

Guía de iluminación



en túneles e infraestructuras
subterráneas

Madrid Ahorra con Energía

Esta Guía se puede descargar en formato pdf desde la sección de publicaciones de las páginas web:

www.madrid.org

(Consejería de Economía y Hacienda, organización Dirección General de Industria, Energía y Minas)

www.fenercom.com

Si desea recibir ejemplares de esta publicación en formato papel puede contactar con:

Dirección General de Industria, Energía y Minas de la Comunidad de Madrid
dgtecnico@madrid.org
Fundación de la Energía de la Comunidad de Madrid
fundacion@fenercom.com

La Fundación de la Energía de la Comunidad de Madrid, respetuosa con la libertad intelectual de sus colaboradores, reproduce los originales que se le entregan. Tanto la Comunidad de Madrid como la Fundación de la Energía de la Comunidad de Madrid, no se hacen responsables de las opiniones, imágenes, textos y trabajos de los autores ni de las posibles consecuencias que se deriven para las personas físicas o jurídicas que actúen o dejen de actuar de determinada forma como resultado de la información contenida en esta publicación.

Depósito Legal: M-19985-2015

Imprime: BOCM

Prólogo

La tecnología LED: una revolución en la iluminación de los túneles

Es bien sabido que la conducción de vehículos a través de los túneles durante las horas diurnas plantea una problemática totalmente diferente a la conducción al aire libre por la noche, que se concreta fundamentalmente en las diferencias existentes entre los elevados niveles de luminancia exteriores y los bajos niveles de luminancia en el interior de los túneles.

El problema visual fundamental en un túnel es el de la adaptación del ojo humano desde las elevadas luminancias exteriores durante el día, a las bajas luminancias que existen en el interior de los túneles, teniendo además en cuenta que en una determinada distribución de luminancias, puede no llegarse a ver un obstáculo si la luminancia es muy inferior a la de dicha distribución. Todo ello da lugar al conocido "efecto agujero negro" que impide, durante el día, que los conductores vean en el interior del túnel cuando se encuentran a una determinada distancia de la boca de entrada del mismo.

Cualquier especialista en instalaciones auxiliares de los túneles es conocedor de la necesidad de definir, desde el punto de vista luminotécnico, las siguientes zonas: de acceso, de entrada constituida por las zonas de umbral y de transición, del interior y, finalmente, de salida.

Cada zona de un túnel tiene pues unos requisitos propios para el diseño y el rendimiento de la iluminación. Las entradas requieren, por lo general, altos niveles de luz con poco espacio entre luminarias, o incluso sin espacio. Por el contrario, la iluminación del interior del túnel debe ser de nivel bajo, con o sin espacio entre luminarias.

Los túneles carreteros son infraestructuras en las que la iluminación juega un papel fundamental en términos de seguridad y confort, pero también ha tenido hasta hace poco una responsabilidad importante en los gastos de explotación por los elevados consumos de energía eléctrica.

La iluminación mediante LED ha llegado en su desarrollo a un punto álgido, que con independencia de la evolución tecnológica que sufra, permite usarse con toda confianza en numerosas aplicaciones.

La tecnología LED permite diseñar luminarias planas, sólidas y lisas para los túneles, facilitando su uso en esos espacios confinados. Se caracteriza, además, por ser más resistente a las condiciones adversas del entorno, vibraciones y golpes, que las tecnologías convencionales.

Adicionalmente, los LED ofrecen una vida útil larga y predecible, siempre que sean de la calidad adecuada, pudiendo llegar a funcionar correctamente durante miles de horas, hasta llegar a su vida útil.

Los LED facilitan las labores de mantenimiento y las sustituciones, reduciendo así las molestias y los cortes de tráfico.

Por otro lado, la luz blanca de los LED mejora la visibilidad y, en definitiva, la seguridad viaria. En los túneles la luz blanca es mucho más segura para los conductores que el brillo amarillo que aportan las lámparas de sodio. La mayor percepción de luminosidad y mejor reproducción de color facilitan el reconocimiento de los objetos y de las formas.

Con los avances de la tecnología LED no solo se puede conseguir ahorrar energía, sino incluso llegar a un equilibrio mejor que el de la situación actual en términos de economía, seguridad y confort.

Carlos LÓPEZ JIMENO

Director General de Industria, Energía y Minas
Consejería de Economía y Hacienda
Comunidad de Madrid

Autores

DIRECCIÓN

smartLIGHTING

Smartlighting, SL (Editorial)

www.smart-lighting.es

AUTOR

D. Antonio D. Cansinos Bajo

- Ingeniero Superior de Montes-Industrias, Col. 4288.
- Profesor del Departamento de Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras
Universidad Carlos III de Madrid.
- Miembro del Comité de Infraestructuras del IIE y del Comité de Inventiva y Creatividad del IIE.
Instituto de Ingeniería de España.

Capítulo 7. EXPERIENCIA EN MADRID CALLE 30

- M30 Madrid.
www.mc30.es

Capítulo 8. CASOS PRÁCTICOS

8.1. CASO 1: ILUMINACIÓN DEL TÚNEL DEL ALTET (ALICANTE)

- Saludes Lighting
www.industriassaludes.es

8.2. CASO 2: ILUMINACIÓN ENTRADA AL TÚNEL DE LA M40

- Sacopa S.A.U (Ignia Light)
<http://www.ignialight.com/es>

8.3. CASO 3: PASO INFERIOR EN CALLE GRAN VÍA. SABADELL

- Schreder- Socelec

www.schreder.com/ESS-ES

8.4. CASO 4: ALUMBRADO DEL TÚNEL SAN ISIDRO-PRAGA DE LA M30.

- Schreder- Socelec

www.schreder.com/ESS-ES

8.5. CASO 5: INSTALACIÓN DE EMERGENCIA EN EL INTERCAMBIADOR DE AVENIDA AMÉRICA

- Electro Zemper

www.zemper.es/es

8.6. CASO 6: NUEVO ALUMBRADO EN LOS TÚNELES DE SOMOSIERRA

- Philips Ibérica

www.philips.es

8.7. CASO 7: CIUDAD FINANCIERA DEL SANTANDER

- Philips Ibérica

www.philips.es

8.8. OTROS CASOS: REFORMA DEL TÚNEL DE BRUC

- Philips Ibérica

www.philips.es

Índice

Capítulo 1	Introducción	15
Capítulo 2	Conceptos básicos de iluminación	19
2.1.	Ondas	19
2.1.1.	Propiedades de la onda	19
2.1.2.	Incidencia del haz sobre una superficie: Reflexión, refracción y absorción	21
2.1.3.	Cambios de fase	23
2.1.4.	Percepción humana de la luz	24
2.1.5.	Efecto Purkinje	26
2.1.6.	Irradiancia	27
2.1.7.	Iluminancia	27
2.1.8.	Emitancia luminosa	29
2.1.9.	Luminancia	30
2.1.10.	Cantidad de luz	31
2.1.11.	Revelado de contraste	31
2.1.12.	Efecto <i>Flicker</i>	32
2.2.	Conceptos asociados a las lámparas	35
2.2.1.	Temperatura del color	35
2.2.2.	IRC	36
2.2.3.	Vida media y vida útil	37
2.2.4.	Flujo luminoso	39
2.2.5.	Eficacia luminosa	41
2.2.6.	Eficiencia luminosa	42
2.2.7.	Intensidad luminosa	43
2.2.8.	Espectro de emisión	44
2.3.	Tecnologías para la iluminación de túneles: tipología de lámparas	44
2.3.1.	Lámparas incandescentes	45
2.3.2.	Incandescentes halógenas	46
2.3.3.	Lámparas fluorescentes	49
2.3.4.	Fluorescentes compactos (LFC)	54
2.3.5.	Vapor de sodio a alta presión VASP	55
2.3.6.	LED	57
2.3.7.	LED en túneles	58
GUÍA DE ILUMINACIÓN EN TÚNELES E INFRAESTRUCTURAS SUBTERRÁNEAS		7

Capítulo 3	Iluminación de túneles de carreteras y vías urbanas	63
3.1.	Introducción-Generalidades	63
3.1.1.	Tipología de túneles	63
3.2.	Normativa a Cumplir: Reglamentos, normas y recomendaciones	80
3.2.1.	Normativa nacional	80
3.2.2.	Otras guías y recomendaciones de Referencia:	80
3.2.3.	Normativa Europea	81
3.2.4.	Requisitos de Seguridad	82
3.2.5.	Compatibilidad Electromagnética	83
3.2.6.	Componentes de las luminarias	83
3.2.7.	Requerimientos para la redacción de un proyecto de iluminación en túneles	84
3.3.	Diseño de Instalación de Iluminación en túneles	85
3.3.1.	Caracterización de túneles cortos	85
3.3.2.	Caracterización de túneles largos	86
3.3.3.	Estudio en función del tráfico	86
3.3.4.	Estudio en función de la cantidad de tráfico	86
3.3.5.	Estudio en función de la calidad del tráfico	87
3.3.6.	Estudio en función de la configuración del guiado visual	88
3.3.7.	Estudio en función del confort en la conducción	89
3.3.8.	Clasificación de túneles largos según sus exigencias de iluminación	89
3.3.9.	Reglas de cálculo	90
3.3.10.	Sistema a contraflujo	91
3.3.11.	Convenios	92
3.3.12.	Componentes procedentes de las luminarias	92
3.3.13.	Superficie de la calzada	93
3.3.14.	Paredes	95
3.3.15.	Inter-reflexiones	96
3.3.16.	Uniformidad longitudinal en la zona de transición	97
3.3.17.	Cálculo del incremento de umbral	98
3.3.18.	Campos de cálculo	98
3.3.19.	Comprobación del balance de flujo	99
3.4.	Iluminación en túneles largos	100
3.4.1.	Luminancia de la zona de acceso	101
3.4.2.	Método exacto	102
3.4.3.	Método de aproximación	105
3.4.4.	Niveles de iluminación en la zona umbral	106
3.4.5.	Evolución de L_m en la longitud de la zona umbral	107
3.4.6.	Luminancia en la zona de transición	108

3.4.7.	Iluminación de la zona de interior	110
3.4.8.	Iluminación de la zona de salida	111
3.4.9.	Uniformidad en la luminancia sobre la calzada	112
3.4.10.	Limitación del deslumbramiento	113
3.4.11.	Control del efecto <i>Flicker</i>	114
3.4.12.	Alumbrado nocturno	115
3.5.	Iluminación de túneles cortos y pasos inferiores	116
3.5.1.	Cálculos en el proyecto	117
3.5.2.	Determinación del porcentaje de visión a través (LTP)	118
3.5.3.	Aplicación del LTP	120
3.5.4.	Influencia del LTP	122
3.6.	Diagramas guía para túneles cortos	122
3.6.1.	Consideraciones para el diseño	125
3.6.2.	Tipología de alumbrado en túneles cortos	127
3.7.	Alumbrado de emergencia	131
3.8.	Mantenimiento	132
3.9.	Encendidos/apagados	133
3.10.	Alumbrado nocturno en el exterior del túnel	133
3.11.	Guiado visual	133
3.11.1.	Guiado visual para túneles largos	133
3.11.2.	Guiado en la zona de entrada para túneles de clase 1	134
3.11.3.	Guiado visual en la zona interior para túneles de clase 1	134
3.11.4.	Guiado visual para túneles cortos sin sistema de alumbrado	135
3.12.	Soluciones de Iluminación en Túneles: Tecnología LED	135
3.13.	Medidas de ahorro en el alumbrado en túneles	137
3.13.1.	Reducción de los niveles de iluminación en túneles	139
3.13.2.	Reducción durante el día	139
3.13.3.	Túneles inter-urbanos de dos sentidos	141
3.13.4.	Túneles inter-urbanos de un solo sentido	141
3.13.5.	Túneles urbanos	141
3.13.6.	Reducción durante la noche	142
3.13.7.	Otras consideraciones	143
3.13.8.	Ejemplos de mejora de la eficiencia (instalaciones existentes)	143
3.13.9.	Sustitución de componentes de la instalación	144
3.13.10.	Fuentes de luz y los equipos eléctricos auxiliares	144
3.13.11.	Luminarias	147
3.13.12.	Mando de los regímenes de alumbrado	147
3.13.13.	Sistemas de regulación de flujo y consumo de los puntos de luz	147

3.13.14. Organización y mejora de la explotación	148
3.13.15. Análisis económico	149
Capítulo 4 Metro	155
4.1. Introducción	155
4.1.1. Usuarios y trabajadores	160
4.2.1. Normativa nacional	164
4.2.2. Otras guías y recomendaciones de Referencia	165
4.2.3. Normas UNE	165
4.2.4. Normativa Europea	165
4.2.5. Normativa para Luminarias de alumbrado exterior	165
4.2.6. Requisitos de Seguridad	166
4.2.7. Compatibilidad Electromagnética	167
4.2.8. Componentes de las luminarias	167
4.2.9. Certificaciones sobre normativa	168
4.2.10. Otras consideraciones	168
4.3. Soluciones de iluminación para estaciones de metro: tecnología LED	174
4.3.1. Conjunto de instalaciones	178
4.3.1. Iluminación funcional e iluminación integrada	183
4.3.2. Dirección del haz de luz	184
4.3.3. Cuadro de requerimientos técnicos	187
4.3.4. Sistema canalizado	188
4.3.5. Resumen de casos reales	191
Capítulo 5 Intercambiadores de transportes	203
5.1. Introducción	203
5.1.1. Requerimientos lumínicos	206
5.1.2. Alumbrado normal	207
5.1.3. Uniformidad	207
5.1.4. Alumbrado de socorro	207
5.1.5. Alumbrado de emergencia	208
5.1.6. Valor de la eficiencia energética (VEEI)	208
5.1.7. Características eléctricas	208
5.1.8. Tipología de las luminarias	209
5.1.9. Tipología y dotación de la tomas de corriente	211
5.1.10. Zona de mamparas	212
5.1.11. Criterio de cálculo	213
5.1.12. Calidad en la ejecución y en materiales y equipos	213
5.2. Normativa, reglamentación y legalidad	214
5.3. Soluciones en Intercambiadores	223

5.3.1.	Alumbrado general	223
5.3.2.	LED para los sistemas de balizamiento	224
5.3.3.	Alumbrado de emergencia	225
5.3.4.	Sistemas de regulación y control	228
5.3.5.	Contadores digitales	230
5.4.	Casos prácticos	232
5.4.1.	Intercambiadores de Moncloa y Plaza Elíptica	232
Capítulo 6	Experiencia en el Metro de Madrid	235
6.1.	Introducción	235
6.2.	Datos energéticos	238
6.3.	Actuaciones en iluminación	240
6.3.1.	Tubos LED	243
6.3.2.	<i>Driver</i> regulable LED <i>tube</i>	244
6.3.3.	Dongle Zigbee	244
6.3.4.	Sensor de presencia crepuscular	244
6.3.5.	Instalación y programación del sistema	245
6.4.	Modelos de contratación y experiencia de Metro de Madrid en este ámbito	246
Capítulo 7	Experiencia en Madrid Calle 30	251
7.1.	Introducción. Datos generales de Calle 30	251
7.2.	Madrid Calle 30. Datos energéticos y Estrategia de Ahorro	252
7.2.1.	Datos Energéticos. Consumo general e iluminación	253
7.2.2.	Planes de ahorro y actuaciones de Iluminación	254
7.3.	Actuaciones de Iluminación en Madrid Calle 30	256
7.3.1.	Histórico de actuaciones hasta la actualidad. Instalación actual	256
Capítulo 8	Casos prácticos	275
8.1.	Caso 1: iluminación del túnel del Altet (Alicante)	276
8.1.1.	Introducción	276
8.1.2.	Características de la instalación	276
8.1.3.	Solución adoptada	280
8.1.4.	Luminarias seleccionadas	281
8.1.5.	Beneficios y resultados obtenidos	284
8.1.6.	Impacto energético	285
8.1.7.	Impacto económico	286
8.1.8.	Conclusiones	287
8.1.9.	Agradecimientos	288

8.2.	Caso 2: iluminación entrada al túnel de la M40	289
8.2.1.	Introducción	289
8.2.2.	Características de la instalación	289
8.2.3.	Solución adoptada	292
8.2.4.	Beneficios y resultados obtenidos	293
8.2.5.	Conclusiones	295
8.2.6.	Agradecimientos	295
8.3.	Caso 3: Paso inferior en calle Gran Vía. Sabadell	296
8.3.1.	Introducción	296
8.3.2.	Características de la instalación	297
8.3.3.	Solución adoptada	297
8.3.4.	Luminarias empleadas	298
8.3.5.	Beneficios y resultados obtenidos	300
8.3.6.	Conclusiones	302
8.4.	Caso 4: alumbrado del túnel San Isidro-Praga de la M30	304
8.4.1.	Introducción	304
8.4.2.	Características de la instalación	305
8.4.3.	Solución adoptada	307
8.4.4.	Iluminación permanente o nocturna	310
8.4.5.	Iluminación de refuerzo	314
8.4.6.	Descripción de las luminarias empleadas	316
8.4.7.	Alumbrado base	317
8.4.8.	Iluminación de refuerzo	320
8.5.	Caso 5: instalación de emergencia en el Intercambiador de Avenida América	327
8.5.1.	Introducción	327
8.5.2.	Características de la instalación	327
8.5.3.	Solución adoptada	327
8.5.4.	Beneficios y resultados obtenidos	330
8.5.5.	Conclusiones	330
8.6.	Caso 6: Nuevo Alumbrado en los túneles de Somosierra	331
8.6.1.	Introducción	331
8.6.2.	Características de la instalación	332
8.6.3.	Solución adoptada	332
8.6.4.	Resultados y beneficios obtenidos	333
8.6.5.	Agradecimientos	334
8.7.	Caso 7: Ciudad financiera del Santander.	334
8.7.1.	Introducción	335
8.7.2.	Solución	336
8.7.3.	Conclusión	337

8.7.4.	Agradecimientos	337
8.8.	Otros casos: Reforma del túnel de Bruc. (Fuente: Philips Ibérica)	338
8.8.1.	Introducción	338
8.8.2.	Modernización de los sistemas de control, regulación y supervisión	340
8.8.3.	Resultados en horario nocturno	342
8.8.4.	Coste de la instalación. Amortización	342
8.8.5.	Conclusiones	342

Esta guía es un acercamiento a la iluminación eficiente en espacios de tránsito de vehículos y tráfico mixto en espacios enterrados como: túneles de carretera, ferroviarios, de ferrocarriles metropolitanos, pasos inferiores de autopista y auto-vías, etcétera.

No sólo se trata de una guía LED sino de las costumbres, usos y necesidades de los beneficiarios de los servicios que la iluminación presta en el ámbito de aplicación de este documento. Así se deduce de la inclusión de apartados sobre la percepción fisiológica de la luz por el ojo humano y las diferentes interpretaciones que, de la realidad, se derivan de aquella. Se estudian los efectos negativos que sobre la comodidad visual y la seguridad de los conductores o usuarios producen las variaciones de luminosidad.

Se parte de los conceptos básicos de iluminación, del tratamiento que de éstos reciben de la Física clásica se han ido deduciendo las cualidades lumínicas de las fuentes de luz en compatibilidad con la visión humana. La intensidad del haz de luz, la cantidad de ésta que incide sobre una superficie, la potencia aprovechada para iluminar, y otras características fundamentales se ajustan al conocimiento técnico básico requerido para afrontar los casos de planteamiento de la mejor solución en cualquier proyecto de iluminación.

Aunque los espacios a los que se destina esta guía históricamente han sido volúmenes en los que la iluminación se ha estudiado y en las últimas décadas incluso se han zonificado técnicamente para alcanzar las garantías requeridas en términos de seguridad y confortabilidad de los desplazamientos, la llegada de la iluminación LED de calidad supone una revolución en este ámbito. Las particularidades de cada uno de estos espacios (autovías, andenes de metro, dársenas de intercambiadores, etc.) y la definición de sus áreas técnicas siguen siendo válidas, sin embargo las luminarias que se han venido empleando hasta la actualidad, que resultan eficaces, no son energéticamente eficientes.



Figura 1.1. Túnel con iluminación LED en Bosnia-Herzegovina. Fuente: Schröder.

En túneles de carretera las lámparas de vapor de sodio, en las infraestructuras de metro los fluorescentes, focos halógenos, etcétera están cayendo en desuso ante la implantación de la tecnología LED que proporciona un ahorro directo de más de un 50% respecto a otras de bajo consumo y otros indirectos por los sistemas integrados de control y regulación, que ponen de su parte incluso un 10-15% más. Las mejoras no sólo se dan en términos de ahorro energético, sino que son notables en la calidad lumínica como luminancia, iluminancia, rendimiento de color, temperatura de color, homogeneidad, uniformidad y orientación del haz, etcétera.

En su relativamente corta vida la tecnología LED ha ganado mucho terreno en todo tipo de aplicaciones, no solo por sus altas capacidades lumínicas y su calidad de servicio, también por su adaptabilidad. Casos como las instalaciones de *metropolitano* donde la solución de canalización de la iluminación ha venido dando unos resultados muy aceptables limitaban el papel del LED hasta la mejora técnica de los tubos LED, que en poco tiempo se harán principales fuentes de luz en estaciones, andenes, pasillos, zonas comerciales, vestíbulos e incluso depósitos.



Figura 1.2. Estación del Metro de Barcelona Línea 5. Fuente: Lledó SA.

Los intercambiadores de transportes son todo un reto para los sistemas de iluminación. En estas infraestructuras se gestionan espacios de rodadura para autobuses, estaciones de metro y sus accesos, vestíbulos, cuartos de instrumentación, taquillas, etcétera. Cada área con sus exigencias y calificaciones lumínicas.

A diferencia de la mayoría de las instalaciones de metropolitano en la mayoría de los intercambiadores los vestíbulos presentan una importante penetración de la luz diurna, cuestión a tratar convenientemente.

