

XLII Simposium Nacional de Alumbrado



Título del trabajo/ Title of paper

SEÑALIZACIÓN LUMINOSA DE CALZADAS EN AUTOVÍAS Y
AUTOPISTAS MEDIANTE TÉCNICAS Y DISPOSITIVOS
AERONÁUTICOS.

Autor/es/ Author/s

Francisco J Bugallo Siegel
Santiago Pindado Carrión
Carlos A. Lozano Arribas

Afiliación/es del autor/es/ Affiliation/s of the author/s

Departamento de Sistemas Aeroespaciales, Transporte Aéreo y
Aeropuertos. Escuela Técnica Superior de Ingeniería Aeronáutica y del
Espacio. Universidad Politécnica de Madrid.

Dirección principal/ Mail adress

Plaza del Cardenal Cisneros, 3 – 28040 Madrid

Teléfono, fax, e-mail de la persona de contacto/

Phone, fax number and e-mail adress of the contact person

Telf. +34 913366360 / 619968126
f.bugallo@upm.es

Tema:

Novedades.

Alumbrado interior y Luz natural
Aspectos generales de la iluminación
Científico y Formación
Divulgación científica
Eficiencia Energética
Fotobiología, Fotoquímica y UV
Fotometría y Luminotecnia
Informática

Investigación y Desarrollo
Los LEDs y sus aplicaciones
Luz y Salud
Normativa y Legislación
Novedades
Realizaciones
Visión y color

Introducción.

La necesidad de una señalización conspicua de los límites de las calzadas y carriles de carreteras, autovías o autopistas, en todo tiempo meteorológico, hace que se plantee, entre otros métodos, una señalización luminosa adecuada. El gran desarrollo y experiencia al que se ha llegado en la señalización luminosa aeronáutica, para el movimiento eficiente y seguro de aeronaves en superficie en condiciones meteorológicas adversas ya sea de día como por la noche, lleva a pensar en la posible aplicación de estas técnicas y en la utilización de sus sistemas para la señalización luminosa de carreteras.

Este estudio trata de comprobar y adecuar algunos de los sistemas de luces aeronáuticas de superficie para su posible aplicación a la señalización de carreteras.



Luces de pista de vuelo y calle de rodaje en una situación con niebla.

1.- Consideraciones previas.

Parámetros de definición de las bandas de circulación, calzadas, arcenes y carriles de una autovía.

Aunque en un principio se planteó el estudio para un tramo conflictivo preciso de la autovía A8, se pensó, posteriormente, hacerlo extensivo a cualquier tipo de autovía o autopista. Por ello, para la definición en planta de las calzadas se recurre a la Norma 3.1-IC, Trazado, de la Instrucción de Carreteras, del Ministerio de Fomento. En ella se establecen los criterios técnicos para el trazado geométrico de las carreteras. A efectos de aplicación de la Norma, atendiendo a sus características esenciales, se considerarán:

Autovías o Autopistas, definidas en la Ley sobre tráfico, circulación de vehículos a motor y seguridad vial, aprobada por el Real Decreto Legislativo 339/1990.

Con dos calzadas separadas diferenciadas para cada sentido de circulación, con una separación física entre ambas.

a.- Definición en planta de las calzadas, sección transversal: bandas de circulación, arcenes y carriles. Se selecciona como velocidad de proyecto 120 km/h.

Clase de carretera	Velocidad de proyecto (km/h)	Carriles (m)	Arcén		Bermas (m)		Nivel de servicio en la hora de proyecto del año horizonte
			Exterior	Interior	Mínimo	Máximo	
De calzadas separadas	120	3'5	2.5	1'5	0'75	1'5	C
	100	3'5	2.5	1'5	0'75	1'5	D
	80	3'5	2'5	1'0	0'75	1'5	D
Relación entre la clase de carretera, velocidad de proyecto y dimensionamiento de los viales.							

b.- Radio de las curvas en función de las velocidades previstas.

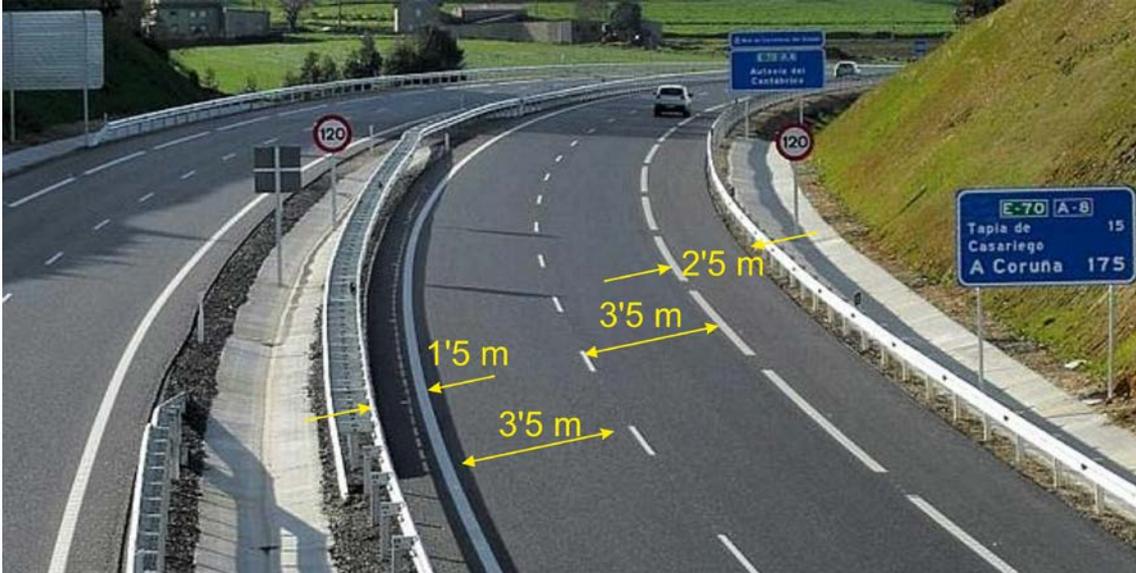
Relación de Velocidad Específica-Radio-Peralte, para Autopistas y Autovías (Grupo1). Para 120 km/h., como velocidad específica de proyecto, el radio de las curvas ha de ser igual o superior a 700 m. En el caso de curvas con menor radio se habrá adecuar la velocidad mediante la limitación de la misma, teniendo en cuenta los valores reflejados en la tabla.

Velocidad específica (km/h)	Radio (m)	Peralte (%)
80	250	8'00
85	300	8'00
90	350	8'00
95	400	8'00
100	450	8'00
105	500	8'00
110	550	8'00
115	600	8'00
120	700	8'00
125	800	7'51
130	900	6'97
135	1050	6'25
140	1250	5'49
145	1475	4'84
150	1725	4'29
Relación entre la velocidad específica y el radio de las curvas.		

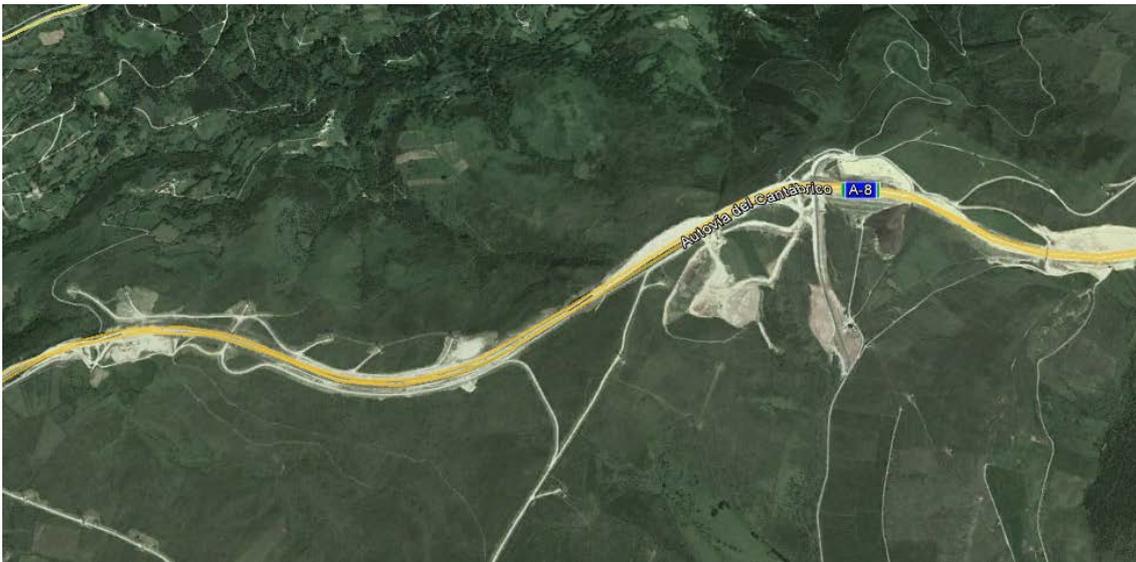
c.- Separación de los viales o mediana.

La anchura mínima de la mediana será, cuando se prevea la ampliación del número de carriles a expensas de la misma, de 10 m para velocidades de proyecto de 120 km/h., y cuando no se prevea dicha ampliación será de 2 m.

En la figura adjunta se presenta un croquis acotado de la configuración utilizada en el estudio.



