , z_C) y las curvas de equilibrio cromático (x , y , z) se publicará en valores relativos entre los 380 nm a los 780 nm en intervalos de 10 nm:

$$r_x = \frac{\overline{x_C} - \overline{x}}{\overline{x}} \quad r_y = \frac{\overline{y_C} - \overline{y}}{\overline{y}} \quad r_z = \frac{\overline{z_C} - \overline{z}}{\overline{z}}$$

ecuación 19

Se suprimirán los espectros ultravioleta ($\lambda < 380$ nm) e infrarrojo ($\lambda > 780$ nm) para evitar errores.

En términos generales, se puede constatar que los errores aumentan a medida que la luz se acerca al infrarrojo o al ultravioleta. Para muchos colorímetros de triple estímulo, es útil reducir el espectro nominal cuando los errores alcancen un nivel demasiado alto.

ANEXO V MÉTODO DE MEDICIÓN DETALLADO

Espectrorradiometría

1 GEOMETRÍA DE LA MEDICIÓN

Unos difusores son necesarios para la entrada óptica a fin de que la luz que se va a medir se reparta por la abertura de entrada con un alto grado de homogeneidad. Para las fuentes luminosas con una distribución de intensidad estrecha, la distancia entre la fuente y el espectrorradiómetro tendrá que ser la adecuada para asegurar que se alcance el alto nivel de homogeneidad necesario.

Para ensayar que la disposición sea la adecuada, la abertura de entrada o la luz objeto del ensayo se girarán en torno al eje. La salida de datos del espectrorradiómetro no debería cambiar a causa de la rotación.

Se suele utilizar un haz de fibra óptica para acoplar la luz desde la abertura de entrada al espectrorradiómetro.

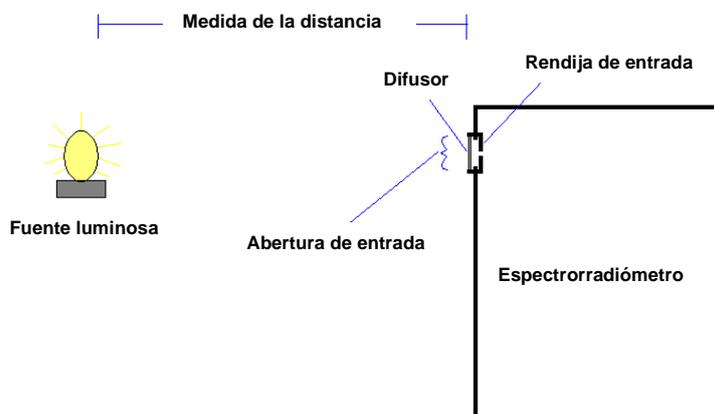


Figura 44 Geometría de medición del espectrorradiómetro

2 CALIBRACIÓN / CARACTERIZACIÓN

Para calibrar o caracterizar el sistema del espectrorradiómetro, suele ser necesario utilizar una lámpara estándar de radiancia o de irradiancia espectral. Éstas consisten en una lámpara que se ha calibrado a lo largo del espectro que se utilizará, normalmente en milivatios de potencia por nanómetros de longitud de onda. La ficha de calibración de tal lámpara se suele organizar en dos columnas de datos, longitud de onda y potencia radiante (o potencia irradiante por área). Es importante que la resolución de la calibración de la lámpara corresponda con la de la medición que se va a realizar. Por lo tanto, si se va a tomar una medición de una fuente luminosa de los 380 nm a los 780 nm en intervalos de 10 nm, la lámpara estándar también se calibrará a lo largo de dicho espectro y a ese intervalo.

La lámpara estándar se colocará a una distancia de la medida de la abertura, tal y como la establece el certificado de calibración de la misma. La potencia aplicada será la que figura en el certificado de calibración de la lámpara. Entonces, tras permitir que la lámpara se estabilice, se toma una lectura con el espectrómetro. Si el espectrorradiómetro utiliza dispositivos acoplados por carga (serie de CCDs) como el detector final, se tomará nota del periodo de integración a lo largo del cual el espectrorradiómetro toma las mediciones.