Los túneles de carretera gozan de un espacio de lujo en esta guía, en parte porque las deducciones técnicas que se derivan de su estudio resultan de interés extensible a la práctica totalidad del resto de casos y, también, porque, a diferencia de los intercambiadores y las instalaciones de metropolitano, los usuarios que conducen sus vehículos privados no están trabajando, sus comportamientos son mucho más impredecibles, los diseños y comportamientos de sus máquinas más variables y, en consecuencia, existe un mayor riesgo para la seguridad vial. Ésta se basa, en carretera, en la distancia de seguridad (o de frenado), que a su vez es dependiente de la velocidad de diseño de la vía, la cual resulta más complicada de determinar cuanto mayor es la variabilidad cuantitativa del tráfico, más intereses privados se den en el mismo y más tipologías de vehículos se encuentren en el tramo (pesados, ligeros, bicicletas, etc.).

Se ha contado con la participación de un buen número de organizaciones y entidades, algunas de las cuales han aportado sus experiencias a favor de su conocimiento y para que sirva de impulso a nuevas actuaciones con objetivos fijados en la eficiencia energética y la integración ambiental de los sistemas de iluminación en túneles y vías soterradas y sus instalaciones anejas. Se reservan capítulos específicos para las experiencias en el Metro de Madrid y la autovía de circunvalación M30, también en la Capital, y se consultan brevemente actuaciones como la iluminación del túnel del Bruc (Barcelona), el paso subterráneo de la Calle Gran Vía (Sabadell), el túnel del Altet (Alicante), túneles de la M40 y M30, intercambiador de Avenida de América y el proyecto de Iluminación de la Ciudad Financiera del Santander.

El autor agradece la documentación aportada para el desarrollo de cada caso así como la atención prestada por los equipos de Philips, Schreder-Socelec, Saludes, IgniaLight, Lledo, ElectroZemper, Ministerio de Fomento, Iberpistas, Metro Madrid, Calle M30, Consorcio de Transporte de Madrid, así como a todos los que, de una u otra manera han colaborado en este volumen.

2.1. Ondas

Las ondas presentan la particularidad de trasladar la energía hasta un lugar sin necesidad de que la masa alcance ese mismo punto. Genéticamente se trata de intervalos energéticos que se repiten periódicamente y que presentan un claro crecimiento, un evidente decrecimiento y, por lo tanto, una máximo y un mínimo. Tomando un eje central la onda desciende tanto como asciende, de modo que el tramo de descenso es la imagen especular del de ascenso (y viceversa), aunque desplazado en el tiempo.

En el caso que se trata el interés se centra en el espectro electromagnético y, más en concreto, en su intervalo visible. En la figura adjunta se muestra el espectro electromagnético completo, destacando la zona del visible, entre los 380 y 760 nm aproximadamente en términos de longitud de onda.

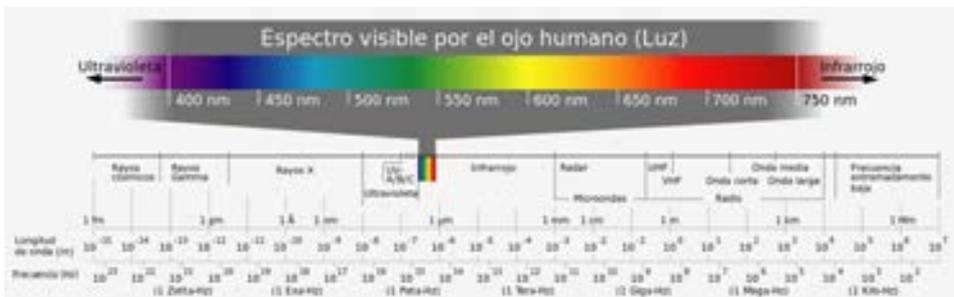


Figura 2.1. Espectro visible. Fuente: Wikipedia.

2.1.1. Propiedades de la onda

Las propiedades de una onda se descubren preguntándose a cómo puede representarse el fenómeno ondulatorio en el papel. Se sabe que es periódico, por

lo que solo se hace necesario uno de esos periodos y su duración en el tiempo. Después se repite hasta que la onda se agota, llegado el caso. Así, las propiedades básicas de una onda son:

- Periodo ondulatorio: es el tiempo que dura [t]. Las unidades más utilizadas son los segundos y sus divisoras (s, ms, etc.). Se nota por "T".
- Elongación de la onda: existe una serie de elongaciones para cada onda definida, ya que se trata de la distancia desde cualquier punto de la línea de onda hasta el eje de desarrollo temporal de la misma [L]. Las unidades más empleadas son el metro y sus divisoras (m, cm,...). No es un parámetro muy empleado, pero puede notarse por "a", "e" ó "l".
- Amplitud de onda: es la elongación máxima, es decir, la distancia desde el eje hasta el máximo inferior (valle) o superior (cresta). También se trata de una longitud. Se representa por "A".
- Frecuencia ondulatoria: tomado un tiempo predeterminado (en el SI, un segundo) se cuentan los periodos de la onda que caben en ese tiempo. Matemáticamente es la inversa directa del periodo. Mayor cantidad de energía se traduce directamente en un número de ciclo más alto en el mismo tiempo, es decir, en una mayor frecuencia ondulatoria. La referencia alfanumérica física para las ecuaciones es "f".

$$f = \frac{1}{T}$$

donde f , es la frecuencia y T es el periodo ondulatorio.

- Longitud de onda: es la distancia recorrida entre dos crestas (o dos puntos análogos) de dos periodos consecutivos de onda [L]. Las unidades de medida más empleadas son los metros y sus divisiones (m, cm, mm, etc.). Se representa por " λ ".
- Velocidad de onda: los ejes cartesianos sobre los que se representa una onda son el tiempo en abscisas y la longitud en ordenadas, esto es, una comparación espacio temporal, lo que da idea directa de la velocidad. La velocidad de una onda se representa por " v ", como cualquier otra velocidad; sin embargo, cuando se refiere a la velocidad de la luz, como en el caso de los estudios de iluminación como el que aquí se de-

sarrolla se emplea la letra “c”. Una vez conocido el tipo de onda queda definida es sabido el descenso de la longitud de onda con el aumento de la frecuencia y viceversa. La velocidad de una onda determina la proporción inversa entre la frecuencia y la longitud de onda.

$$f \cdot \lambda = c$$

donde, f es la frecuencia; c , la velocidad de la luz y λ es el periodo ondulatorio.

Se ilustran las propiedades fundamentales de una onda.

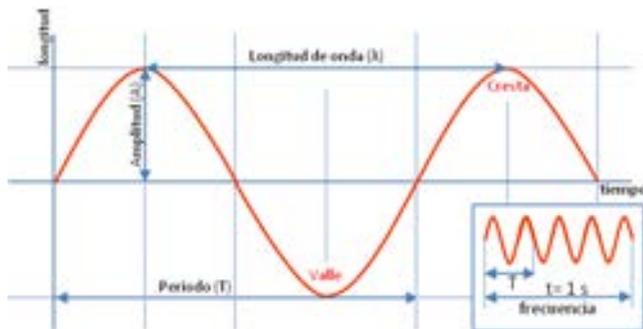
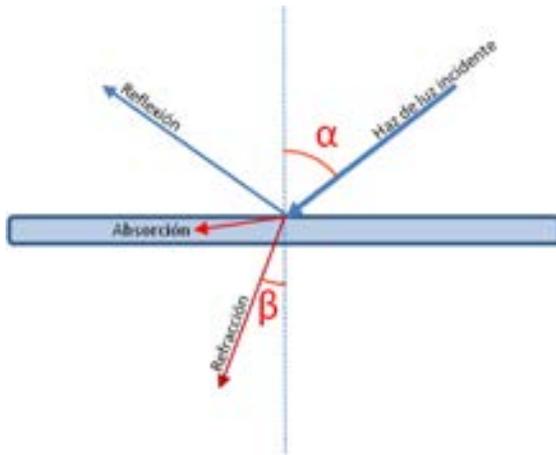


Figura 2.2. Propiedades de una onda.

2.1.2. Incidencia del haz sobre una superficie: Reflexión, refracción y absorción

Cuando un haz ondulatorio incide sobre una superficie, la Física define que pueden ocurrir únicamente tres fenómenos: penetra en el material, lo traspasa o rebota en él. La penetración en el material es conocida como absorción; la refracción es la denominación del proceso de traspaso de la superficie; y, por último, la reflexión es aplicable a la porción del haz que rebota. Queda ejemplificado en el gráfico adjunto.



Del análisis del gráfico deriva la expresión:

$$\frac{\text{sen } \alpha}{\text{sen } \beta} = \frac{n_1}{n_2}$$

donde se definen los índices de comportamiento de la luz incidente en una superficie: n_1 es el índice de refracción del aire (ambiente por el que discurre el haz hasta incidir en la superficie del material) y n_2 el de la superficie.

Si se le da un valor cien al haz incidente, se pueden expresar la reflexión, absorción y refracción en tanto por ciento (%); por supuesto, el total debe sumar cien. Las propiedades del material sobre el que incide la luz, unidas con las de la luz (tipo haz incidente en este caso), determinan cuantitativamente el reparto mencionado.

La reflexión estudiada es pura y se da a la velocidad de la luz, es decir, casi inmediatamente cuando incide el haz; alguna parte de la luz puede ser reflejada de una manera diferida en el tiempo. La reflexión que se produce en el instante de incidencia del haz es denominada reflexión especular; difusa es la que se refleja, causa de un fenómeno de diseminación de rayos. El dominio de una u otra es función de la heterogeneidad óptica de los materiales que conforman la superficie de incidencia y a su rugosidad. Menores rugosidades (superficies lisas) y mayor homogeneidad óptica significan un dominio claro de la porción especular sobre la difusa. Puede encontrarse un conjunto de difusa y especular difícilmente

diferenciable, caso en el que se agrupan en la llamada reflexión compuesta. Por fin la reflexión puede diferenciarse en especular pura, difusa pura y compuesta.

La absorción de la luz define el color de los mismos. El color de los objetos es, precisamente, el único que no absorben. Por ejemplo un color verde absorbe todos los colores menos una parte de amarillo y otra de azul, la mezcla de ellos define la percepción verde del objeto.

Fenómenos como la llamada fluorescencia miden la capacidad de determinados materiales de emitir de nuevo la luz que anteriormente han sido capaces de absorber. En el proceso, como en todos los naturales, hay una pérdida de energía: la frecuencia de la luz emitida es menor que la de la luz absorbida, por lo que los colores no pueden coincidir exactamente.

Un fenómeno similar es la fosforescencia, semejante a la fluorescencia, pero propia de materiales con capacidad de retener energía electromagnética durante un tiempo apreciable.

2.1.3. Cambios de fase

Las superficies iridiscentes proporcionan diferentes tonos cromáticos en función del ángulo de incidencia de la luz sobre ellas. Materiales que poseen esta propiedad son: el aceite o el jabón (más notable en las pompas, que por su configuración esférica permiten simultáneamente una variación continua de los ángulos de incidencia); más naturales, por ejemplo las alas de algunas mariposas. El fenómeno es causado por la coexistencia de múltiples reflexiones de la luz en múltiples superficies semi-transparentes. Se juntan dos o más ondas, cuya interferencia modula la energía resultante, esto es, la frecuencia perceptible. Más técnicamente se trata de cambios de fase.

Varias ondas superpuestas están en fase cuando una se confunde con la otra; cuando se diferencian claramente comparándolas en tiempos equivalentes se dice que están desfasadas. Este desfase puede darse en términos temporales, espaciales o mixtos, en cuyo caso habla de un desfase en ángulo.

Cuando dos ondas sin desfase alguno se suman se produce una interferencia constructiva. Si existe el máximo de desfase (fases contrarias), en la suma se produce la interferencia destructiva. Si coincide la frecuencia de las ondas superpuestas (sumadas) la interferencia resultante es directamente la suma (constructiva) o resta (destructiva) de las amplitudes de onda.

La difracción es el fenómeno que se produce por distorsión de una onda cuando incide sobre un objeto con dimensiones comparables a la longitud de onda. Técnicamente es una clase dentro de las interferencias.

2.1.4. Percepción humana de la luz

La percepción de la luz por los humanos se realiza a través del ojo, órgano que capta información que debe transmitir al cerebro por medio del nervio óptico. Este órgano no es capaz de percibir todas las longitudes de onda y las que percibe, no con la misma intensidad. Por un lado se llama espectro visible a la horquilla de valores de longitudes de onda que sí es capaz de captar el ojo humano y, por otra, las diferentes intensidades (brillos) con los que se percibe cada color (longitud de onda) se representan en una línea denominada curva de sensibilidad del ojo humano, que se muestra a continuación.

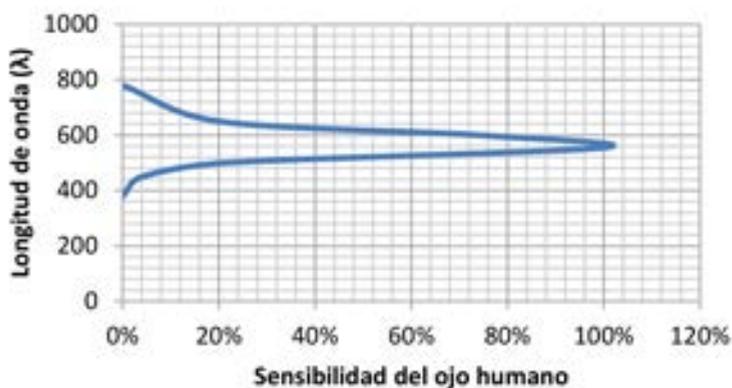


Figura 2.3. Sensibilidad del ojo humano. Fuente: autor.

Se comprueba que hay un máximo de apreciación para un color verde-amarillo a unos 555 nm de longitud de onda y que la sensibilidad desciende bruscamente tanto cuando la frecuencia aumenta como cuando presenta la tendencia contraria. La secuencia no es simétrica, pero sí cuasi-simétrica.

La actividad del ojo en contacto con el cerebro resulta esencial para:

- Gestionar la información visual cuantitativa y cualitativa.

- Percepción de movimiento y otros cambios físicos en el entorno.
- La creación de impresiones espaciales, que en el caso que se trata es función de la operación conjunta y disposición relativa de los órganos (ojos).
- La percepción de señales visuales.

Todas y cada una de las actividades oculares que registra el cerebro y que han sido citadas resultan de interés para el correcto manejo de los vehículos por las vías públicas y, por supuesto, por los túneles que en ellas se encuentran.

Como se aprecia en la ilustración adjunta el nervio óptico se dispone en la parte trasera del globo ocular, lo que permite que recoja la información completa registrada por el ojo.

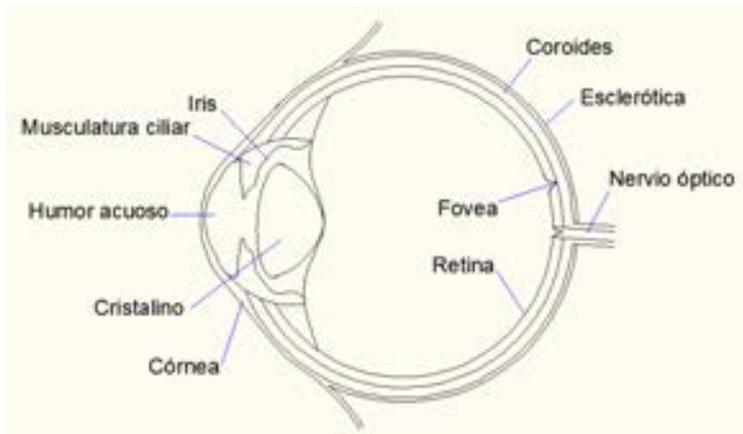


Figura 2.4. Esquema sobre la anatomía del ojo humano.

El sistema de percepción visual requiere periodos de adaptación y acomodación, en las diferentes calidades en que aquella puede darse. En referencia a lo cual se definen términos como:

- Agudeza visual, que se define como la capacidad de percibir y discriminar detalles y calidades de objetos pequeños.
- Adaptación visual, que describe el proceso de adaptación del ojo a distintos niveles de luminosidad. Es más rápida de niveles de iluminación bajos a altos que en el sentido opuesto.

- Acomodación visual, definida como la capacidad del ojo para enfocar a diferentes distancias.

Para un máximo confort visual deben hacerse compatibles los valores más ventajosos de los términos definidos. En la circulación con vehículos por vías públicas en general y por sus túneles, en particular, las sinergias efectivas de los mismos se convierten en una cuestión de seguridad vial, que a todos afecta.

El confort visual es un modo de describir el equilibrio de una amplia gama de parámetros. El mayor desequilibrio se identifica con los deslumbramientos.

Cualquier actividad humana y, especialmente, las laborales y las que afectan a la seguridad pública como la conducción, se ve gravemente perjudicada por una iluminación deficiente. Se perciben señales con dificultad lo que supone un esfuerzo extraordinario para el sistema ocular. En el extremo se ve afectado el sistema nervioso central por la participación en el proceso del nervio óptico. Pueden forzarse posturas poco naturales que provoquen dolores y molestias musculares, etcétera. Si a todo lo anterior se agrega el cansancio asociado a la adaptación a la luz artificial (mayor cuanto más diferencia con la luz natural), el riesgo de accidente aumenta exponencialmente con una iluminación con deficiencias o poco estudiada técnicamente, ya en fase de proyecto, de ejecución y puesta en servicio o de mantenimiento.

2.1.5. Efecto Purkinje

Se da durante el periodo nocturno. El ojo humano se adapta a la situación y los brillos aparecen diferentes. A una pérdida de luminosidad la retina reacciona reduciendo su sensibilidad a altas longitudes de onda (las que corresponden a los colores amarillo, rojo y sus mezclas), lo que compensa con una sensibilidad creciente a las altas frecuencias (que se corresponden con los colores verde, azul y violeta). En consecuencia, mientras que en condiciones de buena iluminación el color que el humano aprecia con más brillo es el rojo, cuando no hay luz suficiente el color más brillante es el azul.

La retina se ha conformado con dos células receptoras diferentes: conos, más sensibles a la luz amarilla, y bastones, menos especializados, que se dedican a la percepción de la luz en general. En ausencia de luz suficiente los bastones son más competentes por inhibición fisiológica de los conos.

Con alta luminosidad el ojo humano reacciona con la llamada visión fotópica, en ella los conos alcanzan su mayor actividad y los colores se aprecian en su poder verdadero. Con menor luminosidad se da la visión escotópica en la que los bastones sustituyen a los conos. La alternativa, que se adapta a los ciclos naturales diarios, permite que la retina dé descanso a sus células diariamente y por partes, lo que debería traducirse en un incremento positivo de su vida útil.

La retina no presenta adaptaciones correctas a visiones intermedias entre las descritas, de ahí que al atardecer y al anochecer el ojo humano esté en situación de desventaja frente a iluminaciones más extremas. La adaptación natural de la retina en esos casos se reduce a esperar lo que por experiencia sabe que ocurrirá: amanecerá o anochecerá.

2.1.6. Irradiancia

Se denomina así al reparto de la potencia de una radiación electromagnética incidente sobre una superficie. Matemáticamente se expresa:

$$R = \frac{P}{A}$$

donde, R es la irradiancia de la radiación electromagnética [W/m²]; P, es la potencia incidente de esa onda [W]; y A, el área sobre la que ésta incide [m²].

2.1.7. Iluminancia

Reza en DRAE¹ que la iluminancia es, en Física, la magnitud que expresa el flujo luminoso que incide sobre la unidad de superficie. Su unidad en el Sistema Internacional es el lux². Se trata de una forma de repartir el flujo luminoso en una determinada superficie. Dado que las unidades del flujo luminoso son los lúmenes y las de superficie los metros cuadrados (en el SI²), un lux puede definirse como la proporción uno a uno entre las dos magnitudes consideradas, es decir:

¹ Diccionario de la Real Academia de La Lengua Española.

² Sistema Internacional, relativo a las unidades de las magnitudes físicas.

$$1lux = \frac{1lm}{1m^2}$$

Y la magnitud física se apoya en la ecuación matemática:

$$E_v = \frac{d\phi}{dS}$$

donde, E_v es la iluminancia; y el cociente mostrado $d\phi / dS$ mide la variación del flujo luminoso en la superficie afectada por la luz emitida por la fuente considerada.

En una definición más técnica la iluminancia se puede referir a la curva de sensibilidad del ojo humano y a partir de la irradiancia espectral, según:

$$E_v = k \cdot \int_{visible} E(\lambda) \cdot V(\lambda) \cdot d\lambda$$

donde, k es una constante de proporcionalidad; $E(\lambda)$, es la irradiancia espectral, función de la longitud de onda; y $V(\lambda)$, es la función de la curva de sensibilidad del ojo humano, también función de la longitud de onda.

En la medida de la iluminancia se pueden encontrar otras unidades de medida como los *foot-candle* ($fc = \text{pie-candela}$) empleada en entornos anglosajones. Si se da el caso de tener que trabajar con esta unidad debe conocerse la transformación:

$$1 fc = 10lux$$

El concepto básico de iluminancia aparece cuando se piensa en superficies iluminadas que son perpendiculares al haz de luz. En este caso se aprecia con claridad la relación llamada de inversa de los cuadrados, según la cual la magnitud medida desciende en proporción al cuadrado de la distancia del foco a la superficie iluminada.

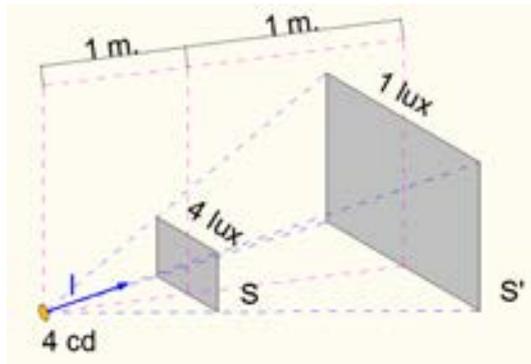


Figura 2.5. Definición de lux.

El cálculo de la iluminancia en un caso cualquiera, en el que no existe relación de ortogonalidad entre la superficie iluminada y el haz de luz, no puede asumirse con la relación inversa del cuadrado de la distancia. Se resuelve por descomposición ortogonal (vectorial) de la dirección del flujo luminoso. El caso de ortogonalidad anteriormente expuesto es solo un caso particular de este general, en concreto aquel en el que $\alpha = 0$, según la ilustración adjunta.