Configuración carriles autovía A8. Dimensiones de los carriles y arcenes.



Tramo de la autovía A8 en el que se presenta la niebla más intensa. Alto de O Fiouco. Longitud aproximada 4.000 m. Google Earth.

Bibliografía:

“Instrucción de Carreteras Norma 3.1-IC TRAZADO”. Ministerio de Fomento. Orden de 27 de Diciembre de 1999. BOE de 2 de Febrero de 2000.

Características de los meteoros previstos.

Para las zonas en estudio se reportan:

- Nieblas de condensación por elevación del aire (Nieblas orográficas, que tienen lugar como consecuencia del enfriamiento, resultado de la elevación adiabática de una masa de aire al encontrar una cadena montañosa).
- Nubes de estancamiento (Nubes orográficas, que se producen cuando las masas de aire cargadas de humedad chocan contra una cadena montañosa, el aire asciende y se enfría, produciendo formaciones nubosas muy diversas).

Estos hidrometeoros provocan visibilidades que pueden llegar a ser inferiores a los 50 m.

En la tabla siguiente, se muestran los rangos de la visibilidad meteorológica (MOR) y otras características para los fenómenos meteorológicos más comunes que reducen la visibilidad.

Hidrometeoro	Valores MOR (m)	Absorción de la luz	Dependencia de la longitud de onda de la luz
Nebolina	1.000 – 5.000	NO	NO
Niebla	30 – 1.000	NO	NO
Llovizna	> 1.000	NO	NO
Lluvia	> 1.000	NO	NO

Manual de métodos para la observación y la información del alcance visual en la pista. OACI.

Se entiende por niebla a una suspensión de pequeñas gotas de un líquido en un gas. La Organización Meteorológica Mundial (OMM) define la niebla atmosférica como la suspensión de pequeñas gotas de agua en el aire que reduce la visibilidad horizontal en la superficie terrestre a menos de 1 km.

Coeficiente de extinción atmosférica.

En lo que respecta a los sistemas luminosos de señalización, la característica más importante de la niebla es su coeficiente de extinción. Este se puede definir como la proporción del flujo luminoso perdido por un haz colimado de luz, emitido por una fuente incandescente de una temperatura de color de 2.700 K, al recorrer la longitud de una distancia unidad por la atmósfera. Su unidad de medida es m^{-1} . Es una medida de la atenuación de la luz debida a la absorción y a la dispersión. Otro efecto que se produce en la niebla, debido a la dispersión de la luz, es el de halo luminoso que acentúa la disminución del alcance visual por pérdida de contraste al aumentar la luminancia de fondo pudiendo incluso aproximarse al deslumbramiento.



Efectos de la dispersión de la niebla.

Alcance óptico meteorológico, MOR (Meteorological Optical Range).

Se define como la longitud del trayecto en la atmósfera que se requiere para reducir el flujo luminoso, de un haz colimado de luz procedente de una lámpara incandescente con una temperatura de color de 2.700 K, a 0'05 de su valor original, siendo evaluado el flujo luminoso mediante la función de luminosidad fotométrica de la comisión Internacional de Alumbrado (CIE). Su unidad es el metro.

Los visibilímetros del tipo medidor de dispersión frontal, o del tipo transmisómetro, miden el coeficiente de extinción de la atmósfera (σ). Este coeficiente es alto si hay niebla densa o muchas partículas sólidas en la atmósfera.

El coeficiente de extinción atmosférica permite calcular el alcance óptico meteorológico (MOR) de una fuente de luz empleando la Ley de Koschmieder, cuya expresión matemática en términos de la intensidad luminosa se puede poner como:

$I_d = I_0 e^{-\sigma d}$, siendo I_d la intensidad luminosa a la distancia d (m); I_0 la intensidad luminosa de la fuente de luz (cd); σ el coeficiente de extinción atmosférica (m^{-1}).

Al ser definido el alcance óptico meteorológico (MOR) de una fuente luminosa de intensidad I_0 , como la distancia hasta la cual llega el 5% de dicha intensidad se llega a la relación: $0'05 I_0 = I_0 e^{-\sigma MOR}$, y por tanto: $MOR = 3/\sigma$.

Relación entre el alcance meteorológico y el coeficiente de extinción atmosférico.		
Condiciones meteorológicas	MOR	σ (m-1)
Excepcionalmente claro	> 50 Km	> 6 10-5
Muy claro	50 Km	6 x 10-5
Claro	20 Km	1'1 x 10-4
Ligera calima	10 Km	3 x 10-4
Calima	4 Km	7'5 x 10-4
Niebla fina	2 Km	1'5 x 10-3
Niebla ligera	1 Km	3 x 10-3
Niebla moderada	500 m	4 x 10-3
Niebla espesa	200 m	0'015
Niebla densa	50 m	0'06

Niebla muy densa	30 m	0'1
Niebla excepcionalmente densa	15 m	0'2

Claridad óptica de la atmósfera.

El concepto de claridad óptica de la atmósfera se puede expresar mediante diversos parámetros: Coeficiente de Extinción (σ), Alcance Óptico Meteorológico (MOR), Transmitancia (t_b) y Transmisividad (T). Estos parámetros están relacionados entre sí a través de las siguientes expresiones:

$$\sigma = -\frac{\ln t_b}{b} = -\ln T; \quad MOR \approx \frac{3}{\sigma}; \quad t_b = e^{-\sigma b} = T^b; \quad T = e^{-\sigma}$$

El coeficiente de extinción atmosférica (σ), o la transmitancia atmosférica (t) son los factores más importantes a la hora de determinar el RVR, o alcance visual utilizado en aeronáutica, a partir de las leyes de Koschmieder o de Allard. El coeficiente de extinción representa la atenuación de la luz debido a la dispersión y absorción de la luz como consecuencia de la formación de aerosoles.

La dispersión es el efecto predominante de la niebla y de la nieve. Éstos son los fenómenos meteorológicos que más prevalecen y que llevan a reducir la visibilidad por debajo de los 1.500 metros. La absorción desempeña una función más importante en el caso de la calima, polvo y humo. La extinción debida tanto a la dispersión como a la absorción se mide con los transmisómetros.

Bibliografía:

- “Manual de métodos para la observación y la información del alcance visual en la pista” Doc 9328. OACI. 2005.
- “Servicio meteorológico para la navegación aérea internacional”. Anexo 3. Parte I y II. Organización de Aviación Civil Internacional. 2007.
- “Manual on Automatic Meteorological Observing Systems at Aerodromes”. Doc 9837. Organización de Aviación Civil Internacional. 2011.
- “Meteorology Glossary”. American Meteorological Society.
- “Aeronautical Meteorological Observing” y “Aviation Meteorological Theory”. OMM (Organización Meteorológica Mundial (OMM) (WMO)

Alcance visual de las luces.

Se puede definir, en general, el Alcance Visual como la distancia máxima, normalmente en sentido horizontal, a la cual una fuente luminosa o un objeto resultan visibles en condiciones particulares de transmitancia y de iluminación de fondo o entorno.

Con fines aeronáuticos, la OACI define el Alcance Visual en Pista o RVR como la distancia hasta la cual el piloto de una aeronave que se encuentra sobre el eje de una pista puede ver las señales de superficie de la pista o las luces que la delimitan o que señalan su eje.

El RVR no es una observación ni una medición de un parámetro meteorológico. Se trata de una evaluación que se basa en cálculos en los que se tiene en cuenta varios parámetros incluyendo factores atmosféricos tales como el coeficiente de extinción atmosférico, factores físicos y biológicos tales como el umbral visual de la iluminación

y factores operacionales tales como la intensidad de las luces de las pistas. Su objetivo principal es proporcionar información sobre las condiciones de visibilidad en la pista ya sea por niebla o por otras causas como la lluvia, nieve o tormentas de arena. Para establecer el alcance visual de las luces se utiliza la Ley de Allard, expresión matemática que relaciona la iluminación E (lux) producida por una fuente luminosa puntual de intensidad I (cd) sobre un plano normal a la línea de visión, a la distancia d (m) de la fuente, en una atmósfera con una transmisividad T o coeficiente de extinción σ (m^{-1}) ($T = e^{-\sigma}$):

$$E_d = I_0 \frac{e^{-\sigma d}}{d^2}$$

Esta misma expresión en función del RVR se puede reescribir como:

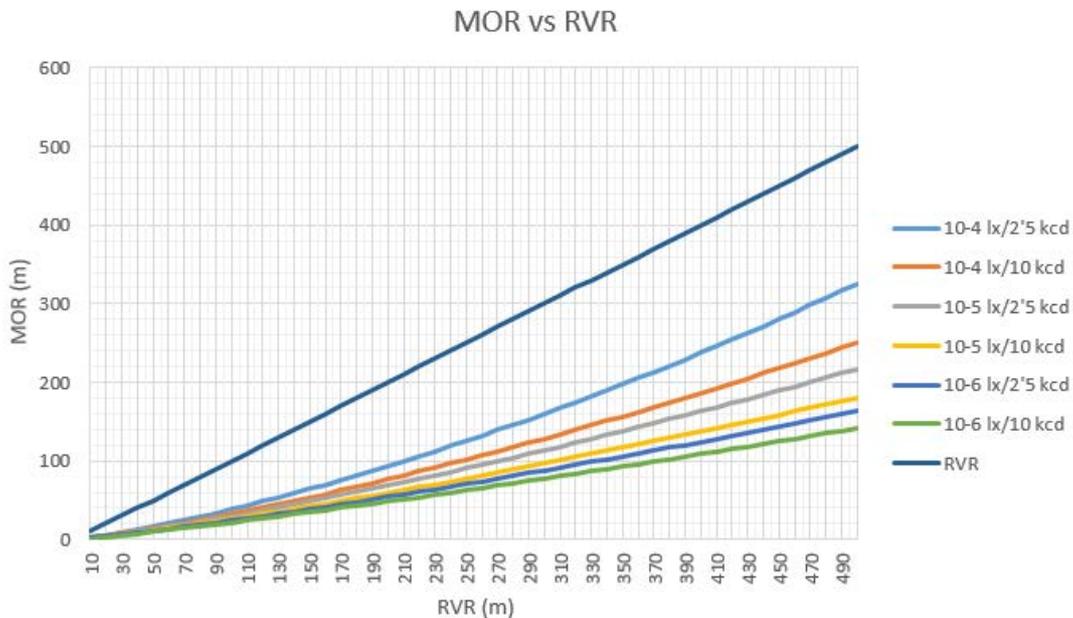
$$E_{RVR} = I_0 \frac{e^{-\sigma RVR}}{RVR^2}, \text{ en la que el RVR se expresa en metros.}$$

Relación entre el MOR y el RVR.

Existe una relación entre el alcance óptico meteorológico MOR y el alcance visual en

pista RVR. Teniendo en cuenta que $\sigma = \frac{3}{MOR}$ se puede expresar:

$$E_{RVR} = I_0 \frac{e^{-\frac{3 RVR}{MOR}}}{RVR^2}$$



Relación entre el RVR y el MOR para valores de 2'5 y 10 kcd de intensidad de la luz y tres condiciones atmosféricas: $E_{th} = 10^{-6}$ lx (noche), $E_{th} = 10^{-5}$ lx (crepúsculos) y $E_{th} = 10^{-4}$ lx (día).

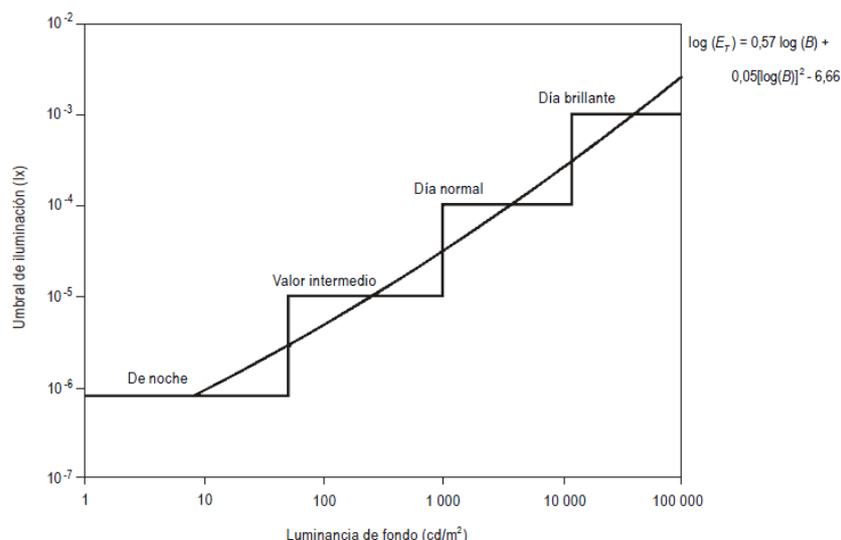
Para que un objeto sea visible ha de existir un Contraste de Luminancias (C), que se define como la relación entre la diferencia de la luminancia de un objeto y la luminancia de su fondo, con respecto a la luminancia del fondo. A partir de este valor se establece el Umbral de Contraste (ϵ), como el contraste mínimo de luminancia que

puede ser detectado por el ojo humano, es decir, el valor que permite distinguir a un objeto de su fondo o entorno. Ambos son parámetros adimensionales.

Valores típicos de la luminancia de fondo.	
Situación	Iluminancia de fondo (cd/m ²)
Obscuridad de la noche	< 5
Crepúsculo/penumbra 30 a 15 minutos antes de la salida del Sol 15 a 30 minutos después de la puesta del Sol	10 – 100
Crepúsculo/penumbra 15 a 0 minutos antes de la salida del Sol 0 a 15 minutos después de la salida del Sol	100 – 700
Puesta o salida del Sol (cielo despejado)	750 – 950
Entre las 8 y las 12 horas	1.000 – 10.000
Mediodía 12 a 14 horas en día muy brillante	15.000

Para fuentes de luz y elementos luminosos, se establece el Umbral Visual de Iluminancia, E_{th} , como la mínima iluminancia requerida por el ojo humano para alcanzar a ver una pequeña fuente luminosa. La visión, o no, del elemento luminoso dependerá de la luminancia de su entorno o luminancia de fondo, de forma que cuanto más elevada sea ésta mayor habrá de ser el Umbral Visual de Iluminación. Su unidad de medida es lux (lx) y su relación con la luminancia de fondo B (cd/m²), para el ojo humano, se puede expresar matemáticamente por la siguiente expresión:

$$\log(E_{th}) = 0'57 \log(B) + 0'05 \log^2(B) - 6'66$$



El umbral más bajo de E_{th} se fija en $6'8 \cdot 10^{-6}$ lux, que corresponde al umbral límite nocturno. A partir de este valor se discretiza la función y se toman los siguiente valores como base para obtener el alcance visual de las luces:

$E_{th} = 10^{-3}$, condición niebla con sol, entorno más brillante.

$E_{th} = 10^{-4}$, condición diurna.

$E_{th} = 10^{-5}$, condición intermedia.

$E_{th} = 10^{-6}$, condición nocturna, atmósfera nítida de noche sin luna.

Una luz será visible cuando la iluminación que produce al observador es superior al valor umbral E_{th} . Aplicando la Ley de Allard se obtiene:

$$E_{th} = \frac{I e^{-\sigma d}}{d^2} \text{ o bien } I = E_{th} \times d^2 \times e^{\sigma d}, \text{ siendo: } I, \text{ valor de la intensidad de la luz (cd)}$$

en dirección del observador; E_{th} , umbral de iluminación (lx) para las condiciones meteorológicas existentes; σ , coeficiente de extinción atmosférica (m^{-1}) para las condiciones meteorológicas existentes; d , distancia (m) desde el foco luminoso al observador.

Así, por ejemplo, en condiciones de niebla con Sol ($E_{th} = 10^{-3}$ lx y $\sigma = 0'06$ m^{-1}) será necesario un intensidad luminosa de 60 cd para que una luz sea visible a 50 m. Para que se pudiese ver a 100 m, la intensidad de la luz debería ser de unas 4.000 cd.

El alcance visual en la pista, RVR, se evalúa empleando datos del alcance óptico meteorológico (MOR), la intensidad de las luces de la pista (I) y de la luminancia de fondo (B).

- Sí la intensidad, I, y la luminancia de fondo, B, permanecen constantes, el alcance visual en la pista (RVR) aumenta si el alcance óptico meteorológico (MOR) aumenta.
- Sí el alcance óptico meteorológico, MOR, y la intensidad, I, permanecen constantes, el alcance visual en la pista (RVR) aumenta sí la luminancia de fondo disminuye; es decir que el piloto podrá ver mejor las luces de pista en la obscuridad.
- Si el alcance óptico meteorológico, MOR, y la luminancia de fondo, B, permanecen constantes; el alcance visual en la pista (RVR) aumenta sí aumenta la intensidad de las luces de la pista (I).

Bibliografía:

“Manual de métodos para la observación y la información del alcance visual en la pista”. . Doc 9328 AN/908. OACI.

“Manual on Automatic Meteorological Observing Systems at Aerodromes”. Doc 9837. Doc 9837AN/454. OACI.

“Anexo 3 – Servicio meteorológico para la navegación aérea internacional”. Parte I - Sarpes básicos. Parte II – Apéndices y adjuntos. OACI.

“Manual sobre sistemas automáticos de observación meteorológica en aeródromos” Doc 9837 AN/454. OACI.

“Manual de sistema avanzado de guía y control del movimiento en la superficie (A-SMGCS)”. Doc 9830. OACI.

“Surface movement guidance and control system”. AC 120 – 57A. Federal Aviation Administration. USA.

Definición del tramo visible y su señalización luminosa.

El tramo visible para el conductor de un vehículo ha de ser tal que circulando el vehículo a una velocidad determinada pueda detenerse ante la visión de un obstáculo si colisionar con él (alcance). El conductor de dicho vehículo ha de ver la señalización luminosa por lo menos en dicho tramo.

Para que un vehículo no colisione con un obstáculo antepuesto ha de estar a una distancia suficiente para que le dé tiempo a frenar. Teniendo en cuenta que durante la niebla la calzada se encuentra húmeda, es de esperar que la distancia de frenado de los vehículos sea mayor que en condiciones de calzada seca.