Una vez que se hayan obtenido los resultados, se compararán al conjunto similar de datos proporcionado en el certificado de calibración de la lámpara estándar. Una ficha de corrección se puede obtener mediante la división del valor de calibración a cada longitud de onda por la cifra obtenida en la medición para tal longitud de onda. Dicha ficha de corrección se podrá utilizar para corregir las mediciones de otras fuentes luminosas. Si el espectrorradiómetro utiliza una serie de CCDs, el factor de calibración incluirá, como un divisor, el tiempo de integración, normalizando así el valor a un segundo.

Cuadro 3 Ejemplo de una ficha de corrección de espectrorradiómetro

Longitud de onda (nm)	Radiancia de calibrado (mV/ nm)	Radiancia medida (en bruto)	Factor de corr. de la calibración
380	2,317801	1,3450	1,723272119
390	2,789061	1,8290	1,524910334
400	3,306898	1,1954	2,766352685
-----	-----	-----	-----
750	28,443800	34,5560	0,823121889
760	28,814490	33,2240	0,867279376
770	29,052000	31,5550	0,920678181
780	29,287460	30,3000	0,966582838

Algunos sistemas de espectrorradiómetro tienen la capacidad de realizar las correcciones automáticamente, de tal forma que los resultados muestren los valores de radiancia o irradiancia ya corregidos.

3 REALIZACIÓN DE LA MEDICIÓN

Una vez que el sistema se haya calibrado o caracterizado, la fuente luminosa ensayada se colocará a la misma distancia de la medida de la abertura en que fue colocada la lámpara estándar. Si, debido a limitaciones de tamaño, la distancia debe exceder la de la lámpara estándar, se registrará la distancia y se empleará como factor de corrección de los resultados, utilizando la ley del cuadrado inverso. Sin embargo, si los resultados de la medición sólo se utilizarán para determinar el color de la luz, no será necesario emplear tal factor de corrección, siendo suficiente la irradiancia relativa.

Se encenderá la fuente luminosa ensayada, dejándola alcanzar la estabilidad. Una vez que se haya estabilizado, se podrá realizar una medición del espectro, registrando la radiancia o la irradiancia a cada longitud de onda. Entonces, los datos de medición que así resulten se podrán corregir empleando la ficha de corrección del espectrorradiómetro. En cuanto a los instrumentos que utilizan una serie de CCDs, se realizará la normalización del tiempo de integración a un segundo.

4 RESULTADOS

Para obtener una distribución de potencia espectral, puede ser necesario realizar alguna corrección adicional para corregir diferencias en las distancias de la medida. Si se utilizó una norma de irradiancia, será necesario convertir la irradiancia a la radiancia mediante la multiplicación de los valores de la irradiancia por el cuadrado de la medida de la distancia en metros. También podría ser necesario utilizar un factor de corrección de la longitud de onda si las unidades expresadas en el certificado de calibración de la lámpara estándar son diferentes al intervalo de longitudes de onda de la medición. Por ejemplo, si la lámpara estándar se expresa en unidades de mW/nm, la cantidad de potencia de una medición con un ancho de 10 nm será diez veces mayor. Se podrá utilizar la fórmula que figura a continuación:

$$Rad = Irr \times d^2 \times LO_{res}$$

ecuación 20

donde:

Rad es la radiancia en vatios (W);

Irr es la irradiancia en vatios por cm² por nanómetro (W/cm²/nm);

d es la medida de la distancia en metros (m); y

LO_{res} es la resolución de longitud de onda o ancho de banda de cada muestra.

Por ejemplo, los 29.28746 mW/cm²/nm que figuran en el Cuadro 3 se refieren a una lámpara estándar medida a 0,5 metros con una resolución espectral de 10 nm. Por lo tanto, la cantidad de potencia por 10 nm sería:

$$29.28746 \times 0.5^2 \times 10 = 73.21865mW ;$$

siendo ésta la cantidad de la potencia radiante en la muestra de 10 nm entre los 770 nm y los 780nm.