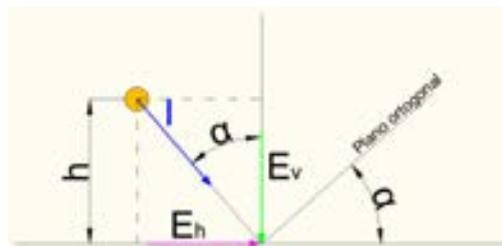


Figura 2.6. Iluminancia.

Por relaciones geométricas se puede expresar la iluminancia en función de la altura a la que se dispone la fuente, medida desde la superficie de referencia.

2.1.8. Emitancia luminosa

Es una magnitud relacionada con el concepto de iluminancia, concretamente es la iluminancia que surge de una determinada superficie, es decir, la iluminancia referida a la superficie emisora y no a la receptora.

Matemáticamente se relaciona según la expresión:

$$M_v = \frac{d\phi}{dS_e}$$

donde, M_v es la emitancia luminosa; y el cociente mostrado mide, en cada instante, la variación del flujo luminoso en función de la superficie que emite luz.

2.1.9. Luminancia

Luminancia es un término relativo a la luz que llega al ojo. Es el reparto de la intensidad luminosa disponible entre la superficie aparente que aprecia el órgano visual dedicado en la dirección de observación. Así, sus unidades han de ser las candelas, por la intensidad luminosa, y los metros cuadrados, por la superficie observada. Se expresa matemáticamente como:

$$L = \frac{I}{S_{aparente}}$$

donde, L es la luminancia en cd/m^2 ; I , es la intensidad luminosa en candelas (cd); y $S_{aparente}$ es la superficie aparente que percibe el ojo que observa en una determinada dirección.

Se encuentran otras unidades fuera del SI³ como el nit (nt) o el stilb (sb), que se refieren a:

$$1nt = \frac{1cd}{1m^2} \quad y \quad 1sb = \frac{1cd}{1cm^2}$$

La superficie aparente es la proyección de la superficie afectada de la dirección perpendicular de observación, por tanto su cálculo se realiza desde aquella contando con el coseno del ángulo de proyección. Se muestra la relación matemática y una ilustración aclaratoria:

³ Sistema Internacional.

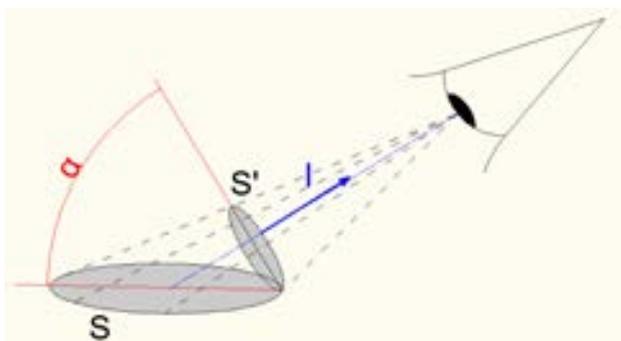


Figura 2.7. Superficie aparente.

La importancia de la luminancia radica en que es esto lo que percibe el ojo humano y no la iluminancia.

2.1.10. Cantidad de luz

La cantidad de luz es una magnitud empleada, fundamentalmente, para la comparación de fuentes de emisión de flujo luminoso. Se mide en lúmenes por segundo y responde a la expresión matemática:

$$Q = \phi.t$$

donde, Q es la cantidad de luz [lm.s]; ϕ , es el flujo luminoso; y t es el tiempo.

2.1.11. Revelado de contraste

Es función del sistema de iluminación empleado en la vía: a contraflujo⁴ o simétrico. Se representa por un coeficiente comparativo de la luminancia de la superficie de la calzada con la iluminancia media sobre una superficie vertical ortogonal al eje del túnel, orientada a su boca de entrada. Matemáticamente:

⁴ Existe el sistema a favor de flujo en la clasificación, pero no tiene aplicación práctica en el alumbrado de vías públicas para vehículos a motor, por lo que no se considera.

$$q_c = \frac{L}{E_v}$$

donde, q_c es el coeficiente de revelado de contraste; L [cd/m^2] y E_v [lux], las luminancia e iluminancia citadas.

E_v se puede definir también como la iluminancia vertical del obstáculo a nivel de la calzada en la dirección de la circulación de vehículos.

2.1.12. Efecto *Flicker*

El efecto de tal nombre es común cuando coinciden una parte fija y otra móvil, una de las cuales está iluminada. Ocurriría, por ejemplo, si el observador se mantiene parado en el centro de una habitación que gira con iluminancias diferentes en cada una de sus paredes. La sensación subjetiva es equivalente a la de parpadeo de la luz. Técnicamente se corresponde con las variaciones cíclicas o periódicas de la iluminancia en el campo de visión.

En los túneles la iluminancia se calcula por zonas y queda fija en el espacio del mismo (paredes, techo, etc.). Al paso del vehículo resulta inevitable, en mayor o menor intensidad, el efecto *Flicker*.

Las variables que determinan el efecto son:

- La frecuencia de parpadeo. Coincidente con el número de cambios de iluminancias por segundo.
- Ciclo o tiempo completo de exposición al parpadeo.
- Periodo de variación de claro a oscuro.
- La profundidad de modulación de la iluminancia. Definida por la relación pico-valle o luz máxima-oscuridad máxima en cada periodo.

La frecuencia del efecto *sensu stricto*, el ciclo y el periodo resultan función de la velocidad del vehículo y de la separación entre iluminancias estáticas; la profundidad de modulación, sin embargo, depende de las características fotométricas, además.

* Cálculo del efecto

El efecto de parpadeo se asemeja a una onda en su percepción subjetiva, que es la que aquí interesa, de ahí que se haya estudiado en términos de ciclos, periodos y frecuencias. En sí mismo se mide como una frecuencia, es decir en ciclos por segundo, segundos elevados a menos uno y hercios. El cálculo físico que se propone es:

$$F_{ck} = \frac{v}{d}$$

Donde F_{ck} es la frecuencia equivalente del efecto [Hz]; v , es la velocidad de la parte móvil, en el caso de los túneles sería la que lleva el vehículo que los atraviesan [m/s]; d , es la distancia entre luminarias.

* Ejemplo de cálculo

Un camión circula por el tramo central de un túnel al límite de la velocidad permitida (80 km/h). En las paredes del tubo que configura el túnel se han dispuesto, en línea, luminarias separadas 3,5 metros. En estas condiciones el efecto de parpadeo resulta:

$$F_{ck} = \frac{22,22 \text{ m/s}}{3,5 \text{ m}} = 6,35 \text{ s}^{-1} = 6,35 \text{ Hz}$$

El valor obtenido se encuentra incluido en la horquilla de percepción del efecto de parpadeo, por lo que pudiera convenir variar las condiciones de diseño hasta obtener los hercios que garanticen una reducción del Flicker hasta que se haga no perceptible. Operando para mínimos, una de las soluciones pudiera ser la disminución de la velocidad máxima en el túnel hasta alcanzar los 2,5 Hz, por tanto:

$$F_{ck} = \frac{v}{s} \rightarrow 2,5 \text{ Hz} = \frac{v}{3,5 \text{ m}} \rightarrow v = 2,5 \cdot 3,5 = 8,75 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Solución inviable para un túnel que forma parte de una carretera general. Si se alejan las luminarias hasta los 4 metros el efecto quedará en:

$$F_{ck} = \frac{v}{s} \rightarrow 2,5 \text{ Hz} = \frac{22,22 \text{ m/s}}{d} \rightarrow d = \frac{22,22 \text{ m/s}}{2,5 \text{ Hz}} = 8,88 \text{ m}$$

Esta distancia probablemente es inconveniente, aunque depende del tipo de lámpara y su disposición. La recomendación para el caso propuesto es disminuir la velocidad en una parte, hasta un valor asumible en una vía del tipo en la que está incluido el túnel y, además, modificar convenientemente la distancia entre luminarias. Por ejemplo, se propone reducir la velocidad máxima a 60 km/h (16,67 m/s), lo que obligará a una distancia de separación entre luminarias que se deriva del cálculo adjunto.

$$F_{ck} = \frac{v}{s} \rightarrow 2,5 \text{ Hz} = \frac{16,67 \text{ m/s}}{d} \rightarrow d = \frac{16,67 \text{ m/s}}{2,5 \text{ Hz}} = 6,67 \text{ m}$$

Se concluye que, para evitar el efecto de parpadeo en el túnel del ejemplo, es recomendable bajar la velocidad máxima de los vehículos a 60 km/h y alejar las lámparas hasta casi doblar la de partida (de 3,5 a 6,67 metros). Por supuesto habría que ajustar ahora los abanicos de iluminación y otras variables hasta garantizar la correcta iluminancia en toda la vía estudiada (túnel).

* Recomendaciones para la disminución del efecto

El periodo de cambio de claro a oscuro se reduce drásticamente en un túnel cuando la distancia entre los extremos de las luminarias adyacentes es inferior a la longitud de una sola luminaria. Atendiendo a esta consideración de diseño el parpadeo resulta despreciable, dado que el receptor subjetivo no aprecia discontinuidades en una línea de luz que, para él, es continua.

El *Flicker* es apreciable por encima de los 15 Hz y por debajo de los 2,5 Hz, por tanto una solución de diseño aplicable consiste en evitar valores dentro de estos parámetros. Como las variables útiles de cálculo (véase apartado de cálculo del Efecto *Flicker*) son la velocidad del tráfico y la separación entre luminarias, se evi-

dencia que el adecuado control sobre sus valores operacionales determinará la intensidad del efecto de parpadeo, incluso hasta alcanzar los márgenes de trabajo donde resulta inapreciable.

2.2. Conceptos asociados a las lámparas

2.2.1. Temperatura del color

El término deriva de la idea de medir el color que emite un cuerpo en términos referidos a la energía cinética media de sus partículas, es decir, asociándolo al concepto que la Física Clásica propone de temperatura. La radiación del cuerpo es función de su temperatura según la Ley de *Stefan Boltzman*, en la que su importancia resulta cuatro veces más importante geoméricamente que la del resto de variables y parámetros participantes:

$$E = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4$$

donde, ε es la emisividad del cuerpo; σ , es la constante de *Stefan-Boltzman*, de valor

$$5,67 \cdot 10^{-8} \frac{W}{m^2 \cdot K^4};$$

T, llamada temperatura efectiva, es la temperatura absoluta de la superficie del cuerpo que irradia energía; y, por último, E es la potencia emisiva térmica total, medida en W/m^2 ,

La emisividad se mide en tanto por uno, de manera que $0 < \varepsilon < 1$. Se trata de un término que se introduce en la expresión de *Stefan-Boltzman*, construida en principio para el cuerpo negro, para adaptarla al cuerpo real. Por tanto, se trata de una medida de cuánto se acerca la superficie estudiada a la de un cuerpo negro que estuviera a la misma temperatura. Se deduce que el cuerpo negro sería el de la mayor emisividad posible.

La parte de esa radiación que se corresponde con el espectro del visible da luz visible, por tanto las de mayor energía se acercarán al azul y las de menor al rojo.

En función del color que emite un cuerpo se habla de iluminación fría, la de mayor frecuencia (más azul), o cálida, de mayor longitud de onda (más roja).

Cuando se estudia la temperatura de un determinado cuerpo y se asocia al color de la radiación por éste emitida, experimentalmente se obtienen resultados como los que se muestran en el gráfico adjunto.

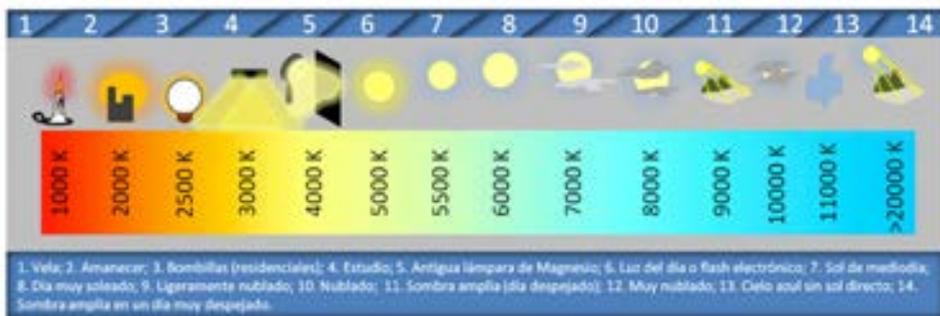


Figura 2.9. Temperatura del color.

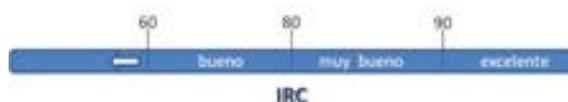
En un LED la temperatura del color tiene que ver, íntimamente, con el espesor de la capa de material fosforado que recubre el diodo. Estos materiales son amarillentos, claros cuando finos y tornando en ocre al crecer en grosor. En el primero de los casos la luz será fría (alta temperatura) y en el segundo, cálida (baja temperatura).

2.2.2. IRC

Son las siglas que se corresponden con el Índice de Reproducción Cromática, concepto relacionado con la calidad en iluminación. Se establece una escala porcentual en la que se le concede el 100 a la luz natural, de este modo se entiende que cuanto más cercano a 100 es el IRC más naturales de apreciar los colores y la luz parece menos artificial.

Las lámparas LED de calidad ofrecen entre un 85 y un 95 de IRC. Las lámparas con las que se consigue un mejor índice son, precisamente, las que presentan una menor eficiencia: halógenas e incandescentes. Aunque es deseable el mayor IRC posible, un 80 es suficiente para la mayoría de las aplicaciones.

Tabla 2.1. IRC diferentes lámparas.



Lámpara	IRC
Incandescentes	100
Halógenas	100
Fluorescentes	65-85
Bajo consumo	15-85
VPSB	0
VSAP	0-70
Vapor de mercurio	25-60
Halogenuro metálico	65-90
Inducción	79
LED	65-90

2.2.3. Vida media y vida útil

Se interpreta como la media estadística de la vida útil de una lámpara según su uso. Resulta complicado, por su propia definición, determinar la vida media de una lámpara, ya que para ello deberían manejarse datos suficientes sobre cada tipo de puesta en servicio.

El periodo de medición de la vida útil comienza cuando la lámpara se pone en servicio y concluye cuando la cantidad de luz queda en un 70% de la nominal. Un seguimiento de la vida útil permite descubrir su no linealidad.

Haciendo referencia a la vida útil, que responde a las pruebas normativas que cada fabricante realiza sobre sus lámparas, las tecnologías LED ofrecen vidas útiles de unas 50.000 horas⁵, frente a otras, como las halógenas que rondan las 2.000 horas.

⁵ Aunque algunos fabricantes ofrecen datos de hasta el doble, la cifra ofrecida está más contrastada que algunas mayores.

Los parámetros que influyen en la vida útil de una lámpara son: la temperatura, la intensidad, la calidad de los elementos constitutivos y defectos asociados.

La temperatura en servicio de la lámpara resulta esencial para alcanzar vidas medias destacables. En todas las lámparas resulta fundamental la temperatura ambiente, pero además en algunas tipologías ganan importancia también las temperaturas internas del sistema que compone la lámpara. En el caso de las tecnologías LED la temperatura la unión puede resultar crítica: valores de ésta muy elevados pueden suponer reducir la vida útil más de la mitad⁶. Para el control de este parámetro crítico se disponen disipadores de calor en la zona trasera de la lámpara LED, de su correcto diseño depende, en gran medida, que la unidad alcance la vida útil esperada.

Intensidades luminosas por encima de las de diseño recomendadas por el fabricante reducen sensiblemente la vida útil, aparte de afectar a la eficiencia luminosa del sistema. Trabajar con lámparas que disponen de un sistema electrónico de control de la intensidad garantiza una influencia negativa menor de este aspecto.

Las pruebas realizadas en laboratorio por normativa se realizan en condiciones óptimas, cuestión imposible en una aplicación real, en especial en túneles, en los que la temperatura ambiente es muy variable estacionalmente (más en túneles cortos) y donde los niveles de contaminación del aire son superiores al exterior.

La calidad de los materiales con los que se construye una lámpara es esencial. En LED se traduce en una máxima exigencia en la pureza de los semiconductores empleados en su configuración. Los semiconductores de mayor calidad se destinan a los equipos electrónicos de más alta tecnología, aunque entre ellos podrían considerarse las lámparas LED, en éstas se montan semiconductores de alta pureza, no tanto como en equipos electrónicos robóticos y otros, como la refrigeración de ordenadores de alta capacidad, etcétera. La calidad escogida es suficiente; sin embargo, ésta resulta una de las más claras diferencias entre los LED de calidad y el resto.

Entre los defectos asociados destaca la calidad de las soldaduras, que son uno de los motivos fundamentales de que una lámpara LED deje de funcionar.

⁶ Actualmente ha habido grandes avances en este aspecto y aumentos de la temperatura de unión no conllevan descensos de la vida útil tan significativos.

Siempre que se mantenga un control sobre la calidad de la lámpara y se tengan en cuenta las circunstancias específicas de la puesta en servicio de cada elemento, las vidas útiles pueden acercarse a las que indica el fabricante.

Una lámpara LED se conforma con varios emisores LED unidos para tal efecto. La vida útil de la unidad se reduce al aumentar el número de componentes LED individuales, razón derivada de que cada una de ellas va fallando individualmente y tanto la vida media como la útil se refieren al conjunto. Estos fallos individuales se pueden comprobar estadísticamente en laboratorio, donde se concluye que existe una evidente dispersión entre los datos si se considera la vida útil o media de cada uno de los LED que forman la lámpara. A mayor dispersión de estos datos, mayor resulta la reducción de la vida útil general.

2.2.4. Flujo luminoso

Bajo esta denominación se esconde la parte de la potencia radiante total emitida por una fuente de luz que es capaz de estimular la vista (visible). La franja del espectro que es visible se encuentra entre los 400 y los 700 nm de longitud de onda.

Como referencia se indica que en las comercialmente extintas lámparas incandescentes sólo un 10% de la energía radiante se emite en el visible (es flujo luminoso).

El flujo luminoso pudiera haberse medido en vatios; sin embargo, esto no hubiera tenido sentido puesto que la respuesta sensitiva del ojo humano no es proporcional linealmente la potencia requerida para la iluminación, sino que resulta función de la longitud de onda⁷ (o de la frecuencia, dado que es su inversa relativa a la velocidad de la luz). Se hace necesario definir una unidad de flujo que tenga sentido asociada la sensibilidad de los órganos visuales humanos: el lumen.

La razón del lumen deriva de la dependencia de los humanos de percibir diferentes colores con la misma brillantez, cuestión que se soluciona tomando un patrón para lo que se refiere al concepto de ángulo sólido.

Un ángulo sólido, medido en estereorradianes (sr), parte de la definición de ángulo plano en radianes (rad). En la zona izquierda de la ilustración se muestra

⁷ Véase gráfico en el apartado dedicado a "eficiencia luminosa".

el ángulo plano (θ) y a su derecha el concepto trasladado al volumen: ángulo sólido (Ω).

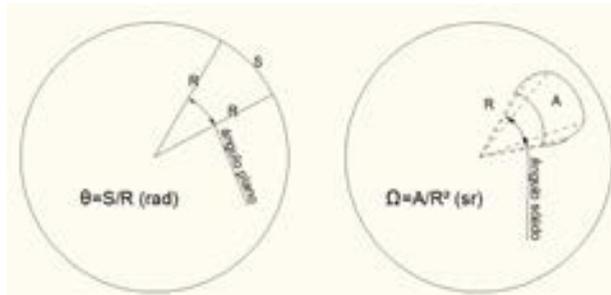


Figura 2.10. Flujo luminoso.

En una esfera completa hay 4π estereorradianes (sr), dato derivado de que el radián se definió sobre la circunferencia que contiene 2π radianes (rad).

Ejemplo: determinese el ángulo sólido que corresponde con una esfera de 6 metros de radio y un área descrita de 2,5 metros cuadrados en su superficie.

Solución:

$$\Omega = \frac{A}{R^2} = \frac{2,5}{6^2} = 0,0694 \text{ sr}$$

El ángulo sólido es requerido para la definición formal de lumen, la unidad de flujo luminoso. Un lumen (lm) es la cantidad de potencia radiante visible (flujo luminoso) emitido desde una abertura de $1/60 \text{ cm}^2$ de una fuente patrón e incluido dentro de un ángulo sólido de 1 estereorradián (sr).

El patrón clásico definido es un recipiente hueco que se mantiene a la temperatura de solidificación del platino ($\sim 1773 \text{ }^\circ\text{C}$); sin embargo, este sistema se ha ido sustituyendo primero por lámparas incandescentes y más tarde por otras tecnologías, que en todos los casos se calibran previamente por comparación.

Relacionándolo directamente con la curva de sensibilidad del ojo humano un lumen se define como la equivalencia a $1/680 \text{ W}$ de luz verde de 555 nm como valor de longitud de onda.

Ejemplo: Una fuente de luz monocromática con longitud de onda 500 nm alcanza una potencia visible de 14 W, indíquese su flujo luminoso.

Solución: si la luz fuera la verde de 555 nm, la expresión válida sería:

$$\theta = 680 \cdot 14 = 9520 \text{ lm}$$

Observando la curva de sensibilidad del ojo humano⁸, los 500 nm son aproximadamente un 21% de los 555 nm, por lo que puede calcularse:

$$\theta = 0,21 \cdot 680 \cdot 14 = 1999,2 \text{ lm}$$

En laboratorio es muy común determinar el flujo luminoso de una lámpara iluminando una superficie conocida.

El valor más deseable de flujo luminoso aparece en los fluorescentes de descarga. Ahora bien, ese máximo se corresponde con una determinada temperatura, que es la de ensayo del fabricante y al que responden los datos ofrecidos por el mismo sobre esa lámpara. El alejamiento de esa temperatura supone una disminución importante en el flujo luminoso. Este efecto no tiene lugar en las tecnologías LED, ya que está directamente relacionado con la cantidad de átomos de mercurio y el movimiento de éstos dentro del tubo. El flujo luminoso en las LED se mantiene muy poco variable en sus márgenes de temperatura de funcionamiento.