La distancia total de parada de un vehículo se puede dividir en 3 tramos correspondientes a las fases:

1.- Tiempo de reacción, que transcurre desde el momento en que el conductor detecta el obstáculo y decide frenar hasta que coloca el pie sobre el pedal del freno. Puede variar entre 0'5 y 1'5 segundos, considerando un conductor en buen estado físico y mental. Durante este tiempo el vehículo recorre una distancia que depende de la velocidad que lleve en ese momento.

2.- Tiempo de respuesta del sistema, es el que transcurre desde que el conductor coloca el pie sobre el pedal del freno hasta que las pastillas ejercen presión sobre los discos o tambores. En sistemas hidráulicos el período es de 0'2 a 0'5 segundos, en vehículos pesados con sistema neumático es de 0'6 a 1'2 segundos, considerando ambos en buen estado de mantenimiento.

3.- Parada efectiva, es la distancia que recorre el vehículo desde el momento que empieza a actuar el sistema de frenado hasta la detención total del vehículo.

Una expresión matemática para el cálculo teórico de la distancia recorrida durante la parada efectiva es:

$$D_f = \frac{K_e \times V^2}{254 \times \mu}$$

, siendo K_e , la constante cinética con valor 1'2 para vehículos ligeros

y 1'4 para vehículos pesados; V , la velocidad del vehículo (km/h); μ , coeficiente de fricción neumático - pavimento; 254 factor de conversión de la velocidad.

Valores aproximados de los coeficientes de rozamiento del pavimento para neumáticos de goma.

Descripción de la superficie	SECA		HÚMEDA	
	Menos de 50 km/h.	Más de 50 km/h.	Menos de 50 km/h.	Más de 50 km/h.
Cemento				
Nuevo, liso	0.80-1.20	0.70-1.0	0.50-0.80	0.40-0.75
Usado	0.60-0.8	0.60-0.75	0.45-0.70	0.45-0.65
Pulimentado por el tráfico	0.55-0.75	0.50-0.65	0.45-0.65	0.45-0.6
Asfalto o alquitrán				
Nuevo, liso	0.80-1.20	0.65-1.0	0.50-0.80	0.45-0.75
Usado	0.60-0.8	0.55-0.70	0.45-0.70	0.40-0.65
Pulimentado por el tráfico	0.55-0.75	0.45-0.65	0.45-0.65	0.40-0.60
Con exceso de alquitrán	0.50-0.6	0.35-0.60	0.30-0.60	0.25-0.55
Adoquín				
Nuevo, liso	0.75-0.95	0.60-0.85	0.50-0.75	0.45-0.70

Pulimentado por el tráfico	0.60-0.80	0.55-0.75	0.40-0.70	0.40-0.60
Piedra compacta				
Nuevo, liso	0.75-1.0	0.70-0.90	0.65-0.90	0.60-0.85
Pulimentado por el tráfico	0.50-0.70	0.45-0.65	0.30-0.50	0.25-0.50
Grava				
Apisonada, con riego asfáltico	0.55-0.85	0.50-0.80	0.40-0.80	0.40-0.60
Suelta	0.40-0.70	0.40-0.70	0.45-0.75	0.45-0.75
Escorias				
Compactadas	0.50-0.70	0.50-0.70	0.65-0.75	0.65-0.75
Piedra				
Machacada	0.55-0.75	0.55-0.75	0.55-0.75	0.55-0.75
Hielo				
Liso	0.10-0.25	0.07-0.20	0.05-0.10	0.05-0.10
Nieve				
Compactada	0.30-0.55	0.35-0.55	0.30-0.60	0.30-0.60
Suelta	0.10-0.25	0.10-0.20	0.30-0.60	0.30-0.60
Reja metálica				
Con ranuras	0.70-0.9	0.35-0.75	0.25-0.45	0.20-0.35

La siguiente tabla proporciona la distancia total de frenado para distintas velocidades suponiendo: un vehículo pesado, un tiempo de reacción 1 segundo; el tiempo de respuesta del sistema de 0'3 segundos; y el coeficiente de fricción 0'6, es decir, para una carretera normal húmeda y un vehículo con neumáticos en buenas condiciones

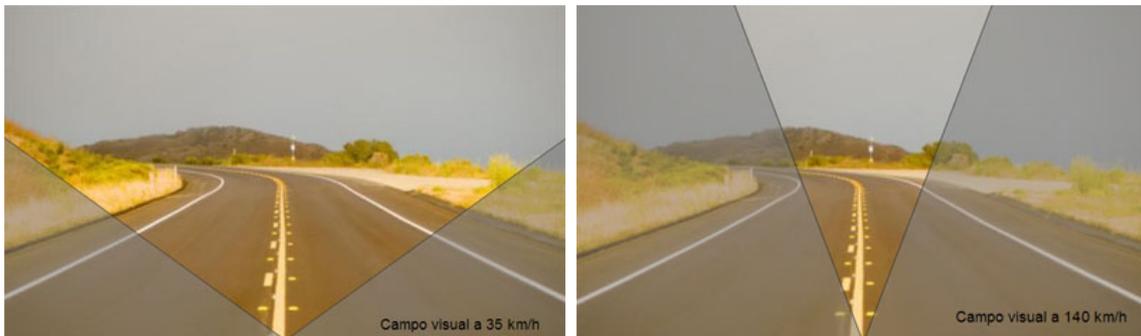
Velocidad (km/h)	Distancia por Tiempo de reacción (m)	Distancia por Respuesta del Sistema (m)	Frenada efectiva (m)	Distancia total de frenado (m)
60	17	5	28	50
90	25	7	64	96
100	28	8	79	115
120	33	10	113	156

Otro efecto que produce la velocidad de desplazamiento del vehículo es la disminución del campo visual y percepción del conductor. Durante la conducción las imágenes de los objetos se proyectan en la retina de forma difusa ya que se captan y suceden a gran velocidad. A medida que se incrementa la velocidad las imágenes se vuelven todavía más confusas, por lo que se produce una reducción en la visibilidad. Este estado se conoce como campo de visión cinético. A elevadas velocidades el conductor sufre el efecto túnel, su campo de visión queda tan reducido que tiene la sensación de circular por un túnel.

A modo de ejemplo: circulando a 35 km/h el ángulo de visión cubierto será de unos 104° con lo que es fácil detectar objetos situados fuera de los márgenes de la

carretera; a 65 km/h se reduce la visión periférica a 70°; velocidades de 100 km/h la visión periférica disminuye hasta unos 42°, limita la percepción de elementos muy cercanos a la calzada, o en el carril anexo; circulando a 130 km/h aparece el efecto túnel, el ángulo de visión se limita a 30°. Se dejan de percibir objetos periféricos a ambos lados de la calzada, como señales, semáforos, obstáculos, peatones, etc.; por último, a 150 km/h se produce el cataclismo perceptivo, se pierde la visión periférica y se imposibilita la evaluación correcta de las distancias y velocidades.

Una reducción de la velocidad de tan sólo 10 km/h mejora la visión periférica entre 7° y 10°.



Imágenes de campo visual cortesía de la DGT y Asociación Educar.

Se ha de considerar esta restricción del campo visual a la hora de seleccionar la apertura del haz de las luces y de establecer las interdistancias de las luces de señalización del borde de las calzadas.

Resumiendo, para circular a 120 km/h hace falta una distancia de frenado de unos 100 m y el ángulo de visión es de 45°. Por tanto, el tramo de señalización luminosa que convendría visualizar el conductor debería ser de al menos 100 m. Para circular a 80 km/h, velocidad máxima que se supone ha de llevar un vehículo circulando en niebla, la distancia de frenado es de unos 50 m y su campo visual de 60°. Para este trabajo se establecen las condiciones del segundo caso.

Bibliografía:

“The Transmission Of Visible Light Through Fog”. Houghton, H.G. Round Hill Research Division. Massachusetts Institute of Technology. 1931.

“Attenuation of Electromagnetic Radiation by Haze, Fog, Clouds and Rain”. C.C. Chen. United States Air force Project Rand. 1975.

“Replacement Processes for Light Emitting Diode (LED) Traffic Signals”. Bullough, J.D. Snyder, J.D. Smith, A.M. Klein, T.R. Lighting Research Center. Rensselaer Polytechnic Institute Troy, New York. 2009.

“Transmission Of Light In A Synthetic fog Medium”. Babaria, B.R. Alvarez, T.L. Bergen, M.T. Servatius, Bioengineering Conference. Proceedings of the IEEE 30th Annual Northeast. 2004.

“Vision In High Light Scattering Conditions”. Gatis Ikaunieks, University of Latvia. 2010.

“Investigation of Led Light Attenuation in Fog”. Otas, K. Pakenas, J. Vaskys, A.Vaskys, P. Department of Electrical Engineering, Kaunas University of Technology. 2012.

“Penetration Properties of Led Light Sources in Water Fog and Sea Fog”. Zeng, Shan-shan. Jin, Shan-zhong. Wang, Yu-rong, Shi, Cang-shou. Lu, Yu-hong. Acta Photonica Sinica.2013

“El Libro Blanco de la Iluminación”. 7 Tomos. Comité Español de la Iluminación. 2013.

2.- Selección del tipo de luz aeronáutica de superficie para la señalización visual luminosa de los arceles en las carreteras.

Tipo de luces de guiado de aeronaves en aeródromos.