5 CONVERSIÓN DE LOS DATOS ESPECTRALES A COLOR Y CROMATICIDAD

La distribución de potencia espectral (SPD) resultante, en potencia absoluta o relativa, se puede convertir a los valores cromáticos X, Y y Z (véase el apartado 6.5) mediante la multiplicación del conjunto de los datos de potencia por las curvas cromáticas \bar{x} , \bar{y} y \bar{z} del observador colorimétrico estándar. Entonces, habrá que sumar las series resultantes para dar los tres valores únicos de X, Y y Z.

Cuadro 4 Resultados mostrando la conversión de la distribución de potencia espectral (SPD) a valores cromáticos X, Y, Z

Long. de onda (nm)	Lámp. SPD	Observador colorimétrico estándar			xbar*lámp	ybar*lámp	zbar*lámp
		xbar	ybar	zbar			
380	1.57846000	0.00136800	0.00003900	0.00645000	0.00215933	0.00006156	0.01018107
385	1.73321000	0.00223600	0.00006400	0.01054999	0.00387546	0.00011093	0.01828535
390	1.89965000	0.00424300	0.00012000	0.02005001	0.00806021	0.00022796	0.03808800
395	2.07293000	0.00765000	0.00021700	0.03621000	0.01585791	0.00044983	0.07506080
400	2.25985000	0.01431000	0.00039600	0.06785001	0.03233845	0.00089490	0.15333085
-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
740	22.47410000	0.00069008	0.00024920	0	0.015508895	0.005600546	0
745	22.69190000	0.00047602	0.00017190	0	0.010801828	0.003900738	0
750	22.87750000	0.00033230	0.00012000	0	0.007602218	0.0027453	0
755	23.06570000	0.00023483	0.00008480	0	0.005416428	0.001955971	0
760	23.19950000	0.00016615	0.00006000	0	0.003854609	0.00139197	0
765	23.38130000	0.00011741	0.00004240	0	0.002745269	0.000991367	0
770	23.52330000	0.00008308	0.00003000	0	0.001954204	0.000705699	0
775	23.69320000	0.00005871	0.00002120	0	0.001390945	0.000502296	0
780	23.80550000	0.00004151	0.00001499	0	0.000988165	0.000356844	0
Suma					X 273.1761517	Y 254.6582997	Z 105.3921376

Para convertir los valores cromáticos X, Y, Z a valores del color que cumplen con el diagrama cromático de la CIE 1931, se utilizarán las ecuaciones 4 y 5 (véase el apartado 6.5 más arriba):

$$x = \frac{X}{X + Y + Z} \quad y = \frac{Y}{X + Y + Z}$$

Empleando los resultados X, Y, Z del Cuadro 4, los valores x, y que resultan son 0,4314 y 0,4022, respectivamente, al redondearlos al cuarto decimal. Este punto se encuentra dentro de la región blanca preferida de IALA.

6 CONVERSIÓN DE DATOS ESPECTRALES A INTENSIDAD LUMINOSA

Se podrá convertir la distribución de potencia espectral (SPD) medida a intensidad luminosa mediante la aplicación de la curva del observador fotópico estándar $V(\lambda)$ a los datos de la medición y sumando el resultado. Entonces, un factor de lumen por Vatio de 683 se aplica para obtener el valor de intensidad luminosa.

Cuadro 5 Resultados mostrando la conversión de distribución de potencia espectral (SPD) a intensidad luminosa

Longitud de onda (nm)	Lámpara SPD (mW)	Observador fotópico estándar $V(\lambda)$	Valor Combinado
380	1,57846000	0,00003900	0,00006156
385	1,73321000	0,00006400	0,00011093
390	1,89965000	0,00012000	0,00022796
395	2,07293000	0,00021700	0,00044983
400	2,25985000	0,00039600	0,00089490
-----	-----	-----	-----
740	22,47410000	0,00024920	0,00560055
745	22,69190000	0,00017190	0,00390074
750	22,87750000	0,00012000	0,00274530
755	23,06570000	0,00008480	0,00195597
760	23,19950000	0,00006000	0,00139197
765	23,38130000	0,00004240	0,00099137
770	23,52330000	0,00003000	0,00070570
775	23,69320000	0,00002120	0,00050230
780	23,80550000	0,00001499	0,00035684
		Suma	254,6582997
		Factor mV a cd	683/1000
		Intensidad Luminosa (cd)	173,9