La temperatura del color también influye en el flujo luminoso. El aumento de la temperatura del color, se traduce en un mayor flujo luminoso en una lámpara LED.

2.2.5. Eficacia luminosa

Concepto que resulta del reparto matemático del flujo luminoso emitido por la fuente luminosa entre la potencia consumida. Habitualmente se expresa en lúmenes por vatio (lm/W).

De la tabla expuesta se deduce que la mayor eficacia luminosa se corresponde con las LED y que eso se apoya en su menor consumo de potencia eléctrica.

⁸ Véase gráfico en el apartado dedicado a "eficiencia luminosa".

Cuadro 2.2. Potencia consumida según flujo luminoso.

	Potencia consumida			
	LED	Incandescentes	Halógenas	CFL* y fluorescentes
50/80	1,3	10	-	-
110/120	3,5	15	10	5
250/440	5	25	20	7
550/650	9	40	35	9
650/800	11	60	50	11
800/1500	15	75	70	18
1500/1800	18	100	100	20
2500/2800	25	150	150	30
2600/2800	30	200	200	40

* Fluorescentes compactas.

Tal y como se define, la eficacia luminosa resulta el rendimiento de la fuente luminica, es decir, cuánto aprovecha realmente de la potencia que consume de la red eléctrica a la que se conecta. Es la razón por la que se suele representar matemáticamente por la letra η , dando lugar a la expresión:

$$\eta = \frac{\phi}{P}$$

Donde, ϕ es el flujo lumínico de la fuente y P es la potencia eléctrica consumida para producir luz visible.

2.2.6. Eficiencia luminosa

Es un término relativo a la eficacia de la radiación, concediendo el valor máximo al tope de relación posible en la Naturaleza. La escala se establece en porcentaje, de manera que el máximo es 100.

La eficacia de la radiación (κ) se calcula como la parte del flujo radiante que es convertido en flujo luminoso, según la expresión:

$$k = \frac{\phi}{f}$$

Donde ϕ , es el flujo luminoso y f es el flujo radiante.

En la Naturaleza el valor de κ está limitado a 683 para una luz visible verde con longitud de onda de 555 nm. La eficiencia luminosa se calcula dándole valor 100 en la escala a esos 683, de manera que resulta un porcentaje. La referencia mostrada no es caprichosa, se apoya en la curva de sensibilidad del ojo humano, que presenta una punta muy destacada en esa longitud de onda. La sensibilidad desciende bruscamente tanto para longitudes de onda mayores como para menores y, además, lo hace de manera simétrica respecto al máximo de referencia.

Otra forma de calcular la eficiencia es la comparación de la eficacia radiante con la eficacia luminosa (visible) en las mismas unidades, de manera que se obtiene un índice adimensional.

La diferencia fundamental entre la eficiencia y la eficacia es precisamente que la eficiencia es un porcentaje, por tanto adimensional, toda vez que la eficacia es un número expresado el lúmenes por unidad de potencia eléctrica consumida.

2.2.7. Intensidad luminosa

Es un parámetro fundamental útil para valorar la distribución del flujo luminoso en cada dirección del espacio. Una definición posible sería: flujo luminoso que se da en una dirección concreta el espacio.

La intensidad luminosa se mide en candelas. Cuando un haz de luz se concentra mucho en una determinada dirección tendrá una alta intensidad luminosa, por otra parte, cuanto más se disperse el haz de luz, menos candelas le corresponderán. Los efectos de reflexión aprovechan estas cualidades ya que orientan la luz en una determinada dirección.

La candela (cd) se define como la intensidad luminosa, en una dirección dada de una fuente que emite una radiación monocromática de frecuencia

540.10¹² Hz y cuya intensidad energética en esa dirección es de 1/683 Watt por estereorradián⁹.

2.2.8. Espectro de emisión

El espectro de emisión de una lámpara es la horquilla de frecuencias del espectro electromagnético en el que su tecnología le permite emitir. En términos de longitud de onda indica los colores que ese tipo de luz permite apreciar; en relación a la frecuencia, sus niveles energéticos.

En la ilustración siguiente se muestran los espectros de emisión de una lámpara VSAP, fluorescente (con IRC 55) y una VSBP.

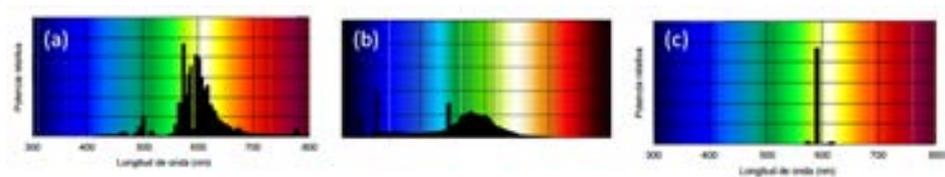


Figura 2.12. Espectros de emisión de tres lámparas.

La pureza espectral de una lámpara, más en la tecnología LED, debe cumplir las máximas exigencias en las aplicaciones electrónicas con fines de comunicación óptica; sin embargo, la amplitud espectral gana terreno a la pureza cuando se trata de dispositivos con aplicaciones de visualizado, se hace importante la brillantez del color en semáforos, luces traseras de los automóviles, resto de vehículos autorizados en la vía y otros, como las pantallas de información en carretera.

2.3. Tecnologías para la iluminación de túneles: tipología de lámparas

En el apartado que aquí se desarrolla se han tratado únicamente las lámparas que pueden tener presencia, de algún tipo, en las infraestructuras de estudio. A

⁹ 16ª Conferencia General de Pesas y Medidas, 1979. Esta cantidad es equivalente a la que en 1948, en la Conferencia General de Pesas y Medidas, se definió como una sexagésima parte de la luz emitida por un centímetro cuadrado de platino puro en estado sólido a la temperatura de su punto de fusión (2046 K).

ellas se ha agregado la extinta lámpara incandescente como elemento comparativo con la menor eficiencia.

2.3.1. Lámparas incandescentes

Este tipo de lámparas es el que más se ha empleado históricamente en el Globo desde su primera comercialización hasta finales del siglo XX. En la actualidad ni se usan ni se comercializan por su baja eficiencia. Su principio de funcionamiento pasa por el calentamiento de un filamento metálico de alta resistencia eléctrica hasta que éste emite la radiación que irradia la luz aprovechable. Se consume mucha potencia para generar pocos lúmenes.

La primera amenaza seria para las lámparas incandescentes fue la aparición de lámparas fluorescentes compactas de tamaños comparables y disponibles en una variedad de formas muy competitiva.

* Anatomía

Una lámpara incandescente estaba formada por:



Figura 2.13. Esquema de una lámpara incandescente.

- **Bulbo:** es lo que daba forma reconocible a las lámparas. Se construía en vidrio, en la mayoría de los casos están hechos de sodio-cálcico o vidrio blando y en otros casos, en los que deben soportar altas temperaturas, se usa sílice o sílice puro fundido (cuarzo). En ocasiones se les aplicaba una capa de polvo para provocar una cierta difusión de luz o se coloreaban para conseguir luces de color filtrado.

- **Casquillo:** se fabricaban dos tipos de casquillos, conocidos como de rosca y bayoneta respectivamente, empleándose este último en lámparas tipo proyector.
- **Filamento:** la temperatura del filamento determina la cantidad de luz visible que emite la lámpara en relación directa. Solamente resulta emitida en el visible una pequeña parte de la radiación que sale de la lámpara. Si se quiere configurar una lámpara incandescente que sea más eficiente hay que emplear un material con un punto de fusión muy alto en el filamento. La baja presión de vapor del tungsteno y su alto punto de fusión (más de 3.300 °C) fueron sus credenciales para su empleo en este tipo de lámparas. El trabajo en servicio cerca de la temperatura de fusión supone mayor emisión en el visible pero también una mayor evaporación del metal cuando éste está en vacío. El material del filamento evaporado se transfiere ya sea a las partes adyacentes al filamento o al soporte de la estructura, o puede difundirse a través del gas y luego transportarse por las corrientes convectivas. El mismo se condensa sobre todo en la superficie del bulbo formando una capa metálica que incrementa a través de la vida y absorbe cada vez más la radiación emitida, reduciendo así su eficacia. La pérdida de energía a través del gas que rodea al filamento es proporcional a la longitud del filamento e inversamente proporcional al diámetro, esta pérdida se reduce si al filamento se le da una forma de espiral con un diámetro de 2 a 6 veces el diámetro del alambre. El uso de filamentos doblemente enrollados junto a un gas inerte mejora notablemente la eficacia de estas lámparas.
- **Gas de relleno:** dado que uno de los problemas para la denominada "bombilla" era la evaporación del filamento cuando éste estaba en vacío, incluirlo en un entorno que redujera ese efecto se aplicó como posible solución. Para ello se usan gases inertes teniendo en cuenta sus características no-reactivas con las partes internas de la lámpara. Normalmente consiste en una mezcla de argón y nitrógeno, cuya proporción depende de la aplicación a que se destina y de la tensión nominal.

2.3.2. Incandescentes halógenas

Se trata de una evolución de las tecnologías incandescentes hacia una mejora de su eficacia-vida. Se emplearon los elementos halógenos de la tabla periódica (F, Cl, Br y Yodo). Históricamente se empleó mucho el yodo, que después se fue cambiando por el bromo como halógeno más empleado. En estas condicio-

nes El vapor de tungsteno se combina con el halógeno para formar bromuro de tungsteno (WBr_2), el cual permanece en estado gaseoso en vez de depositarse en las paredes de la ampolla. Cuando una molécula de bromuro de tungsteno se acerca al filamento caliente se descompone en Tungsteno (W) y 2Br, dando lugar a que el tungsteno se re-deposite sobre el filamento, reiniciándose el ciclo.

Se requieren temperatura altas para mantener la actividad del ciclo del halógeno (por encima de los 250 °C) para lo que se fabricaban ampollas pequeñas. La solución es construir la ampolla en un material tan resistente como el cuarzo, lo que aumenta notablemente su vida útil, pero también su coste.

Uno de los efectos directos de estas lámparas es una mayor emisión en el UV que las incandescentes tradicionales. Temperaturas del color por arriba de 3100K, dado que la radiación emitida tanto en el ultravioleta como en las bajas longitudes de onda del visible aumenta con la temperatura creando una fuente potencial de daño.

* Características de funcionamiento

A) Cromáticas

El espectro emitido por una lámpara incandescente es continuo (Fig. 2.14). El índice de reproducción de color es de 100, por definición.

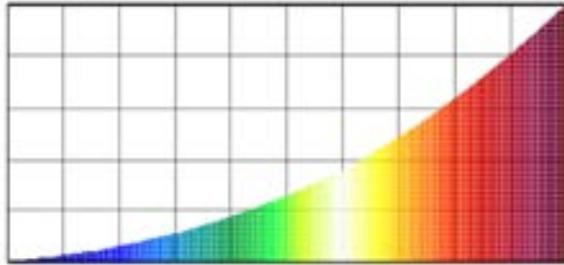


Figura 2.14. Espectro de emisión de lámpara incandescente.

B) Vida, eficacia y depreciación del flujo luminoso

Una lámpara incandescente halógena posee una eficacia luminosa entre 17 a 25 lm/W, como consecuencia de la mayor temperatura a que trabaja el filamento, frente a una convencional de 12 a 15 lm/W.

La disipación térmica es uno de los motivos de fallo de este tipo de lámparas, aunque el más típico era la rotura del filamento (lo que se llama "fundido" de la bombilla).

C) Desviaciones de la tensión nominal de red

Se trata con el estudio de curvas típicas de variación % de la potencia (en W), vida (en horas), eficacia (lm/W) y flujo luminoso (en lm) para una lámpara incandescente convencional con la variación % de la tensión (en V), como la que se muestra en la Fig. 2.15.

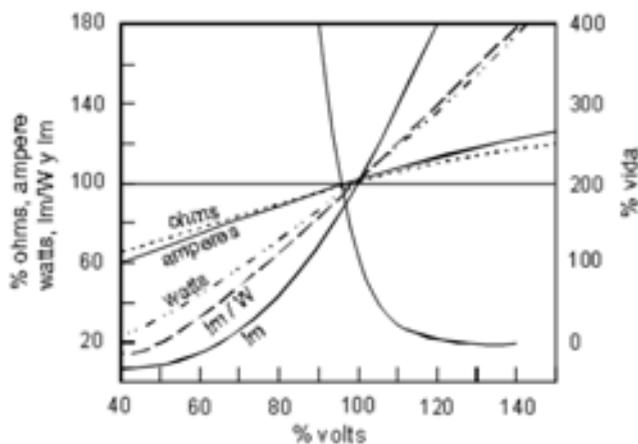


Figura 2.15. Desviaciones de la tensión nominal de red.

La relación más importante de éstas es la dependencia de la vida: a medida que la variación de la tensión aumenta la vida disminuye exponencialmente.

D) Aplicaciones

Sólo se las recomiendan para locales de poco uso o de alta intermitencia de uso, por ejemplo en sótanos, garajes, baños y placares residenciales. No se aconsejan para iluminación donde sea necesario altos niveles de iluminancia o de uso prolongado.

En su contra un muy alto coste de operación, corta vida (1.000 horas) y su baja eficacia. A su favor su color cálido de luz, su reducido peso, dimensiones y, particu-

larmente por su bajo costo inicial, además de que no necesitan equipos auxiliares para funcionar.

En el caso de la tecnología halógena resultan especialmente útiles para la iluminación de acento y en aquellos lugares donde se requieren lámparas de pequeño tamaño.

2.3.3. Lámparas fluorescentes

Presentan gran variedad de formas y tamaños disponibles, la flexibilidad en sus propiedades de reproducción de color, el buen desempeño en términos de conversión de potencia eléctrica en luz, la emisión de luz difusa y la comparativamente baja luminancia que presentan, hacen de esta lámpara una fuente de luz adecuada para numerosas aplicaciones.

Este tipo de lámparas son una variedad de las de descarga de gases a baja presión. El bulbo es un tubo de descarga de mercurio con un recubrimiento de una sustancia fluorescente (en polvo) que juega el papel de convertidor de radiación UV en visible, un par de electrodos sellados herméticamente en los extremos del tubo y los casquillos que proporcionan la adecuada conexión eléctrica a la fuente de suministro de energía.

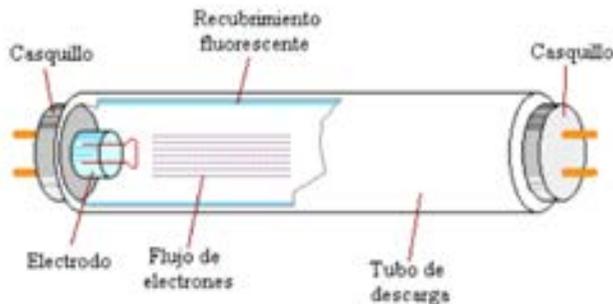


Figura 2.16. Esquema de un tubo fluorescente.

La descarga eléctrica de mercurio emite más de un 60% en radiación UV-C, sólo alrededor del 3% de la descarga es radiación visible, de ahí que se requiera la capa fluorescente para la transformación en espectro visible. La luz resultante es de un tono azulado pálido, lo que resulta de la mezcla de longitudes de onda

emitidas (405 nm —violeta—, 436 nm —azul—, 546 nm —verde— y 577 nm —amarillo—). La cantidad de radiación producida en las dos líneas de UV depende principalmente de: la presión de vapor del mercurio, el gas auxiliar, la densidad de corriente, las dimensiones del tubo de descarga.

* Componentes

- **Bulbo:** en los tubos fluorescentes se diferencian por un código alfanumérico de dos dígitos o tres dígitos, el primero una letra y el segundo un número. La letra de la designación indica la forma del bulbo. En este caso, T por "tubular"; también puede ser C por "circular" o U indicando que el bulbo ha sido doblado sobre sí mismo. Los números son indicación del diámetro del tubo T4 (porque su diámetro equivale a 4/8 de pulgada) y 54 mm (2,125 pulgadas) designados T17.
- **Electrodos:** nace ya como cátodos "fríos" o cátodos "calientes". Altos valores de tensión catódica (unos 50 V) son el destino de los primeros, que funcionarán con intensidades del orden de poco cientos de mili-amperios. En los de cátodo caliente durante la operación de la lámpara el electrodo alcanza una temperatura de alrededor de 1.100 °C. En este punto, la combinación alambre/recubrimiento emite grandes cantidades de electrones para una caída de tensión catódica relativamente baja, entre 10 y 12 V.
- **Gas de relleno:** La presión del mercurio se mantiene aproximadamente a 1.07 Pa, valor que corresponde a la presión de vapor del mercurio líquido a 40 °C. Además del mercurio, el bulbo contiene un gas o una mezcla de gases inertes a baja presión (entre 100 y 400 Pa) para facilitar el encendido de la descarga. Las lámparas fluorescentes convencionales emplean argón o una mezcla de argón, neón y xenón.
- **Polvos (fósforos):** la primera vez que se recubrió internamente un tubo de descarga de este tipo fue en 1935 y lo firmó General Electric. El fósforo empleado es responsable del color emitido y de la cantidad de visible que se produce. A los fosfatos, aluminatos, boratos y silicatos se les agrega premeditadamente una adecuada proporción de iones activadores. Se expone una tabla con los polvos más empleados históricamente y las longitudes de onda que corresponden.

Tabla 2.3. Polvos fluorescentes tipo.

Polvos fluorescentes típicos		
Tipo	Compuesto	Color
Haluros	Halo fosfato de calcio	Bianco (480nm, 580nm)
Trifósforos	óxido de itrio + trifósforo de europio	Rojo-naranja (611nm)
	aluminato de magnesio, cesio y terbio	Verde (543 nm)
	fosfato de lantano + fosfuro de cesio y terbio	Verde (544 nm)
	borato de magnesio y gadolinio + fosfuro de cesio y terbio	Verde (545nm)
	aluminato de magnesio y bario + fosfuro de europio	Azul (450nm)
	Cloroapatita de estroncio + fosfuro de europio	Azul (447nm)
Alta gama	Estroncio verde, azul	Verdoso (480nm, 560nm)
	Estroncio rojo	Rojizo (630nm)

Las mejoras logradas con los trifósforos activados con tierras raras bajo condiciones de altas densidades de corriente de la descarga permitieron el desarrollo de las fluorescentes compactas.

* Eficacia luminosa

A medida que se incrementa el diámetro del tubo de descarga crece la eficacia de la lámpara hasta alcanzar un máximo, más allá del cual comienza a decrecer. La longitud del tubo también influye sobre la eficacia, de modo que cuanto mayor es la longitud, más alta es la eficacia.

Una lámpara de este tipo sin la capa fluorescente presentaría una tasa de 5 lm/W. Los fósforos actuales permiten elevar este valor hasta 100 lm/W.

* Color

El color emitido por la lámpara depende del fósforo utilizado. Los fluorescentes no emiten en la longitud de onda de la máxima sensibilidad humana porque se trata de un color inaceptable en iluminación.

Según el CIE las lámparas fluorescentes emiten colores desde blanco cálido (3.000 K), blanco (3.500 K), blanco frío (4.200 K) y luz día (6.500 K). Se establece, además, una clasificación de las lámparas, agrupándolas en distintos grados de reproducción cromática, a partir de la sugerida por la CIE: desde el 1A (con índice de reproducción de color $>90^\circ$), 1B (80 a 90), 2A (70 a 79), 2B (60 a 69), 3 (40 a 59) y 4 (20 a 39).

En la Fig. 2.17 se aprecia el espectro emitido por este tipo de lámparas, en la zona superior de la ilustración se muestra un elemento con índice de rendimiento del color 55 y en la inferior otro con 72.

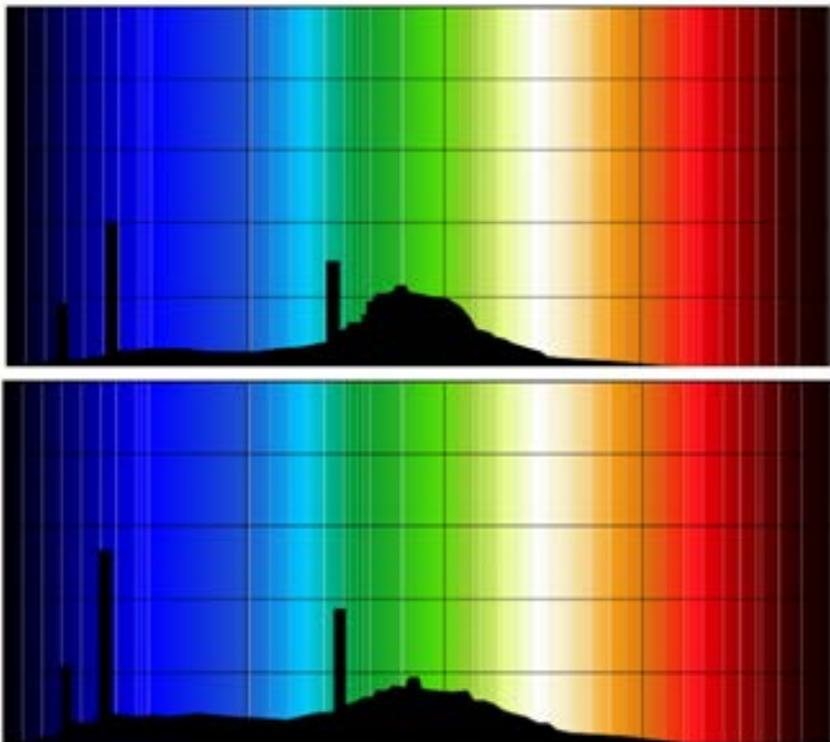


Figura 2.17. Espectro de emisión de lámparas fluorescentes (55 y 72 IRC).

En general, cuando aumenta la temperatura, el color de la luz se desplaza hacia el verde azulado debido a que la propia des carga en el mercurio incrementa en forma considerable su contribución en la región visible del espectro.