Los sistemas de luces aeronáuticas de superficie son de uso extendido en la práctica totalidad de aeropuertos del mundo. Todos sus elementos se encuentran normalizados internacionalmente (OACI, FAA, CAA, etc). Su disposición es prácticamente inmediata gracias al número de empresas multinacionales del sector. Todo ello suscita una calidad y fiabilidad del producto que normalmente no se presenta en otros similares.

Analizada la configuración de los viales de las autovías y autopistas, y el desarrollo de su tráfico rodado, se llega a la conclusión que de todos los tipos de luces aeronáuticas de superficie utilizadas en los aeródromos las más indicadas, para la señalización que se pretende de las calzadas de las carreteras, son las luces de eje de calle de rodaje. Estas luces están diseñadas para señalar los ejes de las calles de circulación de las aeronaves en los aeropuertos e indicar a los pilotos las trayectorias a seguir en ellas. Su haz de luz es direccional (unidireccional o bidireccional) con un diagrama isocandela muy adecuado para el fin que se pretende.

Análisis del tipo de luz, regla de las cuatro C: Configuración, Cobertura, Candelas y Color.

a.- Configuración.

La experiencia en el movimiento de vehículos por las calzadas aconseja no disponer de elementos en las superficies de rodadura que puedan provocar efectos adversos en la conducción ni provoque daños en las bandas de rodadura de las cubiertas de los neumáticos de los vehículos durante su desplazamiento. Aun siendo el tipo de luces seleccionadas de instalación empotrada, sobresalen unos milímetros de la superficie rasante del pavimento provocando vibraciones en los vehículos que ruedan sobre ellas, son de superficie metálica que puede producir deslizamientos inadecuados, además se producen, con cierta frecuencia, disgregaciones con el pavimento presentando bordes resaltados, etc. Por todo ello, se desecha la instalación de las luces de eje de calle de rodaje en las propias calzadas.

La señalización luminosa se dispone adyacente a la señal del borde de arcén, por su lado exterior y separado unos 30 cm del eje de la señal, sin alterar la señalización horizontal normalizada. El uso de luces empotradas en el arcén hace que éste quede expedito para el rodaje de los vehículos en casos especiales o de emergencia.



Separación de la luz de la señal de eje de calle de rodaje, y separación de la luz de la señal de bode de arcén.

Dentro del tipo de luces de eje de calle de rodaje, y para el fin que se persigue, se opta por las luces de calle de rodaje en tramo curvo. Presentan el haz principal desviado hacia el centro de la calle de rodaje en los aeródromos. Esto permite dirigir el haz principal de la luz hacia el interior de la calzada en las carreteras de forma que, al estar desplazadas del eje de dirección de la marcha, iluminen hacia el vehículo evitando iluminar zonas no deseadas del arcén. La cobertura de su haz de luz es más adecuado que el de las luces de haz simétrico de tramo recto.

Aplicando el criterio de OACI, para las luces de eje de calle de rodaje, por el que se define un tramo recto mediante tres luces, la configuración de las mismas debería ser, en condiciones meteorológicas adversas con un segmento visual RVR de unos 50 m, de una luz cada 15 m, y en tramos curvos con radios de hasta 400 m, en los que se necesita ver un mayor número de luces para establecer la trayectoria de progreso, de 7'5 m.

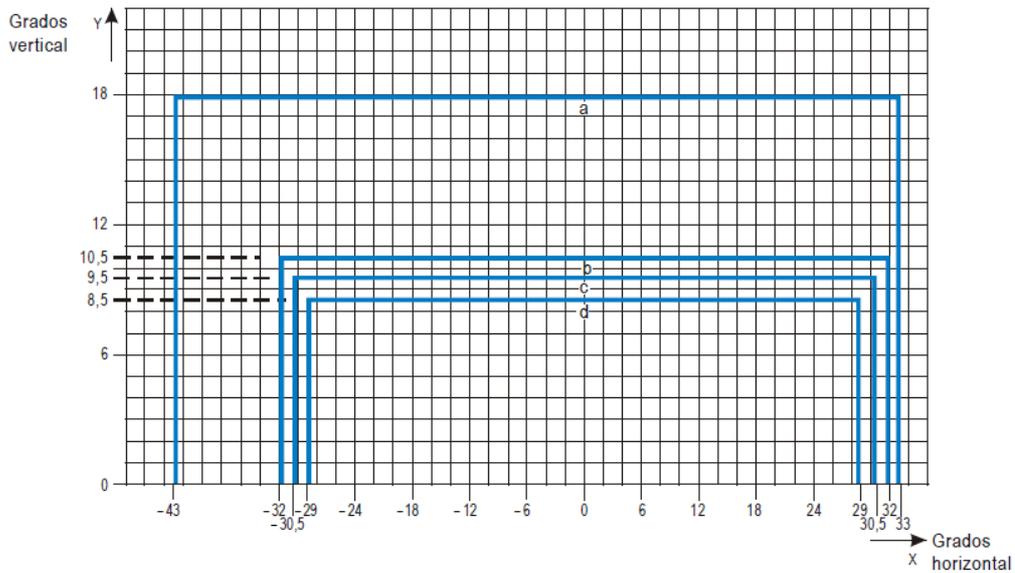
La OACI establece la siguiente tabla para el espaciado de las luces de eje de calle de rodaje en tramos curvos, en función del radio de la curva:

Radio de la curva	Espaciado de las luces
Hasta 400 m	7'5 m
De 401 m a 899 m	15 m
900 m o más	30 m

b.- Cobertura.

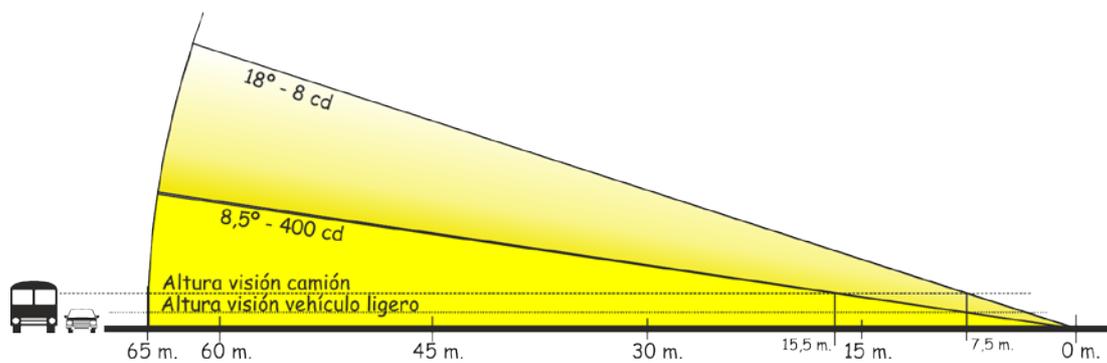
La cobertura del haz de las luces de calle de rodaje en tramos curvos está definida en el Apéndice 2, características de las luces aeronáuticas de superficie. Anexo 14 de la OACI.

En la figura adjunta se muestra el diagrama isocandela para las luces de eje de calle de rodaje con espaciado de 7'5 metros. Las luces en las curvas que se han de instalar con la convergencia de 17° indicada por la OACI. Los ángulos horizontales se miden con respecto a la tangente a la curva. Los ángulos verticales se miden respecto a la pendiente longitudinal de la superficie del arcén.