ANEXO VI EJEMPLO DE UN PRESUPUESTO DE INCERTIDUMBRE PARA LA FOTOMETRÍA

Este ejemplo de presupuesto de incertidumbre se ha proporcionado meramente con fines orientativos. Se ha elaborado de acuerdo con la Guía n.º 2 de la ISO [9] e incorpora las metodologías actuales. El modelo utilizado es sencillo y tan sólo incluye las entradas que pudieran ejercer un efecto significativo en la incertidumbre. El modelo podrá variar en función del método de medición particular, los equipos de medición o el elemento objeto de la medición. Por ejemplo, si el mismo método y equipo mostrado en el ejemplo se utilizaran para medir una baliza con una lámpara de filamento de tungsteno con una salida espectral similar a la de la lámpara de referencia, ninguna corrección espectral sería necesaria. Además, se puede constatar de las aportaciones a la incertidumbre que figuran en el ejemplo que la incertidumbre del dispositivo de aumento del fotómetro ejerce poca influencia en ella y que posiblemente se podría excluir del presupuesto.

Se elaborará un presupuesto de incertidumbre por separado para cada proceso de medición si se carece de información suficiente acerca de la incertidumbre del resultado. Por ejemplo, el trazado de espectrorradiómetro mostrado en el informe del ensayo tendrá su propio presupuesto de incertidumbre para la evaluación del factor de corrección espectral (SCF). Como el modelo, tal presupuesto deberá incluir la ecuación empleada para determinar el factor de corrección espectral (SCF) (véase el apartado 4.23).

En términos generales, si existiera alguna duda acerca del significado de una aportación a la incertidumbre, ésta se evaluará y se utilizará, si fuese necesaria, o se descartará si fuese insignificante. Siempre se aspirará a lograr una reducción de la incertidumbre y, si fuera necesario, se eliminarán las fuentes innecesarias de incertidumbre, siempre que sea posible. Los tipos significativos de incertidumbre y otros factores limitadores para dos métodos de medición figuran a continuación:

1 FOTOMETRÍA AL AIRE LIBRE

Incertidumbres:

- establecimiento y medición más allá de la distancia fotométrica mínima;
- luz dispersa y ambiental;
- calibración del fotómetro;
- corrección del color del fotómetro para los colores rojo y verde;
- condiciones ambientales.

Factores limitantes:

- hallar un terreno oscuro adecuado;
- obtener la suficiente sensibilidad en el metro a la distancia fotométrica mínima.

2 METODO ZERO LENGTH

Incertidumbres:

- forma, precisión y reflectancia del espejo parabólico;
- alineación y calibración del sistema;
- luz dispersa y ambiental;
- calibración del fotómetro;
- corrección del color del fotómetro (y del espejo) para los colores rojo y verde.

Factores limitantes:

- coste y precisión del espejo parabólico;
- que el tamaño de la óptica de muestra se vea limitado al tamaño del espejo.

Incertidumbre de medición de luz

Ejemplo

Determinación de la intensidad luminosa de una baliza de luz mediante la medición de iluminancia a una medida de la distancia.

Procedimiento

Se coloca una baliza de tal manera para que su haz de luz se proyecte sobre el área de admisión de un iluminancímetro (luxómetro), colocado a la medida de la distancia. Se toman cinco lecturas de la baliza objeto del ensayo (E_{x1-5}). Se toman en cuenta las condiciones de luz ambiental y de luz dispersa mediante la ocultación del camino luminoso directo entre la baliza y el iluminancímetro, tomando cinco lecturas adicionales (E_{z1-5}). Dichas lecturas adicionales se emplean como la línea base para la medición, de tal manera que $E_x - E_z = E$, donde E es directamente proporcional a la intensidad luminosa de la baliza. Se toman tres mediciones de la distancia entre la baliza y el iluminancímetro (D_{1-3}). A la hora de medir la intensidad luminosa con respecto al desplazamiento angular, se instalará la baliza en un goniómetro y se tomarán cinco lecturas para cada posición angular incrementada (goniofotométrica). Antes de que comience el proceso goniofotométrico, se tomarán cinco lecturas de la luz ambiental y dispersa.