La vida de los fluorescentes de cátodo caliente está íntimamente relacionada con su número de encendidos. En los casos que se tratan en esta guía se procede a muy pocos encendidos en función del número de horas de servicio, de manera que se pueden obtener muy buenas cifras al respecto. Las de cátodo frío prácticamente no sufren con la variación de la frecuencia de encendido.

El flujo luminoso de la lámpara fluorescente decrece con el tiempo acumulado de operación, debido a la degradación fotoquímica, tanto de los fósforos del recubrimiento interno como del vidrio que forma el bulbo, y a la creciente deposición de elementos absorbentes de luz sobre el cuerpo de la lámpara.

* **Influencia de la temperatura**

La presión del mercurio dentro del tubo es función de la temperatura de servicio y, por tanto, es clave en el funcionamiento correcto del tubo. El vapor en exceso (por encima de lo que determina la presión de vapor para la correspondiente temperatura) tenderá a condensarse en el punto más frío de la lámpara. Si algún punto dentro del bulbo está significativamente más frío que el resto, todo el mercurio líquido tiene mayor probabilidad de concentrarse allí.

Las altas temperaturas ambiente no solamente disminuye el flujo luminoso de las lámparas fluorescentes, sino además pueden cambiar sus características eléctricas y ponerlas fuera de los rangos de diseño del balasto, lo que permitiría un mayor flujo de corriente que afectaría de manera negativa la vida de la lámpara.

A medida que la temperatura de operación se incrementa, aumentan tanto el flujo luminoso de la lámpara como su consumo de potencia. Sin embargo, esta potencia empieza gradualmente a disminuir cuando la temperatura supera los 32 °C.

Con el advenimiento de las lámparas fluorescentes se desarrollaron numerosos sistemas de encendido que contemplaban las condiciones de uso de cada lámpara:

- En primer lugar, el encendido por “precalentamiento” que requiere una llave, ya sea manual o automática, que conecte y desconecte el sistema de encendido. El encendido por precalentamiento es ampliamente utilizado en las lámparas fluorescentes compactas.

- En segundo término, el sistema de “encendido instantáneo”, que requiere una elevada tensión de circuito abierto proporcionada por el balasto. Para funcionar en circuitos de balastos magnéticos, se requieren lámparas de encendido instantáneo especialmente construidas. Se han desarrollado balastos electrónicos que tienen la capacidad de proporcionar encendido instantáneo a una gran variedad de tipos de lámparas fluorescentes.
- Finalmente, el más usado de los sistemas de encendido es el denominado de “encendido rápido”, que funciona sobre la base del calentamiento permanente de los electrodos, por lo que no requiere de elevadas tensiones ni llaves de encendido.

2.3.4. Fluorescentes compactos (LFC)

Las lámparas fluorescentes compactas han surgido como consecuencia del uso de fósforos activados con tierras raras y con la contribución de la electrónica, las cuales, conservando la eficacia y vida de las fluorescentes lineales.

Se usan los tubos T-4 y T-5 de forma curvada o plegada de manera compacta y plana, o bien dos o más tubos paralelos de pequeño diámetro, interconectados entre sí y con un solo casquillo.

Una lámpara fluorescente compacta frente a una incandescente consume una cantidad de energía 4 veces menor aproximadamente para igual flujo luminoso, dependiendo del tipo de lámpara, y tiene una vida de 3 a 10 veces mayor, según el modelo. Se obtienen valores de la temperatura de color correlacionada entre 2.700 K y 6.500 K.

La aparición de balastos electrónicos de menores dimensiones y peso, junto al aumento de vida de las lámparas compactas, ha llevado en estos últimos años a la fabricación masiva de lámparas compactas integrales con balastos electrónicos.

La vida nominal de los buenos modelos (por ejemplo que cumplen con la normativa ELI) varía entre 6.000 y 12.000 horas, similar a la de las fluorescentes lineales. Los rangos clásicos tienen rangos de potencia entre 5 a 55 W, con flujo luminoso entre 250 a 4.800 lm.

2.3.5. Vapor de sodio a alta presión VASP¹⁰

Son equipos que funcionan por descarga de gas a alta presión. Se conocen también como SON.

* Funcionamiento

En este tipo de lámparas el tubo de descarga, compuesto de óxido de aluminio sinterizado alcanza el millar de grados centígrados, a esa temperatura serían líquidos¹¹ metales como la plata (Ag) cuyo punto de fusión está en 960 °C o el bronce (880-920 °C) y se encontraría al límite el cobre (Cu), que fundiría a los 1.050 °C. El tubo de descarga contiene una mezcla de mercurio y sodio en aleación domada por un gas noble.

* Características fundamentales

- Temperatura del color: cálida, de 2.000 a 2.500 K.
- IRC independiente del modelo, con valores entre 20 y 80.
- Vida media hasta 24.000 horas.
- Eficacia luminosa hasta 130 lm/W.
- Emisión UV muy escasa, casi nula.

Se expone un ejemplo (Fig. 2.18) de la distribución espectral de la potencia de este tipo de lámparas, en este caso modelo SON-T de Philips.

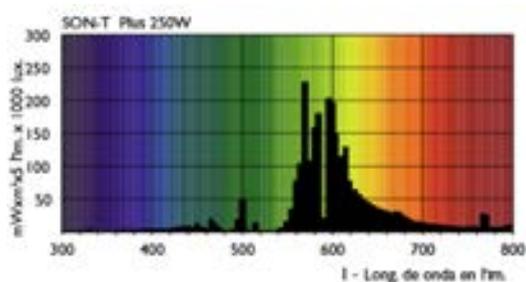


Figura 2.18. Espectro emisor de SON-T. Fuente: Philips.

¹⁰ <http://www.unioviado.es/ate/manuel/SEPI/10-SEPI-Lamparas-Parte%20V-Sodio.pdf>

¹¹ Valores dados a la presión atmosférica, que no es la de operación del tubo de descarga.

* Aplicación en túneles

Son las más empleadas históricamente en la iluminación de túneles por su alta relación lm/W , es decir, presentan un mayor aprovechamiento de energía para su transformación en iluminación útil.

Aun cuando el LED está entrando con ventaja en los túneles e infraestructuras con características similares, en las zonas del túnel donde se requieren refuerzos de iluminación importante las VSAP siguen presentes, aunque con las nuevas tecnologías LED y sus potenciales servicios, acabarán siendo sustituidas.

Las curvas de depreciación y la curva de mortalidad se muestran en la figura 2.19. Se trata del mismo modelo SON-T de Philips.

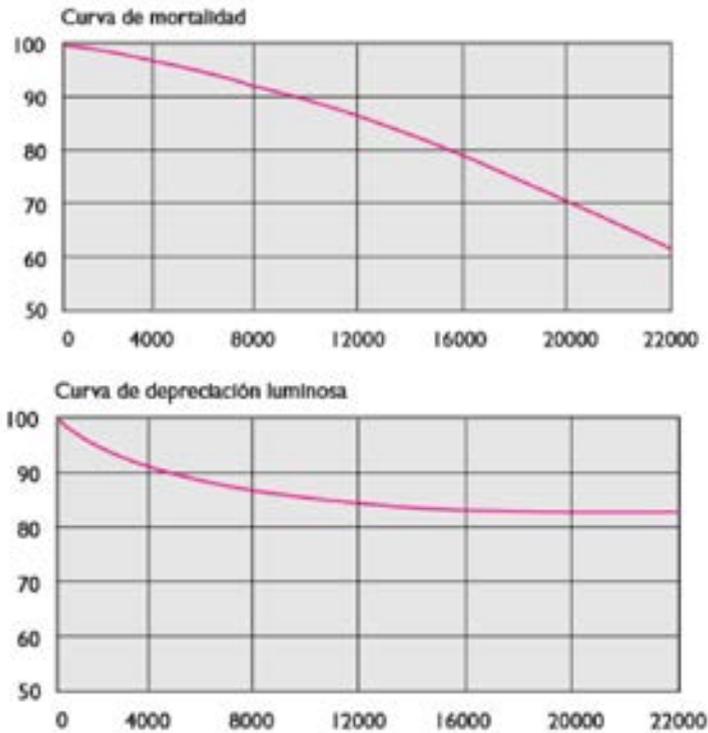


Figura 2.19. Mortalidad y depreciación luminosa de SON-T. Fuente: Philips.

2.3.6. LED

Es un componente opto-electrónico, un diodo que emite luz. Un diodo es un componente electrónico de dos terminales que permite la circulación de la corriente electrónica a través de él en un solo sentido corriente electrónica a través de él en un solo sentido.

Quando un LED se encuentra en polarización directa, los electrones pueden recombinarse con los huecos en el dispositivo, liberando energía en forma de fotones. Este efecto es llamado electroluminiscencia y el color de la luz (correspondiente a la energía del fotón) se determina a partir de la banda de energía del semiconductor. Por lo general, el área de un LED es muy pequeña (menor a 1 mm²), y se pueden usar componentes ópticos integrados para formar un patrón de radiación.

Las principales ventajas del LED son:

- Poseer un tiempo de encendido muy corto en comparación con las luminarias de alta potencia como lo son las luminarias de alta intensidad de vapor de sodio aditivos metálicos halogenuro y demás alta intensidad de vapor de sodio, aditivos metálicos, halogenuro y demás sistemas con tecnología incandescente
- Diferentes tamaños, pequeños.
- Robustos a choques térmicos o vibraciones.
- Baja operación de Voltaje DC.
- Fuente de un solo punto: La luz se puede direccionar en un punto concreto para incrementar la eficiencia.
- Colores vivos y saturados sin filtros.
- Temperatura de operación alta hasta 185 °C temperatura de la unión.
- Tiempos de vida largos (20.000 a +100.000 horas).
- No contienen mercurio (el cual al exponerse en el medio ambiente es altamente venenoso) en comparación con la tecnología fluorescente no crean campos magnéticos altos como la tecnología de inducción magnética, con los cuales se crea mayor radiación residual hacia el ser humano.
- Mejor índice de producción cromática que otros tipos de luminarias.

En la Fig.¹² 2.20 se aprecia la diferencia de calidad entre la calidad visual que ofrece el LED (izquierda) y la de HPS.



Figura 2.20. Comparación LED y HPS.

2.3.7. LED en túneles

La tecnología LED aporta muchas novedades frente a las tradicionales para la inmensa mayoría de las aplicaciones en iluminación y no es diferente para el servicio en túneles. Su gran competidor para completar los sistemas de iluminación en túneles son las lámparas de vapor de sodio de alta presión, muy empleadas en túneles tradicionalmente; sin embargo, los diodos para la emisión de luz presentan mejoras sustanciales.

Las tres grandes diferencias entre las lámparas de VSAP y las LED, son:

- Temperatura del color.
- Mantenimiento de la instalación.
- Control y regulación.

¹² Fuente: Curso Introducción a la Tecnología LED. EBV Electronik.

A continuación se estudian cada una de ellas:

* **Temperatura del color**

Puede aplicarse la tecnología LED cualquiera que sea la temperatura del color que se busque, pero existen parámetros de trabajo más habituales para este tipo de lámparas. Los valores más habituales se sitúan sobre los 4.000 K (frente a los 2.000 K de las de VSAP).

Aparentemente la tecnología LED da una luz más fría (más tendente al blanco) que la VSAP (más hacia el amarillo). A bajo nivel de luminancia aparece el efecto *Purkinje*¹³, según el cual aumenta la percepción de luz con un menor consumo de potencia en los casos de luz fría que en los de cálida. Este efecto puede hacer que en el periodo nocturno los LED queden más ajustados al nivel requerido que las lámparas de descarga. En ciclos diurnos no se da el efecto Purkinje, lo que corresponde con luminosidades por encima de las 30 cd/m².

* **Mantenimiento de la instalación**

La alta vida útil del LED constituye otra de las grandes ventajas del LED frente a las lámparas de descarga en general, y también cuando se compara con las de VSAP. El mantenimiento preventivo en un túnel con afluencia media de tráfico implica una reposición masiva de lámparas y condensadores cada dos años aproximadamente. Los conjuntos LED de calidad con un mantenimiento adecuado no requieren reposición masiva hasta los cinco años de su puesta en servicio. Tanto las VSAP como los LED requieren una actuación de limpieza anual de media (es función de la contaminación que se produzca en el túnel, su nivel de ventilación, etc.).

* **Control y regulación**

Esta es una de las grandes ventajas de la tecnología LED frente al resto. Por su íntima relación con la electrónica resulta un incremento menor que en otras tecnologías y su respuesta es más inmediata y correcta.

¹³ Véase el aparatado de percepción humana de la luz.

Los drivers asociados a los LED permiten el encendido instantáneo de las fuentes de luz y su regulación lineal del 1 a 100%, lo que simplifica mucho la gestión y permite una adaptación rápida a las necesidades en tiempo real. Las tecnologías de VSAP presentan periodos de encendido mayores y su regulación se da en una horquilla notablemente más estrecha.

Los correctos valores de control y regulación requieren precisión en la toma de datos, es decir, buenos aparatos de medida de la iluminación en el exterior del túnel que permitan una rápida respuesta en el ajuste de los niveles del interior del túnel con las variaciones de la demanda en función de los datos fotométricos exteriores.

Los regímenes de encendido en la vida del alumbrado en un túnel son:

- Alumbrado diurno soleado. A pleno Sol.
- Alumbrado diurno nublado. A 50% de la instalación de refuerzo.
- Alumbrado crepuscular. Al amanecer y al anochecer.
- Alumbrado nocturno. De noche con poca intensidad de tráfico.
- Alumbrado de seguridad y evacuación.

Para la regulación del LED se opera con el ajuste del flujo luminoso de cada proyector. Este método permite el cumplimiento de la exigencia de mantenimiento de las uniformidades¹⁴ (U_0 y U_1) en todos los valores de luminancia. Efecto especialmente útil cuando se pretende el máximo ahorro energético¹⁵ en la iluminación del túnel.

* Alumbrado permanente en el interior del túnel

El empleo de luminarias LED para el alumbrado interior del túnel es, con diferencia, la solución más eficiente, tanto que muchos expertos piensan que deberían requerirse como única solución para estos tramos una vez que se sustituyan

¹⁴ Véase apartado (uniformidades).

¹⁵ Véase apartado (ahorro energético).

los equipos de iluminación en túneles tradicionales por labores de mantenimiento o extinción de su vida útil. Resultan especialmente recomendables los drivers con regulación mediante sistema 1-10 V o de similar robustez, lo que permite su adaptación a las condiciones de alumbrado del túnel y de consumo energético a los requerimientos del tráfico (densidad, composición, condiciones de seguridad, etc.), siempre en cumplimiento de las condiciones de seguridad y sin modificar las uniformidades (U_0 y U_1).

* Limitaciones y desafíos

Si hay un apartado en el que la tecnología LED no tiene las de ganar en la iluminación de túneles, éste tiene lugar en la entrada de las vías enterradas en iluminación diurna: los niveles de luminancia requeridos son muy altos y las lámparas de VSAP los proporcionan con mayor suficiencia, aunque las nuevas evoluciones en LED ya están en competencia con este tipo de tecnología de descarga.

La recomendación más extendida hasta el momento para las zonas del túnel que requieren iluminación de refuerzo es la combinación de proyectores LED y luminarias con lámparas VSAP, sobre las que recae verdaderamente la iluminación de refuerzo. El resto del túnel es mucho más eficiente con LED. Se describen experiencias recientes muy positivas en el capítulo de casos prácticos.

El primer túnel iluminado completamente con LED, el túnel *Carlin* en el noroeste de Nevada (EE.UU.), está conformado por dos perforaciones con una anchura de 10 metros y una longitud de 425 metros. Antes de esta experiencia el túnel de *Carlin* estaba iluminado por una combinación de 1.253 luminarias dotadas con lámparas de vapor de sodio a alta presión (VSAP) de 100 W, 150 W y 400 W. La solución adoptada en esta primera experiencia consistió en una combinación de 789 luminarias en dos versiones (FV 32 LED de la empresa *Shréder*), la primera 240 LED de 266 W y la segunda versión 120 LED de 131 W, lo que significó la instalación de un número menor de luminarias (464 unidades menos) y una potencia menor, es decir, menor consumo.

Además se ganó en mantenimiento, una luz más blanca y confort de los usuarios. La perforación del túnel en sentido Este se terminó en diciembre de 2013, mientras que la perforación en dirección Oeste tenía previsto ser completada a finales de 2014.



Figura 2.21. Comparativa boca de entrada y boca de salida.

3.1. Introducción-Generalidades

El paso del tráfico rodado o ferroviario por túneles presenta especificidades a las que se debe atender con especial cuidado; cuando un conductor llega a la boca de un túnel con su vehículo su visión sufre un periodo de adaptación durante el cual se produce el ajuste de su agudeza visual a la nueva circunstancia. Se propone el estudio del conjunto de los efectos visuales que pueden afectar a los desplazamientos en vías soterradas y túneles abiertos al tráfico.

3.1.1. Tipología de túneles

Para su iluminación los túneles se clasifican en dos categorías simples que son función directa de su longitud:

- Túneles cortos.
- Túneles largo.

Pueden estimarse categorías intermedias, no solo en función de la longitud física de diseño del propio túnel, sino también teniendo en cuenta la tecnología lumínica empleada y su disposición. En todo caso la diferencia fundamental es la penetración o posible presencia de la luz natural en el cuerpo de paso del tubo: en los cortos las bocas de entrada y salida están próximas, lo que permite contar en parte con la luz natural; en largos la mayor parte de la vía enterrada permanece opaca a la luz del Sol.

Diferentes anchuras de bocas tienen efectos evidentes sobre la penetración de la radiación visible de la luz del día.

En general puede decirse que la diferenciación entre túneles largos y cortos es función de la capacidad del conductor de apreciar la luz a través del túnel, es decir, de alcanza a ver la luz al final del túnel y esto resulta variable para diferentes parámetros de diseño como longitud, anchura, curvaturas, etc.

La evolución histórica de la iluminación en túneles recoge el empleo de las siguientes tecnologías: vapor de sodio a alta presión (VSAP), Halogenuros metálicos y vapor de mercurio, fluorescentes, vapor de sodio de baja presión (VSBP) y LED, de aplicación en los últimos años.

La tecnología LED se presenta como las más novedosas de aplicación en la iluminación de túneles¹.

* Términos y efectos relacionados con el alumbrado de túneles

Más allá de los términos generales que se han introducido existen otros de máxima utilidad y de un carácter más específico para el tema de estudio, que han sido reservados para este apartado. Algunos de estos conceptos son comunes a cualquiera que sea la naturaleza la vía que ocupe el vehículo en circulación, otras más propias de las vías enterradas en las que penetración de luz natural no garantiza la visión en condiciones de seguridad.

Los términos a estudio se clasifican de la siguiente manera:

- Para vías en general:
 - Sistemas de alumbrado.
 - Sistema Simétrico.
 - Conceptos asociados:
 - Distancia de seguridad.
- Para túneles:
 - Sistemas:
 - Sistema simétrico.
 - Sistema asimétrico.
 - A contraflujo.

¹ Consideraciones del Comité de Túneles de la ATC sobre el empleo de tecnología led en el alumbrado de túneles- RUTAS 154 Enero-Marzo 2013. Pág. 10-18. ISSN: 1130-7102).

- Iluminación con luz natural.
- Conceptos asociados:
 - Luminancias de velo.
 - Efecto de adaptación.
 - Efecto de inducción.

En las vías de circulación para vehículos en general, a cielo abierto, se emplea el sistema simétrico, cuyas cualidades son aplicables también a los túneles. El concepto de distancia de seguridad se trata como general en tanto a su afección al tránsito rodado en cualquier vía, aunque se hace referencia a sus particularidades cuando se considera en los túneles. Cuando no se citan específicamente estos dos términos asociados a los túneles es por considerarlos heredados de su exposición en el apartado de vías en general, no porque no sean aplicables a los túneles.

✱ Sistemas de alumbrado

Los sistemas de alumbrado se diferencian por su coeficiente de revelado de contraste (q_c)², que también se puede encontrar en la bibliografía especializada con el nombre de calidad del contraste (P).

La simetría o asimetría de la intensidad luminosa del sistema lo diferencian hasta el punto de clasificarlos. Los asimétricos pueden disponerse a favor o en contra del sentido del tráfico en la vía; sin embargo, la primera opción no tiene aplicación real por no presentar los valores mínimos requeridos para la seguridad vial.

La elección de uno u otro sistema condiciona técnicamente las cualidades del resto de los elementos presentes: paredes del túnel, calzada de rodadura, pavimento, luminancias de velo, velocidades de entrada, aproximación y paso, etcétera, así como las tecnologías de iluminación aplicables.

En la Tabla 3.1 se han resumido las recomendaciones de aplicación de uno u otro sistema.

² Véase la definición en el apartado dedicado a ello.

Tabla 3.1. Recomendaciones de aplicación de sistema de iluminación.

Recomendaciones de aplicación de sistemas de iluminación de túneles		
Factor de diseño considerado	Sistema	
	Simétrico	Asimétrico
Deslumbramientos	○	∅
Visión contraste negativo	∅ (1)	○
Visión contraste positivo	○	X
Interior de túneles	○	X
Bocas de túneles	○	○
Fluorescentes o CFL	⚡	∅
VSAP	⚡	⚡
VSBP	⚡	∅
Descarga por inducción	⚡	∅
Boca de entrada a baja velocidad <60 km/h	○	∅
Boca de entrada a alta velocidad ≈90 km/h	∅	○
Doble sentido de circulación	○	X
Efecto agujero negro	○	∅
Alta densidad de tráfico	○	∅
Mayoría de vehículos pesados	○	∅
Alta penetración de la luz natural	○	∅∅
S_1 , factor especular (pavimento)	↓	↑
Q_0 , coeficiente de luminancia media (paredes)	↑	-
Q_0 , coeficiente de luminancia media (pavimento)	↑↑	↑↑
Pavimento C1 (CIE)	○	∅
Pavimento C2 (CIE)	∅	○
Pavimento R1 (CIE)	○	∅
Pavimento R2 (CIE)	○	∅
Pavimento R3 (CIE)	∅	○
Pavimento R4 (CIE)	∅	○
Requiere limitar la E_v de los objetos	X	⚡

○: sistema recomendado; ∅: no recomendado; ⚡: afirmativo; X: negativo; ↑: valores altos; ↓: valores bajos; ↑↑: valores lo más altos posible; (1): puede tomar en negativo en función del objeto.