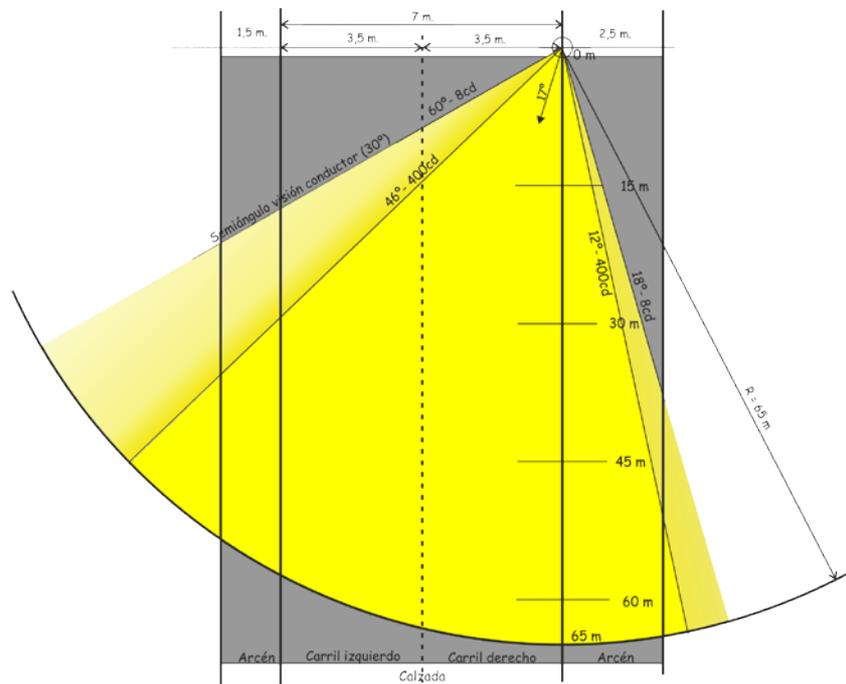


Curva	a	b	c	d
Intensidad (cd)	8	100	200	400

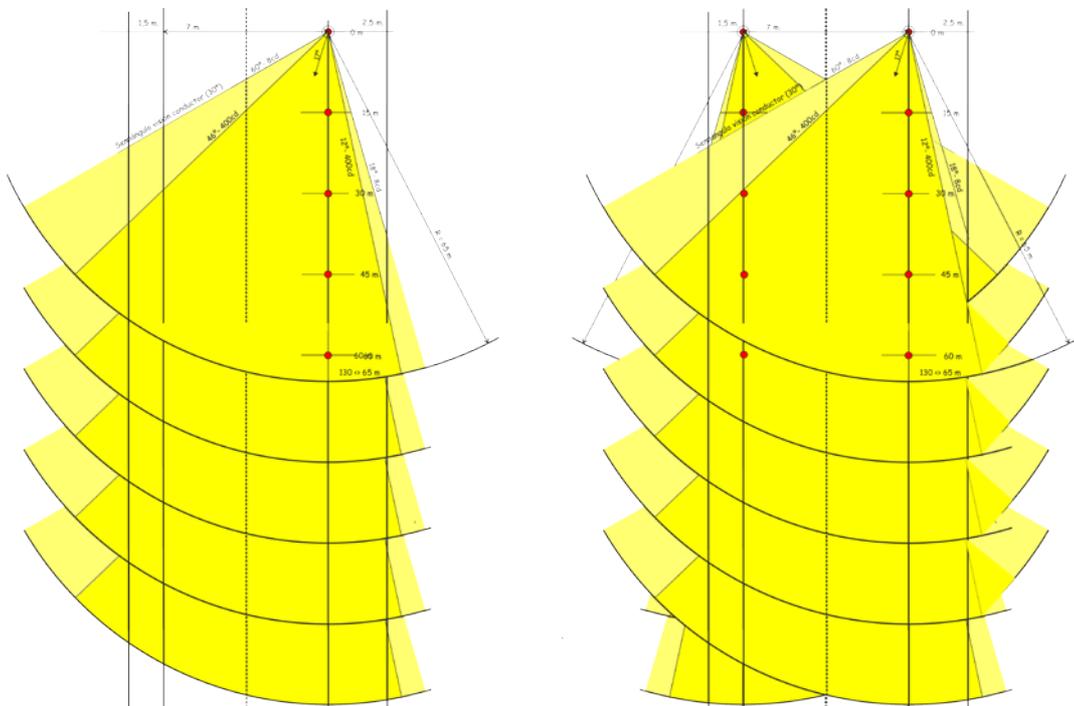
Las luces de eje de calle de rodaje de tramo curvo se instalarán en las proximidades de la señal de arcén, tanto en los tramos rectos como en los curvos, con la convergencia de 17° respecto a la señal del arcén en los tramos rectos o a la tangente a la curva en los tramos curvos, y con dirección hacia la calzada



Cobertura vertical para una luz y altura de visión del conductor.



Cobertura de una luz situada en el arcén derecho según el sentido de la marcha.



Cobertura para una fila de luces en arcén derecho y de dos filas de luces arcén derecho e izquierdo. Separación entre luces 15 metros.

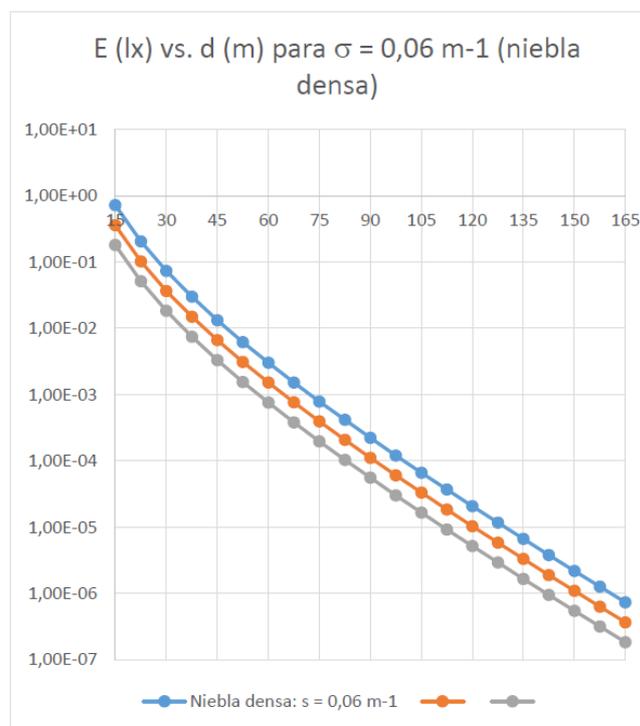
Se comprueba que la cobertura del haz del tipo de luz seleccionada es adecuada para un conductor de un vehículo ligero (automóvil) cuya altura de los ojos respecto de la calzada se puede estimar en 1'10 m, y la de un conductor de un vehículo pesado (camión) cuya altura se estima en 2'50 m, para las distancias de visión de las luces indicadas en la definición del tramo visible.

c.- Candelas.

Para los valores de intensidad luminosa máxima del haz de luz, definidos por la OACI: 100, 200 y 400, para este tipo de luces, un coeficiente de extinción atmosférica correspondiente a la niebla densa de $\sigma = 0'06 \text{ m}^{-1}$ y aplicando la ley de Allard:

$$E = \frac{I \times e^{-\sigma \times d}}{d^2}, \text{ se obtienen los valores mostrados en la tabla siguiente:}$$

d (m)	Niebla densa: $\sigma = 0,06 \text{ m}^{-1}$		
	I = 400 cd	I = 200 cd	I = 100 cd
7,5	4,53E+00	2,27E+00	1,13E+00
15	7,23E-01	3,61E-01	1,81E-01
22,5	2,05E-01	1,02E-01	5,12E-02
30	7,35E-02	3,67E-02	1,84E-02
37,5	3,00E-02	1,50E-02	7,50E-03
45	1,33E-02	6,64E-03	3,32E-03
52,5	6,22E-03	3,11E-03	1,55E-03
60	3,04E-03	1,52E-03	7,59E-04
67,5	1,53E-03	7,65E-04	3,82E-04
75	7,90E-04	3,95E-04	1,97E-04
82,5	4,16E-04	2,08E-04	1,04E-04
90	2,23E-04	1,12E-04	5,58E-05
97,5	1,21E-04	6,06E-05	3,03E-05
105	6,66E-05	3,33E-05	1,67E-05
112,5	3,70E-05	1,85E-05	9,25E-06
120	2,07E-05	1,04E-05	5,18E-06
127,5	1,17E-05	5,86E-06	2,93E-06
135	6,66E-06	3,33E-06	1,67E-06
142,5	3,81E-06	1,91E-06	9,53E-07
150	2,19E-06	1,10E-06	5,48E-07
157,5	1,27E-06	6,34E-07	3,17E-07
165	7,37E-07	3,69E-07	1,84E-07



Teniendo en cuenta los valores de iluminancia de umbral: $E_{th} = 10^{-3} \text{ lx}$ para situaciones de niebla con Sol y $E_{th} = 10^{-6} \text{ lx}$ en el caso de noche, se puede establecer la distancia a la cual es visible la luz en esas dos situaciones. Para el primer caso la distancia se encuentra en el entorno a los 60 m y en el segundo alrededor de los 150 m.

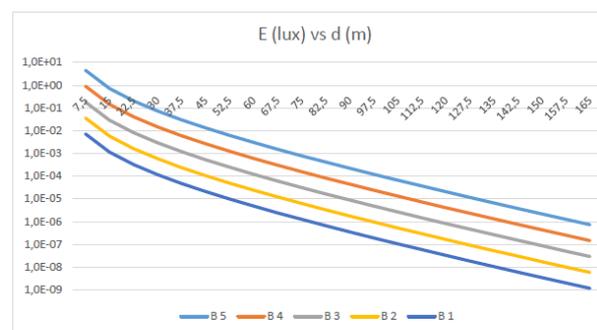
La regulación del nivel de brillo de las luces, mediante una fuente de alimentación de corriente constante (CCR) del circuito serie, permite adecuar la intensidad de las luces a las condiciones ambientales del momento. En España, se utilizan reguladores de corriente constante de 5 niveles, o escalones, de brillo correspondientes al 100%, 20%, 4%, 0'8% y 0'16% del brillo nominal, o luminancia nominal del haz principal. Estos niveles de luminancia se obtienen variando la corriente de salida al bucle serie

de luces con valores de 6'6, 5'2, 4'1, 3'4 y 2'8 amperios que provee el selector de brillo del regulador de corriente constante (CCR).

En la tabla y gráfico adjunto se muestra la variación de la luminancia de la luz y de la distancia a la que es visible, para las condiciones atmosféricas anteriores y los diversos niveles de brillo. Partiendo de un nivel de brillo 5 correspondiente al 100% de luminancia máxima de 400 cd de la luz, se obtienen los 67 y 157 m de distancia de visión y que se reducen a 7'5 y 67'5 m para brillo 1 con el 0'16% de brillo máximo, es decir, con una luminancia de 0'64 cd.

Por tanto, se utilizará brillo 5 en aquellas condiciones ambientales de niebla diurnas y brillo 1 durante las noches. Los brillos intermedios se irán seleccionando según sean las condiciones atmosféricas reinantes en el momento, ya sea manualmente o de forma automática.