La respuesta espectral del iluminancímetro no sigue $V(\lambda)$ exactamente, y ello puede producir un error si la distribución espectral de salida de la baliza que se va a medir y la de la fuente luminosa empleada para calibrar el iluminancímetro son diferentes. Si los espectros son diferentes, se determinarán, de forma separada, un factor de corrección espectral (SCF) y su incertidumbre, y se aplicarán. Si dichos espectros fuesen similares, la cifra de la adecuación del ajuste a $V(\lambda)$ del iluminancímetro ($f1'$) se podrá utilizar como la incertidumbre de la medición asociada al SCF, con este último siendo la unidad.

Modelo de Medición

$$I = (E_x - E_z) \cdot SCF \cdot D^2$$

Cantidades de medición

Cantidad de salida – El valor medio de I y la incertidumbre $u(I)$ es la cantidad de salida de intensidad luminosa, en candelas, de la baliza objeto del ensayo.

Cantidad de entrada 1 – El valor medio de E_x y la incertidumbre $u(E_x)$ es la cantidad de entrada del iluminancímetro dando lecturas en lux, proporcionales a la salida de luz de la baliza objeto del ensayo, además de la luz ambiental y dispersa.

Cantidad de entrada 1 – El valor medio de E_z y la incertidumbre $u(E_z)$ es la cantidad de entrada del iluminancímetro dando lecturas en lux, proporcionales a la luz ambiental y dispersa.

Cantidad de entrada 2 – SCF y la incertidumbre $u(SCF)$ es la cantidad del factor de corrección espectral determinada por separado.

Cantidad de entrada 3 – D y la incertidumbre $u(D)$ es la cantidad de entrada de la medida de la distancia entre la baliza objeto del ensayo y el plano de admisión del iluminancímetro.

Recomendación E-200-3 – La Medición
Diciembre de 2008

Datos de entrada de la medición

Entradas	Descripción	Lecturas	Manejo de datos	Valor	Incertidumbre típica	Notas
E_{x1} Lux	Cinco lecturas en bruto de la baliza con el iluminancímetro (incluyendo la luz ambiental y dispersa).	8,44	Resultado ejemplo de 5 mediciones. Media $E_x = (E_{x1} + E_{x2} + E_{x3} + E_{x4} + E_{x5})/5 \pm u(E_x)$ Lux	8,38	0,0214	Tipo A – distribución normal – incertidumbre típica tomada de cinco lecturas
E_{x2} Lux		8,36				
E_{x3} Lux		8,38				
E_{x4} Lux		8,32				
E_{x5} Lux		8,42				
E_{z1} Lux	Cinco lecturas en bruto de la luz ambiental y dispersa con el metro iluminancia (en lux – camino luminoso directo ocluido).	0,10	Resultado ejemplo de 5 mediciones. Media $E_z = (E_{z1} + E_{z2} + E_{z3} + E_{z4} + E_{z5})/5 \pm u(E_z)$ Lux	0,15	0,0245	Tipo A – distribución normal – incertidumbre típica tomada de cinco lecturas
E_{z2} Lux		0,20				
E_{z3} Lux		0,10				
E_{z4} Lux		0,20				
E_{z5} Lux		0,10				
$E \pm 2,00\%$	Incertidumbre del iluminancímetro expresada en certificado de calibración				1,00%	Tipo B – distribución normal – incertidumbre expandida del certificado de calibración dividida por factor cobertura (p.ej. $K=2$)
$SCF = 1 \pm 0,03$	Factor de corrección espectral para el iluminancímetro		SCF $\pm u(SCF)$ la incertidumbre típica de las diferentes mediciones de distribuciones espectrales (véase BS667:1996)	1	1,50%	Tipo B – distribución normal – <i>Nota: Siempre que la salida espectral de la baliza y del iluminancímetro sean similares, $u(SCF)$ podrá ser la cifra $f1'$ y SCF se tomará como la unidad.</i>
D_1 metros	Tres mediciones de la distancia entre la baliza y el iluminancímetro	25,005	Resultado ejemplo de 3 mediciones. Media $D = (D_1 + D_2 + D_3)/3 \pm u(D)$ metros	25,000667	0,002603	Tipo A – distribución normal – incertidumbre típica tomada de tres lecturas
D_2 metros		25,001				
D_3 metros		24,996				
$D \pm 2$ mm	Incertidumbre del dispositivo de medición expresada en el certificado de calibración o resolución mínima (p.ej. 2 mm)				0,001155	Tipo B – distribución rectangular – resolución del dispositivo de medición dividida por la raíz cuadrada de 3.