* Sistema simétrico

Se trata de un sistema que no produce deslumbramientos y el único aplicable a las zonas interiores del túnel y, por tanto, el que puede disponerse en todo el túnel completo. Si se diseña un solo sistema solo puede ser el simétrico en su intensidad lumínica respecto a un plano perpendicular al eje del túnel que marca la circulación.

Se acopla bien, con buena visibilidad de objetos, a superficies difusoras tanto del pavimento como de las paredes del túnel. El resto de las exigencias fotométricas para la optimización del sistema se han expuesto en cuadro comparativo.

Aunque la naturaleza del objeto puede afectar, el simétrico es un sistema desarrollado para procurar la claridad de los objetos, que deben aparecer más iluminados, en contraste con el fondo, más oscuro.

Resulta mejorable en las bocas del túnel, especialmente cuando se quieren conseguir por encima de las 200 cd/m² aparecen limitaciones serias por la propia genética del sistema y en la velocidad de los vehículos. Es entonces cuando puede pensarse en la alternativa del contraflujo.

Las velocidades limitantes a la entrada del túnel se encuentran entre por encima de los 60-65 km/h, aunque pueden disponerse el sistema para una entrada de hasta 80-85 km/h cuando las iluminancias de velo resultan bajas.

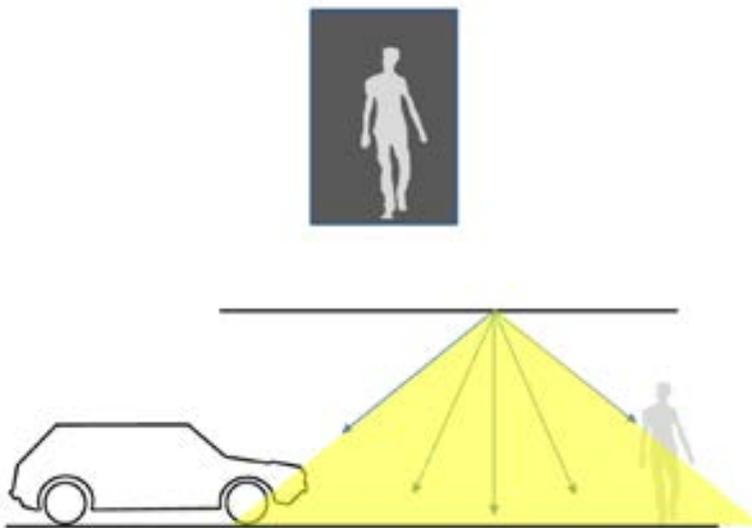


Figura 3.1. Sistema simétrico.

El coeficiente de revelado de contraste para este sistema, sin considerar la influencia de la luz diurna, resulta menor o igual que 0,2. Es un valor que se supera cuando se consideran las influencias de la luz natural del día.

$$q_{c, \text{simétrico}} \leq 0,2$$

Uno de los problemas generados por la influencia de la luz diurna, en cualquiera de los sistemas es que el contraste torna variando, en este caso, de positivo a negativo y en ese camino pueden presentarse dificultades en la percepción de objetos en la vía.

* Sistema asimétrico a contraflujo

La magnitud que resulta asimétrica es la intensidad luminosa, que guarda tal desigualdad respecto de un plano perpendicular a la dirección de flujo del tráfico (eje longitudinal del túnel). De las dos opciones posibles en estas condiciones geométricas solo es aplicable aquella en la que la luz artificial se dirige en el sentido contrario al del flujo del tráfico en la vía.

El contraste de los objetos que pudieran estar presentes en la vía es negativo, es decir, éstos se apreciarán más oscuros que el fondo (paredes y pavimento claros respecto al objeto), al contrario que con el sistema simétrico. Aunque el contraste que produce este sistema suele ser mayor que en el simétrico, aparecen ciertos riesgos del efecto óptico de agujero negro, que resulta incómodo para el conductor (reduce el confort visual).

Este sistema tiene hueco en el diseño de iluminación en túneles cuando flojea técnicamente el servicio que puede obtenerse del simétrico, en cualquier otro caso es aquel el que se impone. No es un sistema tan versátil como el anterior, ni en referencia al tipo de lámpara que a éste se ajustan ni a la localización física posible en el túnel. El sistema a contraflujo está recomendado únicamente para la zona de entrada y, especialmente, cuando las velocidades de entrada en el mismo son altas, alrededor de los 85-90 km/h. Las lámparas se colocan sobre la vía y su calidad más empleada históricamente ha sido la tecnología de VSAP.

Nótese que si se dispusiera en vías de doble sentido este sistema perdería su propia naturaleza en uno de ellos, es decir, no puede servirse contraflujo en dos sentidos de una misma dirección de flujo del tráfico de vehículos, de modo que

este tipo de vías constituye una limitación evidente para el sistema asimétrico tratado. Otras limitaciones claras por falta de eficiencia, y en alguno de los casos por eficacia, del sistema a contraflujo son: alta densidad de tráfico, alta presencia de vehículos pesados o entradas con alta penetración de la luz diurna.

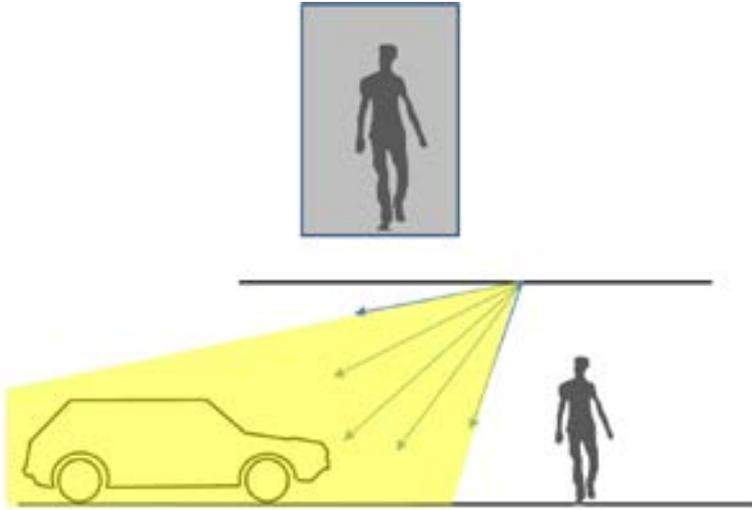


Figura 3.2. Sistema a contraflujo.

Los deslumbramientos deben ser controlados trabajando con parámetros de fotometría conocidos, como los que aparecen en el cuadro comparativo adjunto. En general, en las zonas donde se aplique este sistema debe contarse con un pavimento de factor especular elevado, de tono claro y C2, R3 o R4 (CIE)³. Las paredes del túnel deben contribuir, al menos hasta la altura del punto medio de la luna del vehículo, a la reducción de la iluminancia vertical de los obstáculos, para lo que se deben permitir mantener una iluminancia elevada en el espacio descrito.

El coeficiente de revelado de contraste para este sistema, sin considerar la influencia de la luz diurna, resulta superior o igual que 0,6. Con influencia de la luz del día el valor desciende del límite establecido.

$$q_{c, \text{contraflujo}} \geq 0,6$$

³ Comisión internacional de iluminación.

Uno de los problemas generados por la influencia de la luz diurna, en cualquiera de los sistemas es que el contraste torna variando, en este caso, de negativo a positivo y en ese camino pueden presentarse dificultades en la percepción de objetos en la vía.

* Iluminación natural

La iluminación natural en túneles se ha venido limitando, hasta el momento, al apantallamiento de la luz del día y su correcta orientación en esa zona, en la que puede significar una competencia alta para los sistemas artificiales. Las exigencias técnicas para el diseño de este tipo de solución se equiparan a las del simétrico. Debe cumplirse, como mínimo:

$$L_{th} = k.L_{20}$$

donde, L_{th} es la luminancia de la zona umbral del túnel; L_{20} , la luminancia en la zona de acceso al túnel (entrada); y, k marca la proporcionalidad que debe mantenerse entre ellas.

Además también debe demostrar su equivalencia el sistema natural con el artificial en términos de coeficiente de revelado de contraste (a_c), aprovechando además la luz inter-reflejada.

* Conceptos asociados

Se consideran en este apartado los conceptos asociados tanto a las vías en general como a los túneles en particular.

A) Efectos de inducción y adaptación

Son dos efectos relativos a la sensibilidad del ojo humano y que se pueden controlar por modificación de la posición relativa de las diferentes luminancias en el campo de visión. La *inducción* tiene que ver con la capacidad del conductor de apreciar los objetos de luminancias similares a las que permite la iluminación dispuesta.

A la entrada del túnel, ya desde una cierta distancia, la interacción de la retina con el resto de las partes adyacentes del ojo humano, fabrica una imagen que llega al cerebro y que éste traduce como una imagen en la que el túnel se aprecia según el efecto de “agujero negro”, es decir, un espacio oscuro en cuyo interior no destaca ningún objeto, color ni tono. Esa falta de detalle es debida al efecto de inducción. En el caso descrito compiten dos luminancias muy diferentes: la del exterior con la luz del día y la del interior del túnel, mucho menor. La gran diferencia entre las dos luminancias citadas, producen el efecto inducción y, por más tiempo que se dedicara a intentar percibir un objeto dentro del túnel, éste nunca se apreciaría.

El fenómeno de adaptación permite la acomodación del ojo humano a un cambio de iluminación (distribución de luminancias) dentro del campo de visión. El tiempo que el ojo humano dedica a adaptar su sensibilidad a la nueva situación define el efecto de adaptación. Cuando el cambio es muy brusco, dentro del tiempo de adaptación existe una ceguera temporal.

En la zona de entrada y acceso a los túneles se producen sucesivamente estos dos efectos, que deben ser controlados con la velocidad de diseño y con sistemas de iluminación que reduzcan, en lo posible, el tiempo de adaptación.

B) Luminancias de velo

La percepción de los objetos está relacionada con su luminancia. Si la seguridad vial requiere la apreciación y diferenciación de paredes del túnel, del fondo, de la calzada y de los objetos que pueden aparecer de manera inesperada, cada uno de ellos debe presentar una luminancia diferente.

Se denomina luminancia del velo floveal⁴ (o de Fry) a la luz parásita que queda en el ojo del conductor, luminancia del parabrisas a la luz que los fenómenos de reflexión sobre su superficie permiten observar y luminancia atmosférica a la que en el momento considerado permite el estado del entorno de transmisión de la luz.

El contraste entre luminancias permitirá la percepción de los objetos, lo que puede expresarse según:

$$C = \frac{L_o - L_f}{L_f}$$

⁴ Véase el apartado descriptivo sobre el ojo humano en este mismo volumen.

donde, C es el contraste del objeto con el fondo; L_o , es la luminancia del objeto; y, L_f es la luminancia del fondo.

La expresión anterior permite diferenciar en dos categorías de contraste: positivo, que se da cuando el objeto se aprecia más claro que el fondo, y negativo, cuando ocurre al contrario. Las categorías se han nombrado en función del signo obtenido al aplicar la fórmula, de manera que puede determinarse:

$C > 0 \Rightarrow$ contraste positivo

$C < 0 \Rightarrow$ contraste negativo

Como en el caso de contraste positivo la luminancia del objeto es superior a la del fondo, el primero se ve más claro; ocurre al contrario cuando el contraste es negativo y el fondo aparece más iluminado que el objeto.

El estudio del contraste desemboca en la diferenciación de dos grupos: el contraste físico, también llamado intrínseco (referido al objeto) [C_{int}], y el contraste de retina [C_{ret}]. El primero se mide junto al objeto, toda vez que para determinar el segundo las mediciones se toman junto al ojo del conductor. Entre ambos puntos se disponen las luminancias ya definidas: foveal (L_v), atmosférica (L_{atm}) y de parabrisas (L_{pb}). En esta situación se da una perturbación de la visión del conductor por deslumbramiento de velo.

La luminancia de velo (residuo foveal) se produce por las luminancias ajenas a la función visual principal instantánea. Fisiológicamente se debe a la actividad del humor acuoso donde difracta la luz de aquellos objetos ajenos a la tarea visual preferente.

Diferentes diseños del vehículo se traducen en lunas delanteras (parabrisas) cualitativamente diferentes. Algunos con más curvatura lateral, más o menos verticales, diferentes capacidades refractorias, etcétera. En este sentido puede considerarse que la adaptación del conductor al vehículo que maneja es una variable importante en la seguridad vial. Los parabrisas, por estar expuestos a impactos con objetos y partículas a contraflujo (choque sometido al cálculo de cantidad de movimiento, en cuyo caso más desfavorable de choque frontal se suman las velocidades) y por su afección en la seguridad del conductor, a diferencia del resto de las estructuras transparentes del coche, se fabrican en vidrio laminado por capas entre las que se incluyen diferentes materiales de origen plástico que mejoran su comportamiento, como el etil-vinil-acetato o el butiral de polivinilo (PVB), se

incluyen también celulosas específicas. Hacia mediados de la década de los veinte del siglo pasado Ford ya montaba la marca registrada TRIPLEX® en sus modelos, parabrisas formado por doble vidrio laminado y capas de celuloide interpuestas. Desde 1983 no se fabrican coches con un parabrisas que no esté basado en el vidrio laminado; sin embargo sus diferentes diseños y calidades ocasionan distintos valores de la luminancia del parabrisas. Considérese que una vez cumplidas las exigencias citadas un vehículo puede montar vidrio tintado (en tonos verde, gris y azul), vidrios electro-crómicos (sistema que permite que el conductor seleccione la cantidad de luz y radiación solar que en cada momento atraviesa el parabrisas), vidrio atérmico (poca capacidad de transferencia del calor al interior del vehículo), vidrio térmico (calefactable), vidrio hidrófobo, vidrio con barrera acústica, vidrio anti-reflejo, vidrio con antena incorporada, vidrio con display, etc. Otras variedades como el vidrio tintado en oscuro, no pueden montarse legalmente en el parabrisas. Tomando el caso ejemplar del vidrio atérmico, se comprueba que las maneras de conseguir este efecto están relacionadas con la variación del comportamiento óptico del material. Se puede conseguir que transmita menos calor aumentando su capacidad de absorberlo, de reflejarlo o incluyendo un filtro de rayos UVA⁵. Fabricantes como *Saint-Gobain* sirven el material con dureza 470 HK⁶ e índice de refracción 1,52, asegurando una resistencia prolongada hasta las 96 horas continuadas a 90 °C.

El término atmosférico se debe a la refracción de la luz sobre las capas de la atmósfera que, entre el objeto y el vehículo, atraviesa el haz. Las condiciones atmosféricas son claves para su definición: temperatura, contenido en partículas (contaminación), densidad instantánea, etc. En esas condiciones la hora solar, es decir, la posición relativa del Sol respecto a la zona de estudio, es la variable de cierre de la luminancia atmosférica.

El efecto general de las tres luminancias descritas (L_v , L_{atm} y L_{pb}) reducen el contraste intrínseco del objeto en la vía, aunque no presentan capacidad suficiente por sí mismas para cambiar el signo del contraste. En los casos de luminancias de velo de valores altos puede darse la invisibilidad del objeto, aspecto que puede corregirse aumentando la luminancia de la zona umbral del túnel, en los casos más extremos puede incluso doblarse el valor nominal de diseño para amortiguar o eliminar tal fenómeno visual.

⁵ Elementos de la radiación ultra violeta clase A.

⁶ Dureza medida en el ensayo de Knoop, en la que el ensayo consiste en presionar una punta piramidal de diamante contra la superficie cuya dureza quiere medirse. La ecuación empleada es $HK = P / (C_p \cdot L^2)$, y los valores habituales se escalan entre 100 y 1.000.

C) Distancia de seguridad

Es la distancia entre un objeto y el vehículo que permite al conductor de este último percibirlo con garantías de sortearlo o tomar la decisión correcta en condiciones de máxima seguridad, por ejemplo detenerse. La distancia de seguridad per se, se define para este último concepto, la detención efectiva del vehículo antes de alcanzar el objeto presente en la vía. Es un concepto función de la velocidad a la que el vehículo circula.

En seguridad vial se maneja una fórmula física que incluye dos términos (sumandos) que pueden analizarse por separado, según la expresión:

$$d_s = R_r \cdot \frac{V_0}{3,6} + \frac{1}{3,6^2 \cdot g} \cdot \int \frac{v}{f_1(v) + h} dv$$

donde, d_s es la distancia de seguridad [m]; V_0 , la velocidad considerada para del diseño [km/h]; R_r , es el tiempo que discurre desde la percepción hasta la reacción del conductor [s]; f_1 , es el coeficiente de fricción longitudinal de la vía, que depende de la velocidad del vehículo, adimensional; g , la aceleración de la gravedad [9,81 m/s²]; y , h es la pendiente de la vía en porcentaje.

La evidente dependencia de la distancia de seguridad con la velocidad, en proporcionalidad directa, recomienda tener en cuenta que la luminancia del velo atmosférico es proporcional a la distancia de seguridad, según:

$$T_{atm} = 10^{-k \cdot d_s}$$

donde, T_{atm} es la transmisión atmosférica; k , es la constante de proporcionalidad; y , d_s la distancia de seguridad.

La capacidad de percepción de un obstáculo resulta inversamente proporcional al cuadrado de la distancia de seguridad, supuesto constante el coeficiente de contraste. Además, debe tenerse en cuenta que la velocidad de adaptación visual tiene que ver con la velocidad de aproximación del vehículo.

Si se considera que la zona umbral de un túnel no es fija, sino dinámica, ésta crece con la velocidad de diseño de los vehículos en la entrada al túnel. De esta

manera la distancia de seguridad (por medio de la velocidad de diseño) afecta claramente al diseño de la iluminación en el túnel, incluso a su zonificación al efecto.

Los ángulos bajo los que el conductor percibe un objeto situado en la vía son, también, función de las velocidades, tanto de la de diseño como de la de circulación del vehículo en el momento considerado. A mayores distancias el ángulo es menor y el objeto menos visible para el conductor. Con esa distancia también aumenta la luminancia atmosférica (L_{atm}), por mayor presencia de masa de aire, y una reducción del contraste, todo ello perjudica la capacidad del conductor de apreciar el obstáculo y reaccionar. Para evitarlo se aumentan los niveles de iluminación en la zona umbral del túnel, pero de poco sirve si el conductor no atiende a la velocidad de diseño de dicho espacio.

La distancia de parada (DS ó DP), según la Norma 3.1-IC "Trazado", se define como la distancia total recorrida por un vehículo obligado a detenerse tan rápidamente como le sea posible, medida desde su situación en el momento de aparecer el objeto que motiva la detención. Comprende la distancia recorrida durante los tiempos de percepción, reacción y frenado.

En la Tabla 3.2 se muestra la distancia de parada calculada por este método en los casos más habituales, en función de la inclinación de la rasante, la velocidad y el coeficiente de fricción neumático-pavimento según se encuentre la superficie de rodadura seca o húmeda.

Tabla 3.2. Distancias de seguridad con $t=2$ s.

DS ó DP (m) con $t=2$ s.						
Inclinación de la rasante (%)	Velocidad (km/h)					
	80		90		100	
	f seco	f húmedo	f seco	f húmedo	f seco	f húmedo
	0,62	0,33	0,59	0,31	0,57	0,3
6	81	109	99	136	118	165
4	83	113	101	141	120	171
2	84	116	102	147	122	179
0	85	121	104	153	125	187
-2	86	126	106	160	127	196
-4	88	131	108	168	130	207
-6	89	138	110	178	133	220

Dado que en un túnel en correcto mantenimiento no debe aparecer pavimento mojado más que por el agua que los neumáticos de los vehículos pueden arrastrar, para los cálculos se emplea el factor en seco en todas las zonas del túnel salvo en el sector umbral, donde se aplicará el factor en húmedo. Por sus propias características, los túneles cortos prácticamente no tienen zona interior y la consideración que se les concede es la de umbral en toda su corta longitud por lo que en ese caso concreto de túnel corto se aplica la DS en húmedo en toda su longitud.

En las zonas con menos de 120 días de lluvia al año se podrá calcular la distancia de parada para una velocidad inferior a la establecida, siempre y cuando se asegure que en caso de pavimento húmedo existirá una limitación de velocidad en los accesos al túnel mediante señalización de velocidad variable o fija. Así por ejemplo, un túnel con pendiente 0%, en condiciones de pavimento seco podrá tener la velocidad limitada a 100 km/h y con pavimento húmedo a 80 km/h.

Sabido que las variables fundamentales para determinar los sistemas de iluminación en túneles son la velocidad de diseño del tramo de vía en el que se localiza en túnel, la calidad (composición) y la cantidad (intensidad) del tráfico, se deduce la importancia de la DS en el proyecto de iluminación del túnel, pues los factores de dependencia son comunes. En especial mayores velocidades e intensidades aumentan el riesgo de accidente, que disminuye drásticamente cuando se aumenta la iluminación.

Ya en las vías a cielo abierto se establece relación entre la disminución del riesgo de accidente y la competencia (eficacia) del sistema de iluminación y este concepto se ha traspuesto con éxito a los túneles.

* Métodos alternativos de cálculo

En la aplicación de este método de cálculo consideran tres tiempos parciales: el de percepción de un objeto situado en la vía (actividad del ojo), el de reacción del conductor (respuesta del conductor, desde que el ojo envía la señal al cerebro hasta que éste envía la señal y se produce la actividad muscular) y el de frenado (respuesta del vehículo).

Se propone la expresión:

$$DS = \frac{v \cdot t_p}{3,6} + \frac{v^2}{254 \cdot (f_1 + i)}$$

donde, DS es la distancia de seguridad o de parada (=DP) [m]; v , es la velocidad [km/h]; t_p , es el tiempo de percepción y reacción [s]; f_1 , es el coeficiente de rozamiento longitudinal rueda-pavimento; i , pendiente o inclinación de la rasante (tanto por uno).