Umbral de visión: Noche Eth = 10-6 lux; Niebla con Sol Eth = 10-3 lux					
d (m)	I = 400 cd				
	Brillo 5	Brillo 4	Brillo 3	Brillo 2	Brillo 1
	100%	20%	4%	0'8%	0'16%
	400 cd	80 cd	16 cd	3,2 cd	0,64 cd
7,5	4,5E+00	9,1E-01	1,8E-01	3,6E-02	7,3E-03
15	7,2E-01	1,4E-01	2,9E-02	5,8E-03	1,2E-03
22,5	2,0E-01	4,1E-02	8,2E-03	1,6E-03	3,3E-04
30	7,3E-02	1,5E-02	2,9E-03	5,9E-04	1,2E-04
37,5	3,0E-02	6,0E-03	1,2E-03	2,4E-04	4,8E-05
45	1,3E-02	2,7E-03	5,3E-04	1,1E-04	2,1E-05
52,5	6,2E-03	1,2E-03	2,5E-04	5,0E-05	1,0E-05
60	3,0E-03	6,1E-04	1,2E-04	2,4E-05	4,9E-06
67,5	1,5E-03	3,1E-04	6,1E-05	1,2E-05	2,4E-06
75	7,9E-04	1,6E-04	3,2E-05	6,3E-06	1,3E-06
82,5	4,2E-04	8,3E-05	1,7E-05	3,3E-06	6,7E-07
90	2,2E-04	4,5E-05	8,9E-06	1,8E-06	3,6E-07
97,5	1,2E-04	2,4E-05	4,8E-06	9,7E-07	1,9E-07
105	6,7E-05	1,3E-05	2,7E-06	5,3E-07	1,1E-07
112,5	3,7E-05	7,4E-06	1,5E-06	3,0E-07	5,9E-08
120	2,1E-05	4,1E-06	8,3E-07	1,7E-07	3,3E-08
127,5	1,2E-05	2,3E-06	4,7E-07	9,4E-08	1,9E-08
135	6,7E-06	1,3E-06	2,7E-07	5,3E-08	1,1E-08
142,5	3,8E-06	7,6E-07	1,5E-07	3,1E-08	6,1E-09
150	2,2E-06	4,4E-07	8,8E-08	1,8E-08	3,5E-09
157,5	1,3E-06	2,5E-07	5,1E-08	1,0E-08	2,0E-09
165	7,4E-07	1,5E-07	2,9E-08	5,9E-09	1,2E-09



d.- Color.

En los aeródromos el color de las luces de eje de calle de rodaje puede ser verdes, en tramos de baja velocidad, y amarillas y verdes alternadas, en tramos de mayor velocidad y zonas afectadas por el diagrama de radiación del ILS (Instrumental Landing System) proporcionando un código de situación. En el caso que se contempla se opta por utilizar luz amarilla (aviación) con buena penetración en la niebla. La luz amarilla es también adecuada en cuanto al código de colores utilizado en las carreteras ya que habitualmente se emplea el amarillo en la señalización de tramos que requieren una especial atención, como el caso de existencia de obras en la calzada, etc.

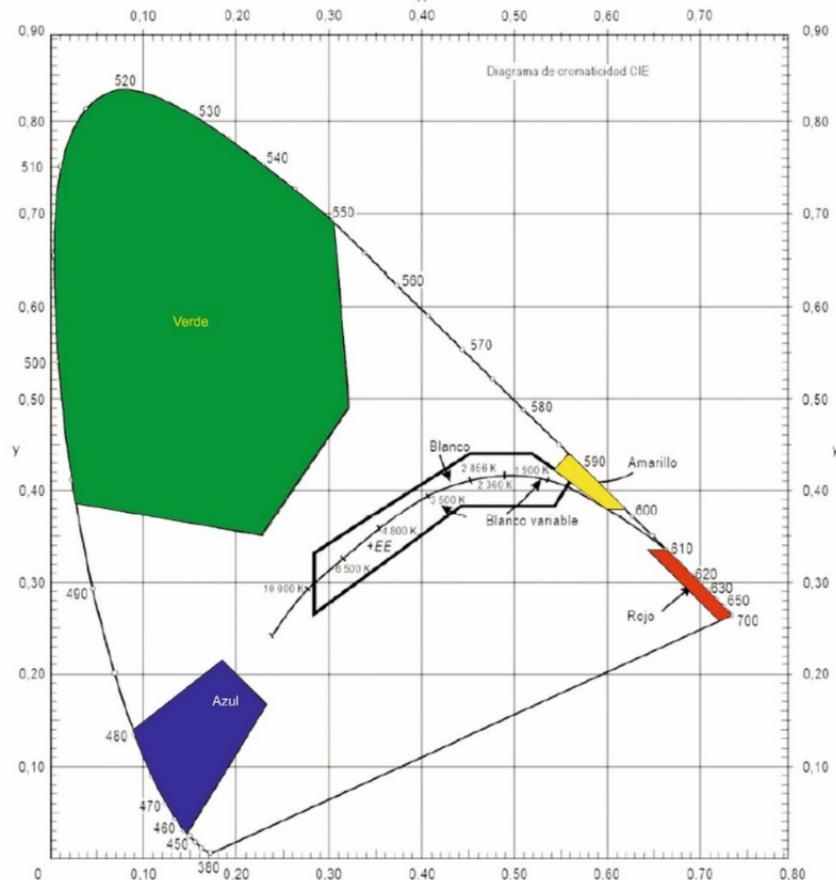


Luces de eje de calle de rodaje, salida rápida, en condiciones de niebla.



Luces de eje de calle de rodaje en plataforma de estacionamiento de aeronaves.

La cromaticidad de la luz aeronáutica de superficie de color amarillo está comprendida entre: Límite rojo: $y = 0.328$. Límite blanco $y = 0.790 - 0.66x$. Límite verde: $y = x - 0.120$ (Apéndice 1. Colores de las luces aeronáuticas de superficie y de las señales, letreros y tableros. Anexo 14 de la OACI).



La fuente de luz utilizada en las luces aeronáuticas de superficie empotradas (luminarias) será de tipo LED ya que tiene una mayor vida media, un menor consumo y una mayor estabilidad en el tono del color.

Como síntesis de todo lo anterior indicar que se selecciona la luz de eje de calle de rodaje en tramo curvo como tipo de luz aeronáutica de superficie. Una convergencia

de 17° del haz de luz dirigida a la calzada. Situadas en el borde externo de la señal de arcén a unos 30 centímetros hacia el exterior. La interdistancia entre luces de 15 m en tramos rectos y de 7'5 metros en tramos curvos cuyo radio sea inferior a 400 m, desde una distancia de 60 m anterior y posterior a iniciarse la curva. El color de la luz amarillo-aviación (OACI), con una luminancia de 400 cd en el haz principal y diagrama isocandelas definido por la OACI. Las luces dispuestas en dos circuitos serie alternados, de forma que con el fallo de uno de ellos se mantenga la información de guiado pero con una interdistancia mayor. La alimentación de cada uno de los circuitos serie a través de un regulador de corriente constante CCR con cinco niveles de brillo correspondientes al 100%, 20%, 4%, 0'8% y 0'16% de la luminancia nominal.

Como opción, se puede instalar un sistema de monitorización de fallo de lámpara. Este sistema comprueba el estado de cada luz mediante la medida de continuidad del secundario del transformador de aislamiento, o bien por medio de los sistemas electrónicos incorporados en la propia luz.

3.- Características estandar de las luces de eje de calle de rodaje con lámparas del tipo LED.

- Características físicas:

Modelo 8". Diámetro: 203 mm. Alto: 97 mm. Resalte: 6.35 mm. Peso 4.0 Kg

Modelo 12". Diámetro: 305 mm. Alto: 97 mm. Resalte: 6.35 mm. Peso 7.1 Kg

IP67

- Características eléctricas:

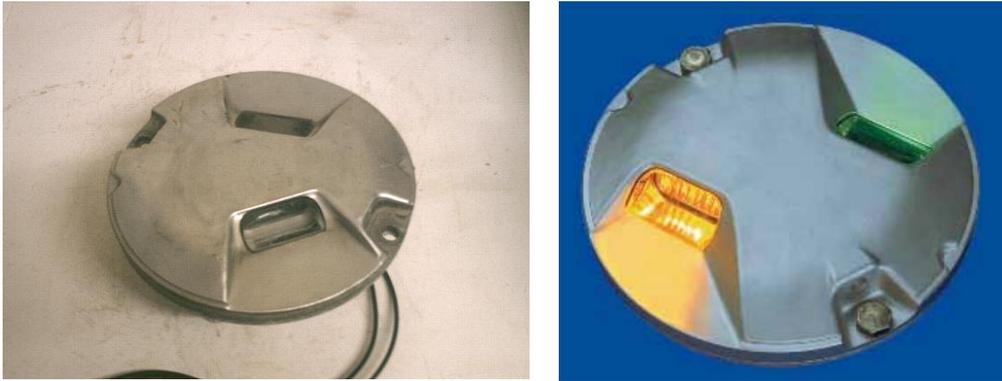
Potencia consumida 9 W a 6.6 A $\pm 3\%$ y frecuencia 50/60 Hz $\pm 7.5\%$. Protección contra descargas atmosféricas según norma ANSI/IEE C62.41.