Coefficiente de sensibilidad (entrada : salida)

N.º entrada	Derivación	Fórmula	Coefficiente
c1	I/E_x	$= SCF D^2$	625,0333338
c2	I/E_z	$= SCF D^2$	625,0333338
c3	I/SCF	$= E D^2$	5234,65417
c4	I/D	$= E SCF D$	209,3805833

Presupuesto de incertidumbre

Cantidad de entrada	Nombre de cantidad	Símbolo	Valor de cantidad	Incertidumbre típica $u_{(entrada)}$	Tipo de evaluación	Grados de libertad $v_{(entrada)}$	Coefficiente de sensibilidad $c_{(entrada)}$	Contribución a incertidumbre $u_{I(salida)}$ cd
1	Iluminancia de la baliza	E_x	8,38	0,021354	A	4	625,0333	13,347060
				0,001194	B	infinitos	625,0333	0,746308
2	Iluminancia ambiental y dispersa	E_z	0,15	0,024495	A	4	625,0333	15,310127
				0,001194	B	infinitos	625,0333	0,746308
3	Factor de corrección espectral	SCF	1.00	0,015000	B	infinitos	5234,65417	78,519813
4	Distancia	D	25,0006667	0,002603	A	2	209,38058	0,545105
				0,001155	B	infinitos	209,38058	0,241772
Salidas	Intensidad de la baliza	I	5140,89917		v_{eff}	1891	Incertid. combinada $u_{c(salida)}$	80,0042

Grados de libertad (v_{eff}) y factor de cobertura (k)

$v_{eff} =$ 1891 de Welch-Satterthwaith **nota: deberá ser > 100 para un factor de cobertura de 2**
 $k =$ 2 éste es el factor de cobertura para un nivel del certeza del 95% del diagrama de distribución t -

Incertidumbre expandida

$$U_{(salida)} = k \cdot u_{(salida)} \quad 2 \quad \times \quad 80,0042 \quad = \quad 160,01 \quad cd$$

Resultado expresado

Intensidad luminosa de la baliza (I) = 5141 +/-160 cd

La incertidumbre expandida de la medición se expresa como la incertidumbre típica de la medición multiplicada por el factor de cobertura k, que corresponde a una probabilidad de cobertura, o a la certeza, de aproximadamente el 95%. La incertidumbre típica se ha determinado, en tanto que fuese practicable, de acuerdo con la Publicación n.º 2 de la ISO de 1993 «Guide to Expression of Uncertainty in Measurement».

Observaciones

Las incertidumbres que figuran a continuación no se han tomado en consideración en este proceso de medición, pero se podrán considerar si se piensa que contribuyen de manera significativa.

1. Los efectos de la alineación angular (normalmente relacionados con el coseno)
2. Los efectos de la temperatura en la medición y en el rendimiento del iluminancímetro (del certificado de calibración)
3. Los efectos a largo plazo del desplazamiento (a lo largo del tiempo, el certificado de calibración y los datos de medición se podrán usar para proporcionar una evaluación)

Referencias

1. SIRA: «Practical approach to Uncertainties in Measurement», 2002
2. CIE TC 2-43: «Determination of Measurement Uncertainties in Photometry», Simposio de Expertos, 2001
3. Publicación n.º 2 de la ISO: «Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement», 1993.