La distancia de parada DS , que a menudo ha de ser evaluada para el correcto diseño del alumbrado, es la suma de dos distancias.

- La cubierta durante el tiempo de percepción y reacción, X_0 .
- La cubierta durante el tiempo de frenado, X .

Si u es la velocidad de desplazamiento, constante al comienzo de la acción de parada:

$$X_0 = u \cdot t_0$$

donde t_0 es el tiempo de reacción (normalmente se toman 2 s).

La distancia X puede ser calculada comparando el impulso para un tiempo dt con el momento:

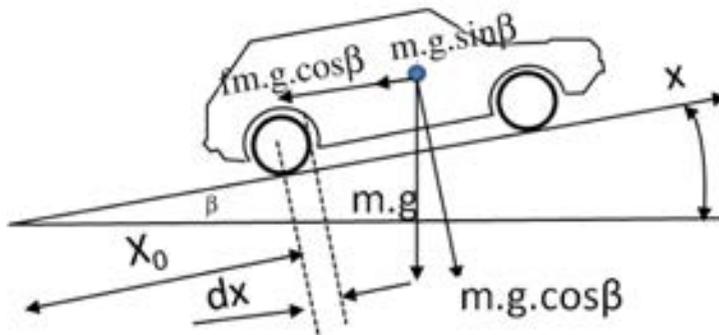


Figura 3.3. Fuerzas sobre un vehículo.

En la figura anterior se muestran un plano inclinado por el que puede circular un vehículo y las fuerzas que, según la Física, actúan sobre aquel. Tomándolas en cuenta, la expresión:

$$-(f \cdot m \cdot g \cdot \cos\beta \pm m \cdot g \cdot \sin\beta) \cdot dt = m \cdot du$$

donde, f = Coeficiente de fricción neumático-pavimento; m = Masa del vehículo; g = Aceleración de la gravedad.

El signo (+) debe ser considerado para una pendiente ascendente y el signo (-) para una pendiente descendente.

El tiempo dt puede ser expresado como dx/u . Introduciendo la pendiente $s = \tan \beta$ resulta:

$$\frac{-\cos \beta \cdot g \cdot (f \pm s) \cdot dx}{u} = du$$

$$dx = \frac{u}{\cos \beta \cdot g \cdot (f \pm s)} \cdot du$$

siendo $\cos \beta$ siempre próximo a la unidad, puede ser despreciado.

Integrando el miembro de la izquierda entre la distancia 0 y X, el miembro de la derecha tiene que ser integrado entre la velocidad u y la velocidad 0. Así:

$$\int_0^x dx = - \int_u^0 \frac{u}{g \cdot (f \pm s)} \cdot du$$

La integración del miembro de la derecha es imposible porque el coeficiente de fricción f es una función desconocida de la velocidad y de otros parámetros que dependen de la velocidad, tales como las condiciones atmosféricas, el estado de los neumáticos y otros.

Pero suponiendo f como una constante frente a u se obtiene:

$$x = \frac{u^2}{2 \cdot g \cdot (f \pm g)}$$

Con esta hipótesis puede usarse dicha fórmula para determinar X si el coeficiente de fricción es evaluado por ensayos prácticos y recogido en un gráfico en función de la velocidad.

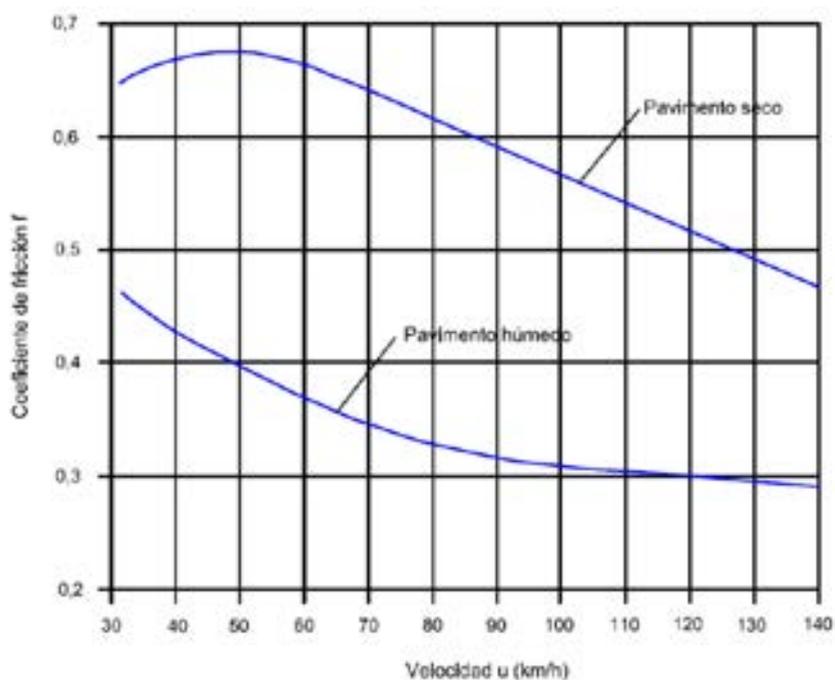


Figura 3.4. Coeficiente de fricción en función de la velocidad.

Sumando la distancia de reacción y la distancia de frenado se obtiene la fórmula general de la distancia de parada.

$$DS = u \cdot t_0 + \frac{u^2}{2 \cdot g \cdot (f \pm s)}$$

donde, u es la velocidad [m/s].

Sin ningún valor particular, t_0 puede suponerse igual a 2 segundos al tratarse de tramos iluminados, y por tanto, con buena percepción, y f tomada a partir de la curva de la figura 3.4 para pavimento húmedo como función de la velocidad de diseño.

3.2. Normativa a Cumplir: Reglamentos, normas y recomendaciones

La Normativa de Aplicación en Túneles es la que se cita a continuación:

3.2.1. Normativa nacional

- RD 1890/2008, de 14 de noviembre, por el que se aprueba el Reglamento de Eficiencia Energética en Instalaciones de Alumbrado Exterior y sus Instrucciones técnicas complementarias EA-01 a EA-07 y su Guía de Interpretación
- Real Decreto 635/2006, de 26 de mayo, sobre requisitos mínimos de seguridad en los túneles de carreteras del estado, que constituye la transposición al ordenamiento jurídico español de la Directiva 2004/54/CE de 29 de abril.
- Orden Circular 36/2015 sobre criterios a aplicar en la iluminación de carreteras a cielo abierto y túneles: TOMO I y TOMO II. El TOMO II es específico para iluminación en túneles "Recomendaciones para la iluminación de túneles".
- Dirección General de Carreteras (1999). Recomendaciones para la iluminación de carreteras y túneles. Ministerio de Fomento, Madrid.

3.2.2. Otras guías y recomendaciones de Referencia:

- Publicación CIE 88/2004. "Guía para el alumbrado de túneles de carretera y pasos inferiores".

- Publicación CIE nº 189/2010. Criterios de Calidad de los cálculos de Iluminación en Túneles.
- Publicación CIE nº 193/2010. Alumbrado de Emergencia en Túneles de Carretera.
- Publicación CIE Nº 194-2011. Medición in-situ de las propiedades fotométricas en Iluminación de Carreteras y Túneles.
- Normas UNE.
- Norma UNE-EN CR_14380:2007. "Aplicaciones de iluminación. Alumbrado de Túneles".

3.2.3. Normativa Europea

- Directiva 2004/54/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 29 de Abril de 2004, sobre requisitos mínimos de seguridad para túneles de la red trans-europea de carreteras.
- Normativa para Luminarias de alumbrado exterior.
- Directiva de Baja Tensión- 2006/95/CEE. Relativa a la aproximación de las Legislaciones de los estados miembros sobre el material eléctrico destinado a utilizarse con determinados límites de tensión.
- Directiva de Compatibilidad Electromagnética - 2004/108/CEE. Relativa a la aproximación de las Legislaciones de los estados miembros en materia de compatibilidad electromagnética y por la que se deroga la directiva 89/336/CE.
- Directiva ROHS 2011/65/UE. Relativa a las restricciones a la utilización de determinadas sustancias peligrosas en aparatos eléctricos y electrónicos.
- Directiva de Eco-diseño 2009/125/CE. Por la que se instaura un marco para el establecimiento de requisitos de diseño ecológico aplicables a los productos relacionados con la energía.
- Reglamento Nº 1194/2012 de la Comisión, por el que se aplica la Directiva de Ecodiseño-2009/125/CE a las lámparas direccionales, lámparas LED y sus equipos.

- Reglamento CE nº 245/2009, de la Comisión de 18 de marzo por el que se aplica la Directiva 2005/32/CE del Parlamento Europeo relativo a los requisitos de diseño ecológico, para lámparas, balastos y luminarias.
- Reglamento 874/2012 DE LA COMISIÓN de 12 de julio de 2012 por el que se complementa la Directiva 2010/30/UE del Parlamento Europeo y del Consejo en lo relativo al etiquetado energético de las lámparas eléctricas y las luminarias.
- Real Decreto 154/1995, por el que se modifica el Real Decreto 7/1988, de 8 de enero, sobre exigencias de seguridad del material eléctrico destinado a ser utilizado en determinados límites de tensión y su Guía de Interpretación.
- Real Decreto 1890/2008, que aprueba el Reglamento de eficiencia energética en instalaciones de alumbrado exterior y sus instrucciones técnicas complementarias EA-01 a EA-07 y su Guía de Interpretación.
- Real Decreto 842/2002 por el que se aprueba el Reglamento Electro-técnico de Baja Tensión y sus instrucciones Técnicas Complementarias ITC-BT-01 a ITC-BT-51.

Las recomendaciones del Ministerio de Fomento (1999) constituyen una norma cuyo uso en el alumbrado de túneles tiende a desaparecer. Aparece en proyectos y bibliografías antiguos. Parámetros y variables no han cambiado sustancialmente para vías a cielo abierto, pero sí lo han hecho para túneles, dejando obsoleto el documento referido.

El RD 635/2006 se centra más en el alumbrado de seguridad, tanto para la evacuación de vehículos como de personas a pie. El RD 1890/2008 adopta como niveles de referencia los especificados en la publicación CIE nº 88/2004.

Si se considera el alumbrado normal de un túnel tanto en la publicación del CIE como el informe UNE CR 14380 IN (2003), analizan las variables a tener en cuenta a la hora de satisfacer las exigencias normativas y legales en el proyecto técnico de alumbrado del túnel.

3.2.4. Requisitos de Seguridad

- UNE EN 60598-1 Luminarias. Requisitos generales y ensayos.

- UNE EN 60598-2-3 Luminarias. Requisitos particulares. Luminarias de alumbrado público.
- UNE EN 60598-2-5 Luminarias. Requisitos particulares. Proyectoros.
- UNE EN 62493 Evaluación de los equipos de alumbrado en relación a la exposición humana a los campos electromagnéticos.
- UNE EN 62471-2009 Seguridad fotobiológica de lámparas y aparatos que utilizan lámparas.
- PNE-FprEN 62722 Características de funcionamiento de luminarias. Parte 2-1. Requisitos particulares para luminarias LED.

3.2.5. Compatibilidad Electromagnética

- UNE-EN 61000-3-2. Compatibilidad electromagnética (CEM). Parte 3-2: Límites. Límites para las emisiones de corriente armónica (equipos con corriente de entrada 16A por fase).
- UNE-EN 61000-3-3. Compatibilidad electromagnética (CEM). Parte 3: Límites. Sección 3: Limitación de las variaciones de tensión, fluctuaciones de tensión y flicker en las redes públicas de suministro de baja tensión para equipos con corriente de entrada 16A por fase y no sujetos a una conexión condicional.
- UNE-EN 61547. Equipos para alumbrado de uso general. Requisitos de inmunidad CEM.
- UNE-EN 55015. Límites y métodos de medida de las características relativas a la perturbación radioeléctrica de los equipos de iluminación y similares.

3.2.6. Componentes de las luminarias

- UNE-EN 62031. Módulos LED para alumbrado general. Requisitos de seguridad.

- UNE-EN 61347-2-13. Dispositivos de control de lámpara. Parte 2-13: Requisitos particulares para dispositivos de control electrónicos alimentados con corriente continua o corriente alterna para módulos LED.
- UNE-EN 62384. Dispositivos de control electrónicos alimentados en corriente continua o corriente alterna para módulos LED. Requisitos de funcionamiento.
- PNE-FprEN 62717 Módulos LED para iluminación general. Requisitos de funcionamiento.

3.2.7. Requerimientos para la redacción de un proyecto de iluminación en túneles

Para la redacción de un proyecto de iluminación de un túnel deben registrarse con claridad los siguientes parámetros:

- Sección y longitud del túnel.
- Orientación.
- Velocidad.
- Intensidad del tráfico: por hora y carril, en caso de tener registro de IMD se estima en 1/8 de este valor por carril de circulación.
- Tipo de circulación: uno o dos sentidos.
- Análisis de las bocas de entrada: % de cielo, calzada, roca, praderas,...
- Tipo de asfalto empleado (clase R3 normalmente): tipo de paredes y techo con sus valores de reflexividad calculados a nivel de proyecto.
- Condiciones meteorológicas de la zona: para la elección de la calzada en húmedo o seco.
- Sistema de iluminación previsto: simétrico o a contraflujo.

Con estos parámetros definidos las diferentes normas indican diferentes métodos de cálculo de la luminancia en el interior del túnel (zonas: umbral, transición, interior y salida).

La publicación CIE n° 88/2004 establece dos métodos de cálculo:

- Método de contraste percibido.
- Método de la L_{20} .

El informe UNE CR 14380 IN (2003), de publicación anterior al CIE n° 88, cita cuatro métodos de cálculo:

- Método de la L_{20} .
- Método de la L_{20} ponderada con el tráfico.
- Método de luminancia de velo, tal y como se ha utilizado en Holanda.
- Método del espacio y adaptación, tal y como se ha aplicado en Francia.

Los métodos más empleados son el de la L_{20} y la L_{20} ponderada con el tráfico, aunque el resto son tan válidos técnicamente como éstos. Según la crítica que realiza la publicación del CIE, el método L_{20} resulta poco elástico porque su diseño está basado únicamente en la velocidad de circulación, no considera la intensidad del tráfico, por ejemplo, de ahí la necesidad de desarrollo del método con la misma base y ponderado en función del tráfico, del que tampoco se considera su tipología, uno o dos sentidos, etcétera.

3.3. Diseño de Instalación de Iluminación en túneles

3.3.1. Caracterización de túneles cortos

Los túneles cortos son aquellos en los que se puede contar con la luz solar diurna para que su penetración contribuya, parcial o completamente, a la iluminación del túnel.

Los de menor longitud se estudian por debajo del parámetro de 25 metros de longitud, éstos no requieren sistema de iluminación diurnos y en ellos suele ser visible la salida desde una distancia a la boca de entrada igual a la distancia de frenado (DS). Para otras longitudes de túneles se diseñan sistemas de iluminación diurnos que pueden estar en servicio durante todas las horas del día (alumbrado completo), algunas de ellas (alumbrado limitado) o responder a exigencias equivalentes en iluminación a la de los túneles largos.

3.3.2. Caracterización de túneles largos

En los túneles largos el conductor tarda en apreciar la luz a través del túnel, no puede observarla una vez superada la zona umbral de entrada. Una vez clasificado como largo el túnel se diferencia en clases en función de tres grandes grupos:

- Confort o comodidad visual.
- Configuración del guiado visual.
- El tráfico.

3.3.3. Estudio en función del tráfico

Acometer el estudio de iluminación en túneles largos en función del tráfico permite realizar un análisis según las siguientes variables:

- Cantidad del tráfico.
 - Intensidad del tráfico rodado.
 - Velocidad de circulación vial.
- Calidad del tráfico.

3.3.4. Estudio en función de la cantidad de tráfico

El aumento de la luminancia en el túnel puede paliar, en parte, la relación exponencial entre la intensidad del tráfico y el riesgo de accidente vial. Por lo general la primera variable afectada es la distancia de seguridad. El caso es similar al aumento de la velocidad del tráfico fluido con menor intensidad, porque afecta de la misma manera a la distancia de seguridad. Cabe actuar sobre una mejora del periodo de percepción y eso se consigue aumentando la iluminancia de la zona del túnel afectada.

Se definen pesos o factores de ponderación según la intensidad del tráfico en número de vehículos por hora, medido en cada carril [n° vehículos/h. carril]. Se diferencia entre uno y dos sentidos del tráfico en la misma dirección.

Tabla 3.3. Pesos en función de la cantidad de tráfico.

Pesos en función de la cantidad de tráfico		
Un sentido	Dos sentidos	Peso
Intensidad		
<60	<30	0
60-100	30-60	1
100-180	60-100	2
180-350	100-180	3
350-650	180-350	4
650-1.200	350-650	5
>1.200	650-1.200	6
	>1.200	7

3.3.5. Estudio en función de la calidad del tráfico

La heterogeneidad del tráfico afecta a la conducción y a su seguridad. La presencia relativa de camiones, motocicletas, autobuses y coches de diferentes pesos y características de diseño (berlinas, monovolúmenes, todo-caminos, todo-terrenos, deportivos, etc.) aconseja introducir en el análisis de iluminación del túnel diferentes pesos, según la tabla adjunta. Se debe tener en cuenta, además, la posible presencia (o no, caso de estar prohibido en la vía o el túnel) de vehículos de transporte de mercancías peligrosas.

Mayor heterogeneidad significa mayor dificultad visual y menor seguridad vial. Es importante valorar la gravedad de posibles accidentes, que alcanza su mayor potencial cuando en la variedad del tráfico incluye mezcla de vehículos motorizados con no motorizados, por ejemplo vehículos pesados con bicicletas. Las diferencias entre pesos máximos y mínimos de los vehículos en el tráfico mixto (camiones o autobuses con motocicletas) o la presencia del elemento más débil del tráfico vial, el peatón, conducen, del mismo modo, a condiciones extremas de aplicación de estos pesos.

Tabla 3.4. Pesos en función de la calidad del tráfico.

Pesos en función de la calidad del tráfico	
Tráfico motorizado	0
Tráfico motorizado (pesados >15%)	1
Tráfico mixto	2
Tráfico mixto (presencia no motorizados) *	3

(*) Propuesta en este manual.

3.3.6. Estudio en función de la configuración del guiado visual

La percepción que, del túnel, tenga el conductor es la clave sobre su conducción guiada dentro de éste. Para facilitar la correcta orientación del vehículo es una buena práctica de diseño guiar por contrastes longitudinales paralelos al eje mayor de la vía enterrada. Un techo oscuro y unas paredes claras pueden ser una solución correcta.

Esta variable de diseño goza de mayor importancia cuanto más baja es la baliza en altura del túnel y en los momentos de aproximación del vehículo al túnel.

Un guiado visual bien diseñado supone un menor esfuerzo de diseño y gasto energético y de material en iluminación. La comparación de pesos sugiere un peso de valor dos, relativo al peso cero que se asocia a un buen guiado longitudinal.

No solo es importante la mejora de la percepción del camino correcto en el túnel (eje longitudinal), también que en el paso por el mismo resulten claramente apreciables y diferenciables las señales verticales y horizontales.

Entre los instrumentos de guiado visual empleados en los túneles se encuentran los hitos, captafaros, catadióptricos, reflectantes, etcétera. En las clases de mayor exigencia lumínica⁷ aparecerán señales horizontales en el suelo (por ejemplo retro-reflectantes), que también pueden disponerse en las paredes.

⁷ Clases 5,6 y 7. Véase tabla en el apartado "Clasificación de túneles largos según sus exigencias de iluminación".

Tabla 3.5. Pesos según el guiado visual.

Pesos según guiado visual	
Guiado	Peso
Bueno	0
Pobre	2

3.3.7. Estudio en función del confort en la conducción

En un túnel bien iluminado el conductor no tiene que realizar ningún esfuerzo para adaptar su conducción respecto a la vía con luz natural.

Se trata de una meta difícil de alcanzar, pero los pesos en este apartado se otorgan según la clasificación de los túneles en función del confort visual de diseño requerido por el conductor.

Tabla 3.6. Pesos en función de la comodidad en la conducción.

Pesos en función de la comodidad en la conducción	
Confort requerido	Peso
Bajo	0
Medio	2
Alto	4

3.3.8. Clasificación de túneles largos según sus exigencias de iluminación

Las clases de túneles en función de sus exigencias de alumbrado se consiguen otorgando un peso a cada una de ellas y ordenándolas según este número, que se obtiene de la suma aritmética directa de los pesos definidos para el confort requerido en el campo visual, la cantidad, su calidad y el guiado visual. Se obtiene la siguiente relación:

Tabla 3.7. Clase de túneles largos por requerimientos de iluminación.

Clase de túneles largos por requerimientos de iluminación	
$P_I + P_T + P_G + P_C$	Clase
0 a 3	1
4 a 5	2
6 a 7	3
8 a 9	4
10 a 11	5
12 a 13	6
14 a 15	7

3.3.9. Reglas de cálculo

En el Anejo de Cálculo Luminotécnico⁸ de un proyecto de iluminación debe incluir los cálculos correspondientes a la determinación de los parámetros lumino-técnicos necesarios según las publicaciones 189:2010 y 140:2000 de la CIE, que son los siguientes:

- Luminancia de la superficie de la calzada.
- Iluminancia de la superficie de la calzada.
- Luminancia de pared L_w en ambas paredes (hasta una altura de 2 m).
- Iluminancia de pared E_w (vector normal al plano de la superficie de la pared) en ambas paredes.
- Iluminancia vertical E_v (vector normal del plano de evaluación vertical paralelo al eje longitudinal de la calzada y dirigido hacia el conductor) a una altura de 10 cm. sobre la superficie de la calzada.

Los cálculos de luminancias pueden dividirse en dos:

- Luminancia media en calzada y paredes → en las zonas con nivel constante: primera parte de la zona umbral y zona interior.

⁸ Capítulo 4 de las Recomendaciones para la Iluminación de Túneles.

- Media transversal de la luminancia en calzada y de las paredes en cada eje de cálculo transversal → en las zonas con nivel variable: segunda parte de la zona umbral, zona de transición y zona de salida.