- Características de funcionamiento:

Temperatura $\pm 55^\circ$ C. Altitud desde el nivel del mar hasta 3.000 m. Humedad relativa, hasta el 100%, condensación. MTBF 56.000 h a 6.6 A.

- Otras características:

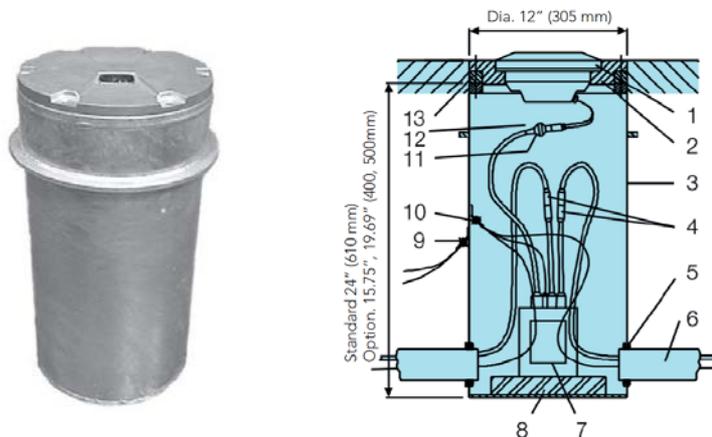
Curvas isocandelas normalizadas por la OACI. Distribución óptima y homogénea de la luz a lo largo del mismo vial. Ausencia de filtros de color. Color saturado, con estabilidad a los diferentes niveles de brillo y ángulos de visión. No es necesario el ajuste óptico después de reemplazar el módulo LED o el prisma. Compatibilidad completa con otros sistemas de luces aeronáuticas de superficie. El tiempo de encendido es bajo, por lo cual se adapta perfectamente a los sistemas de protección por intrusión. Función opcional de supervisión individual de la fuente de luz. La parte superior realizada con precisión en aleación de aluminio fundido a presión. Barreras de estanqueidad adicionales protegen tanto la electrónica como los LEDs en caso de entrada de agua por los prismas o los cables. Prismas de pequeñas dimensiones instalados en un canal óptico de profundidad sin pendiente negativa en la ventana, con protección contra el depósito de goma, arañazos y golpes.



Luces bidireccionales de eje de calle de rodaje en tramo curvo normalizadas.

4.- Propuesta para la instalación de las luces de eje de calle de rodaje.

La instalación se realizará mediante la base FAA L-868, para aplicaciones sujetas a cargas vehiculares pesadas como aviones y otras. Conforme a la norma AC 150/5345-42, de la Federal Aviation Administration. U.S. Department of Transportation. Una instalación típica es la mostrada en las figuras.



1. Luminaria, 2. Anillo adaptador, 3. Base, 4. Conectores circuito primario, 5. Arandela de goma o silicona, 6. Conducto de cables circuito primario, 7. Transformador serie, 8. Espaciador, 9. Terminal de tierra externo, 10. Terminal de tierra interno, 11. Conectores circuito secundario, 12. Terminal de tierra de la luminaria (opcional), 13. Anillo de brida.



Instalación de tubos y bases de luces empotradas aeronáuticas.

Bibliografía:

“Anexo 14 – Aeródromos”. Volumen I – Diseño y operaciones de aeródromos. OACI. 2004.

“Manual de diseño de aeródromos – Parte 4 Ayudas visuales.” Doc 9157 AN/901. OACI. 2004.

“Manual de diseño de aeródromos – Parte 5 Sistemas eléctricos.” Doc 9157 AN/901. OACI. 1983.

“Manual de diseño de aeródromos – Parte 2 Calles de rodaje, plataformas y apartaderos de espera.” Doc 9157 AN/901. OACI. 2005.

“Specification for Airport Light Bases, Transformer Housings, Junction Boxes, and Accessories” Advisory Circular 150/5345-42. Federal Aviation Administration (FAA). U.S. Department of Transportation.

“Specification for Runway and Taxiway Light Fixtures”. Advisory Circular 150/5345-46. Federal Aviation Administration (FAA). U.S. Department of Transportation.

“Design and Installation Details for Airport Visual Aids”. Advisory Circular 150/5340-30. Federal Aviation Administration (FAA). U.S. Department of Transportation.

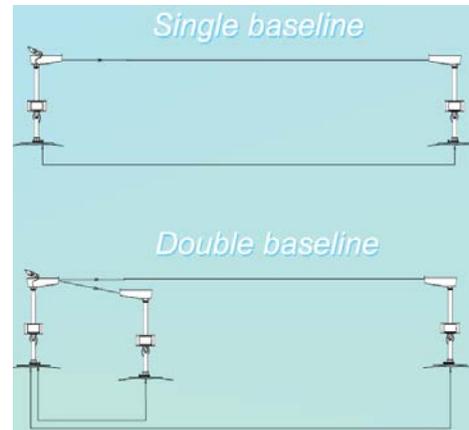
5.- Sistema complementario para el análisis de la visibilidad en tiempo real.

Para establecer un sistema automático de regulación del nivel de brillo de las luces se recomienda la medida automática del RVR frente a la medida del MOR por las diferencias existentes en la forma de evaluación.

La base de medida del RVR corresponde al transmisómetro que se utiliza para medir la transmitancia óptica de atmósfera entre dos puntos. Se define como la fracción de luz incidente que pasa a través de una muestra de atmósfera. Evalúa el coeficiente medio de extinción incluyendo tanto los factores de dispersión como los de absorción.

El equipo consta, normalmente de dos unidades, un emisor que dirige un haz de luz de características luminotécnicas conocidas y un receptor que mide la cantidad de luz que le llega del emisor, situado a una determinada distancia denominada línea base. En otro tipo de instrumentos, se dispone de un emisor y el receptor se encuentran en la misma unidad, pero el haz de luz emitido se refleja en un retroreflector para incidir en el receptor. La longitud efectiva, o línea base, es doble de la distancia entre la unidad emisora-receptora y el reflector. Otros equipos disponen un funcionamiento de

doble línea de base, equipándose con un emisor y dos receptores a distintas distancias.



Transmisómetro con una línea base. Esquema de transmisómetros con doble línea base.

La selección del transmisómetro para un sistema RVR implica conocer los valores de RVR que se vayan a evaluar, ya que esto determina las longitudes óptimas de la línea de base. Para un transmisómetro de doble línea de base y un rango de visibilidad de 10 m a 3.000 m equivalente a un rango RVR de 50 a 3.000 m se utilizan líneas de base de 15 m y una línea de base de 75 m.

El sistema completo utiliza además un sensor de luminancia de fondo. Mide la luminancia del horizonte o del cielo en dirección contraria al Sol. Los umbrales de luminancia se introducen en el cálculo RVR de forma continua o en etapas de dos a cuatro pasos. La curva de conversión de luminancia de fondo a umbral de iluminancia se emplea la curva propuesta por la OACI cuya expresión es:

$\log_{10} E_{th} = 0'05 \times \log_{10}^2 L + 0'573 \times \log_{10} L - 6'667$, siendo L la luminancia del horizonte del cielo. Este sensor consiste en un fotodiodo colocado en el punto focal de una lente con una apertura angular de 10° a 20° , alineado en una dirección norte-sur para evitar la luz directa del Sol, y un ángulo de elevación entre 30° y 45° con respecto al horizonte.



Unidad de transmisómetro con el sensor de luminancia en su parte superior

La situación de uno o varios equipos dependerá de los lugares en los que se presenten los hidrometeoros con más intensidad y regularidad.

Bibliografía:

“Visibility Measurement Technique and its Application in Aviation Services at International Airports in India”. Mali, R.R. Vashistha, R.D. Instruments Division, India Meteorological Department. Pune. 2004.

“Automated Weather Observing Systems (AWOS) for Non-Federal Applications”. Advisory Circular 150/5220-16D. Federal Aviation Administration.

6.- Epílogo.

Los sistemas de señalización luminosa de los bordes de las calzadas mediante luminarias empotradas, es una técnica que se está implantando actualmente en regiones de países en los que se presentan con gran profusión hidrometeoros (nieblas, lluvias, nevadas, etc) de gran intensidad, como por ejemplo en la parte norte de Estados Unidos y en Canadá.



Luz empotrada de señalización de borde de calzada.

La propuesta que se presenta contempla la utilización de elementos luminosos utilizados actualmente en aeropuertos de los que se conoce sus prestaciones y fiabilidad. No es necesario, por tanto, un nuevo diseño del tipo de luz empotrada ni de elementos accesorios de las mismas. La alimentación de las luces, similar a la empleada en los aeropuertos, permite una serie de prestaciones muy interesantes tales como la variación del nivel de brillo o el doble espaciado. Se contempla, además, la instalación de un sistema automático de observación meteorológica AWOS (Automated Weather Observing System) que permite actuar sobre el sistema de luces de forma que adecue el nivel de brillo y el espaciado de las luces al tiempo meteorológico reinante.

No se contempla, en principio, el uso del encendido progresivo de las luces, similar al encendido secuencial de las luces de eje de aproximación en aeropuertos, para que los conductores adapten su velocidad a la progresión de la luz. Esto puede conllevar a una distracción de los conductores y forzar la conducción a unas velocidades posiblemente inusuales para algunos de ellos.