Para la depuración esperada de cálculos no existen datos suficientes de reflexión para dos direcciones para las superficies que componen el túnel. Se disponen de los datos de reflexión de la calzada en una dirección derivada 1 grado por debajo de la horizontal y para las paredes apenas se conocen datos aislados para la elaboración de tablas de referencia con alto nivel de resolución y fiabilidad.

No hay tablas normativas para las reflexiones bi-direccionales ni están estandarizados los cálculos de luminancia de paredes e inter-reflexiones en éstas. La mayoría de los cálculos evaluados, que se han estimado en la elaboración de proyectos, no resultan realistas una vez puesto en servicio el sistema. Comparado con la luminancia procedente de las luminarias, las inter-reflexiones de calzada y paredes resultan de varios órdenes de magnitud menor, así se descarta el valor crítico de estas variables. Aunque pudiera haber casos en los que supusieran un ahorro destacable, no es el caso general de las instalaciones que se realizan en la actualidad. Tal vez cuando los cálculos se depuren se termine adaptando la infraestructura a sus efectos con el fin de un máximo ahorro y eficiencia.

Lo expuesto justifica que se hable de recomendaciones y no de normas. Entre aquellas se recurre a la ley de Lambert para manejar el concepto de reflexión difusa respecto a las superficies que conforman el túnel.

3.3.10. Sistema a contraflujo

En el caso particular de este sistema asimétrico con aplicación en túneles con superficies parcialmente especulares las recomendaciones para el cálculo de las inter-reflexiones resultan especialmente alejadas de la realidad. El efecto se extiende a la evaluación de los componentes de inter-reflexión de la luminancia vertical, necesaria para confirmar el rendimiento de los sistemas de alumbrado a contraflujo.

En este tipo de sistema el componente directo de luminancia vertical que procede de las luminarias es pequeño comparado con los componentes indirectos que proceden de la superficie de paredes y de calzada. El coeficiente de revelado de contraste requiere contar con las aportaciones de calzada y paredes para resultar fiable.

3.3.11. Convenios

Las recomendaciones sobre cálculos, por no poderse basar en datos que se correspondan satisfactoriamente con la realidad, se han procurado estandarizar por apoyo en determinados convenios.

Según el convenio adoptado para cálculos el nadir del sistema de coordenadas es fijado en el portal del túnel, por ejemplo en el borde derecho de la calzada o en cualquier otro punto conveniente y en la superficie de la carretera. La coordenada x indica la distancia desde el portal en la dirección de conducción, la coordenada z indica la altura sobre el plano de superficie de la carretera.

Se atiende a las siguientes hipótesis básicas para el cálculo:

- Las paredes son cilíndricas (caso de túneles abovedados) o rectangulares (resto). Las formas y superficies reales se simplificarán a la más próxima de las propuestas.
- Las luminarias son consideradas focos puntuales de luz. Cuando se trata de una fuente de gran superficie se dividirá en unidades puntuales. Los datos tabulados para la intensidad luminosa de dan en cd/klm .

3.3.12. Componentes procedentes de las luminarias

El cálculo de la componente directa de la luminancia procedente de las luminarias debería atender a las siguientes recomendaciones⁹.

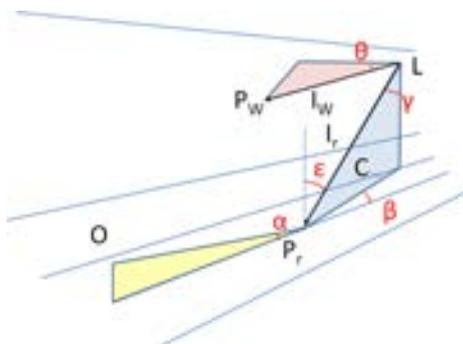


Figura 3.5. Geometría para cálculos.

⁹ Basarse en las reglas de la publicación CIE 140-2000.

En la Fig. 3.5 se muestra la geometría para luminancia y cálculos de iluminancia de acuerdo con la publicación CIE 140-2000. En ésta se diferencian:

P_r = Punto de cálculo en la calzada.

P_w = Punto de cálculo en la pared.

L = Luminaria.

O = Posición del observador.

C, γ = Coordenadas angulares de la tabla I.

β, γ = Coordenadas angulares de la tabla R.

ε = Ángulo que forman el vector de intensidad luminosa y el vector perpendicular a la superficie de la calzada.

θ = Ángulo que forman el vector de intensidad luminosa y el vector perpendicular a la superficie de la pared.

α = Ángulo de observación (1°).

3.3.13. Superficie de la calzada

La luminancia de la carretera L_r viene dada por:

$$L_r = \frac{r(\beta, \gamma) - E_r}{\cos^3 \varepsilon} = \frac{r(\beta, \gamma) \cdot I_r(C, \gamma)}{d_r^2 \cdot \cos^3 \varepsilon}$$

donde:

r = Coeficiente de luminancia reducido.

β, γ = Coordenadas angulares de la tabla R.

E_r = Iluminancia horizontal en el punto P.

d_r = Distancia desde la luminaria L al punto P, en la carretera.

I_r = Intensidad luminosa en la dirección LP.

C, γ = Coordenadas angulares del vector de intensidad luminosa a la calzada.

ε = Ángulo entre el vector de intensidad luminosa y el vector perpendicular a la superficie de la calzada.

La iluminancia horizontal E_r en el punto P es:

$$E_r = \frac{I_r(C, \gamma)}{d_r^2} \cdot \cos \varepsilon$$

donde:

- d_r , es la distancia desde la luminaria L al punto P, en la calzada.
- I_r , la intensidad luminosa en la dirección LP.
- C, γ , las coordenadas angulares del vector de intensidad luminosa a la calzada.
- ε , el ángulo que forman el vector de intensidad luminosa y el vector perpendicular a la superficie de la calzada.

La iluminancia vertical E_v en el centro del objeto estándar (punto P_r , 10 cm. por encima del punto de carretera P_r) viene dada por:

$$E_v = \frac{I_0(C, \gamma)}{d_0^2} \cdot \cos \theta$$

donde:

- d_0 , es la distancia desde la luminaria L al centro del objeto estándar.
- I_0 , la intensidad luminosa en la dirección LP_{10} .
- C, γ , las coordenadas angulares del vector de intensidad luminosa al punto P_{10} .

- θ , el ángulo entre el vector de intensidad luminosa y el sentido de conducción (que no aparece en la figura 3.5).

3.3.14. Paredes

Se muestran las recomendaciones de cálculo para la iluminancia y la luminancia de la pared. La iluminancia responderá al cálculo:

$$E_w = \frac{I_w(C', \gamma')}{d_w^2} \cdot \cos \theta$$

La luminancia de la pared se calcula por la expresión:

$$L_w = \frac{\rho_{dif} \cdot E_w}{\pi} = \frac{\rho_{dif} \cdot I_w(C', \gamma')}{\pi \cdot d_w^2} \cdot \cos \theta$$

donde:

- d_w , es la distancia desde la luminaria L al punto P_w en la pared.
- I_w , es la intensidad luminosa en la dirección LP_w .
- C', γ' , las coordenadas angulares del vector de intensidad luminosa hasta la pared.
- ρ_{dif} , es la reflexión difusa de la pared.

La aplicación de las expresiones anteriores requiere la atención a las siguientes consideraciones:

Si existen tablas de reflexión disponibles para las paredes, deberían usarse fórmulas similares a las ecuaciones para la luminancia de la calzada y la iluminancia de la calzada.

Los ángulos de observación para las paredes son dependientes de la posición lateral del observador (coordenada y).

3.3.15. Inter-reflexiones

Excepto la iluminancia vertical en instalaciones con alumbrado a contraflujo, las contribuciones de los componentes de inter-reflexión no son apreciables frente a los valores aportados por las luminarias. Esta es la razón por la que no se recurre a términos más allá de los referidos a la primera reflexión. En la Fig. 3.6 se toma¹⁰ un ejemplo de cálculo de la inter-reflexión.

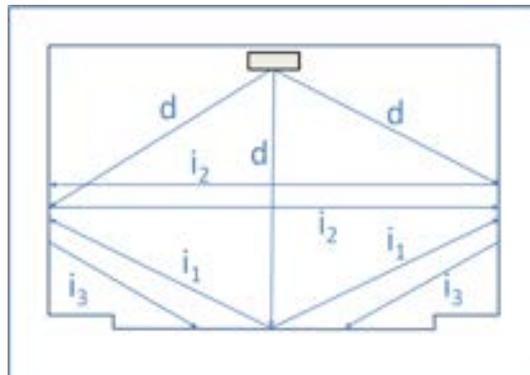


Figura 3.6. Cálculo de la inter-reflexión.

En la hipótesis de cálculo se considera que un elemento de área dF de la primera superficie iluminada actúa como una fuente secundaria para iluminar la segunda superficie con una intensidad luminosa I_r , como muestra la Fig. 3.7. El flujo luminoso total reflejado por los elementos de superficie es descrito por las intensidades luminosas de una fuente puntual situada en su centro.

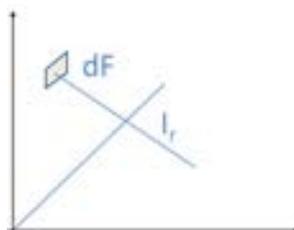


Figura 3.7. Dirección de la intensidad luminosa.

¹⁰ Recomendaciones para el alumbrado en túneles. Serie Normativa. Tomo II. Gobierno de España.

El flujo luminoso total reflejado por los elementos de superficie es descrito por las intensidades luminosas de una fuente puntual situada en su centro. El cálculo de la cantidad total de los componentes indirectos conduce a una integración numérica sobre el área total iluminada de las superficies reflectantes.

El cálculo de los valores de inter-reflexión para la iluminancia vertical en un túnel con alumbrado a contraflujo es la parte más crítica. En primer lugar, el factor de reflexión ha de ser cuidadosamente determinado.



Figura 3.8. Iluminancia vertical sobre un objeto.

En la Fig 3.8 aparece una representación de la iluminancia vertical sobre un objeto, aparece el segundo problema que es la formación de sombras de la zona de calzada situada enfrente del objeto. Debido a las cortas distancias y a la ley de la inversa del cuadrado, la parte más próxima de la calzada da la mayor contribución a la iluminancia vertical sobre el objeto. Despreciando el efecto de formación de sombra da como resultado valores de iluminancia vertical que son demasiado elevados. La evaluación correcta de la formación de sombra sería el cálculo del área sombreada sobre la calzada para cada luminaria con coordenadas x mayores que el obstáculo sobre el que incide el haz de estudio.

3.3.16. Uniformidad longitudinal en la zona de transición

La publicación CIE 140-2000 da lugar a un concepto formal de uniformidad longitudinal; sin embargo, ésta sólo resulta aplicable en secciones con valores de luminancia constantes en la dirección de conducción, como en la primera parte

de la zona de umbral y en la zona interior. En estas zonas, la uniformidad de luminancia longitudinal es calculada como en carreteras a cielo abierto, de acuerdo con la citada publicación.

El cálculo de la uniformidad longitudinal en las zonas con luminancia variable no es significativo. Esto ocurre en la segunda parte de la zona umbral y en la de transición, donde la iluminancia depende de la distancia desde la boca de entrada hasta alcanzarlas.

3.3.17. Cálculo del incremento de umbral

El cálculo desde la luminaria más próxima situada a 20° sobre el observador a la posición del punto para la luminancia de calzada a 60 metros resulta difícilmente aplicable, por falta de longitud suficiente, en la zona umbral y la de transición. Se calcula el incremento de umbral en esas zonas. Éste debe realizarse desde cada punto de observación longitudinal de la cuadrícula de cálculo para un observador en movimiento.

En las zonas con luminancia constante a lo largo del tramo se aplican los mismos cálculos que en las vías a cielo abierto.

3.3.18. Campos de cálculo

Los campos de cálculo se seleccionan con el método de cuadrícula regular de dos dimensiones con muestreo equidistante de un periodo entre dos luminarias¹¹; sin embargo, la citada estrategia no se puede aplicar en todos los tramos. Debe tenerse en cuenta que:

- En la zona de umbral, las distancias entre luminarias son normalmente más cortas que en carreteras a cielo abierto.
- En la zona de transición, si se ha realizado con separación variable entre luminarias, la regla de muestreo equidistante de periodo de luminancia no puede ser satisfecha.

¹¹ Siguiendo las mismas reglas generales que en la publicación CIE 140-2000.

- Excepto para túneles cortos, la longitud del campo de cálculo necesaria es normalmente más larga que el campo dado por los límites angulares recomendados de observación ($0,5^\circ$ - $1,5^\circ$) y no es aplicable el cálculo con un punto de observación fijo. Por ello debería aplicarse el principio de observador en movimiento.

Las recomendaciones al respecto son:

- La distancia longitudinal entre los puntos de la cuadrícula de cálculo esté entre 2 y 3 m.
- El número de puntos de cuadrícula en sentido transversal sea de 3 puntos por carril o cualquier número mayor e impar.
- Para el cálculo de secciones del túnel con niveles de alumbrado constante (primera parte de la zona de umbral, zona interior), el número de puntos de la cuadrícula en sentido longitudinal sea 7 o más y que el número de puntos de cálculo N en sentido longitudinal y el número de separación entre luminarias n no tengan un divisor común, para evitar el escaneado múltiple de la separación entre luminarias con resolución menor.
- Para el cálculo de las contribuciones indirectas, la contribución directa debería ser calculada sobre un área auxiliar lo suficientemente grande enfrente y por detrás de la cuadrícula de cálculo.

3.3.19. Comprobación del balance de flujo

Si se considera un espacio cerrado, en éste la suma de todos los flujos luminosos emitidos es igual a la suma de los flujos luminosos que inciden directamente sobre todas las superficies interiores, que se evalúan a partir de las distribuciones de iluminación directa calculada en todas las superficies circundantes (incluyendo la sección transversal de entrada y salida).

Una técnica válida es la de comparar el comportamiento del túnel con el de un volumen cerrado como el descrito. La diferencia entre el flujo luminoso emitido y el que incide sobre la suma de las superficies se considera una medida directa de la validez de la fiabilidad de los cálculos, menos útiles cuanto más grande es la diferencia.

Los motivos fundamentales de los errores cometidos en los cálculos son:

- La invalidez parcial de la ley de la inversa del cuadrado,
- un número insuficiente de puntos de cálculo, o
- una distribución inapropiada de puntos de cálculo con relación a las luminarias.

3.4. Iluminación en túneles largos

Los túneles en los que el conductor no tiene una percepción longitudinal de la luz natural diurna, se zonifican para proceder al análisis de la iluminación que requieren técnicamente. Esta división en zonas es compatible con un diagrama en ejes coordenados en el que las abscisas siguen el sentido de la dirección del tráfico y las ordenadas miden la luminancia en cada tramo.

Como se aprecia en la ilustración, las luminancias se suelen representar por:

- L_{20} : luminancia en la zona de acceso.
- L_{th} : luminancia en la zona umbral.
- L_{tr} : luminancia en la zona de transición.
- L_{int} : luminancia en la zona interior del túnel.
- L_{ext} : luminancia en la zona exterior del túnel.

Las variables fotométricas fundamentales para el análisis requerido son:

- Luminancia de la calzada.
- Luminancia en los primeros dos metros de altura de las paredes.
- Homogeneidad en la distribución de luminancia en calzada y paredes.
- Limitación del deslumbramiento.
- Control del efecto *Flicker*.

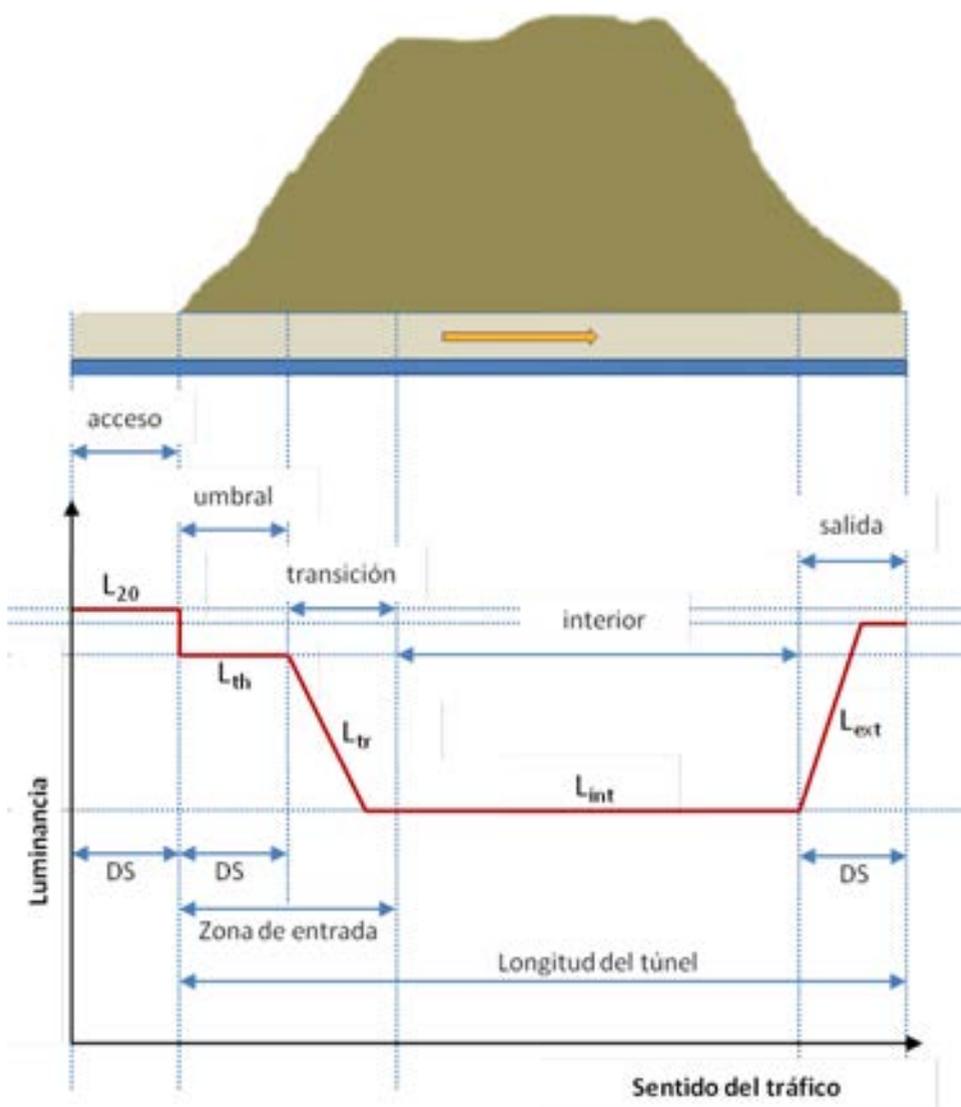


Figura 3.9. Zonificación del túnel.

3.4.1. Luminancia de la zona de acceso

La zona de acceso se define como la única a considerar en el diseño de la iluminación en éste que se encuentra a cielo abierto. Su longitud es equivalente a la distancia de seguridad definida para la vía y su determinación requiere que

desde esa distancia el conductor del vehículo pueda apreciar con cierta calidad un objeto situado en la zona de entrada al túnel. La definición de la zona L_{20} está directamente afectada por el entorno natural de la zona de acceso (orografía, hora solar, estación natural, meteorología, etc.). De todos los valores posibles que puede tomar a lo largo del año L_{20} se toma el valor máximo que se da con una frecuencia suficiente y a una distancia de la boca del túnel igual a la de seguridad.

Los métodos de mayor éxito para calcular L_{20} son empíricos; aunque pueden encontrarse más, se exponen aquí los más extendidos: método de aproximación y método exacto.

3.4.2. Método exacto

Se define un campo visual en forma de cono con un ángulo del 20%, vértice localizado en el ojo del conductor, colocado a una distancia igual a la distancia de seguridad y orientando el cono hacia la boca del túnel a una cuarta parte de su altura.

L_{20} no solo es importante por sí misma, sino que condiciona la luminancia de la zona umbral, entre otras consecuencias, por lo que su cálculo debe afinarse lo más posible. Para definir la situación concreta en cada caso se reproduce el escenario de la zona de acceso al túnel en un croquis, render, fotografía general o similar. Sobre el mismo se definen las variables necesarias para aplicar la siguiente fórmula física:

$$L_{20} = a.L_C + b.L_R + c.L_E + d.L_{th}$$

donde,

L_C = Luminancia del cielo.

L_R = Luminancia de la vía.

L_E = Luminancia del entorno.

L_{th} = Luminancia de la zona umbral.

a : tanto por uno de cielo presente en el croquis o imagen generada.

- b: tanto por uno de carretera (vía) en el croquis o imagen generada.
- c: tanto por uno de entorno (resto de espacios) en el croquis o imagen generada.
- d: tanto por uno de boca del túnel en el croquis o imagen generada.

La definición de entorno (resto de los espacios, que no son ni boca de túnel, ni vía, ni cielo) determina que:

$$a + b + c + d = 1$$

Aunque se ha presentado L_{20} como variable despejada en la expresión utilizada, la variable a definir es la luminancia de la zona umbral, puesto que la del acceso viene definida por la distancia de seguridad de la vía. Si la distancia de parada de diseño es superior a 100 metros el porcentaje de boca del túnel es escaso, por debajo del diez por ciento (<10%) y como la contribución de la luminancia de la zona umbral ha de ser menor que la del resto de los elementos, ésta puede despreciarse en este caso específico ($DS > 100$ m.).

Estimación de luminancias (método exacto L_{20})						
Sentido de la conducción	L_c kcd/m ²	L_r kcd/m ²	L_e kcd/m ²			
			Roca	Edificios	Nieve	Vegetación
N	8	3	3	8	15	2
E-O	12	4	2	6	10(V), 15(H)	2
S	16	5	1	4	5(V), 15(H)	2

Figura 3.10. Método exacto.

Los valores de a, b, c y d se definen con los croquis referidos (véase Fig. 3.11). Si no se dispone de valores de luminancias existen tablas a las que recurrir para estimar sus valores. Se muestra aquí una de estas referencias.

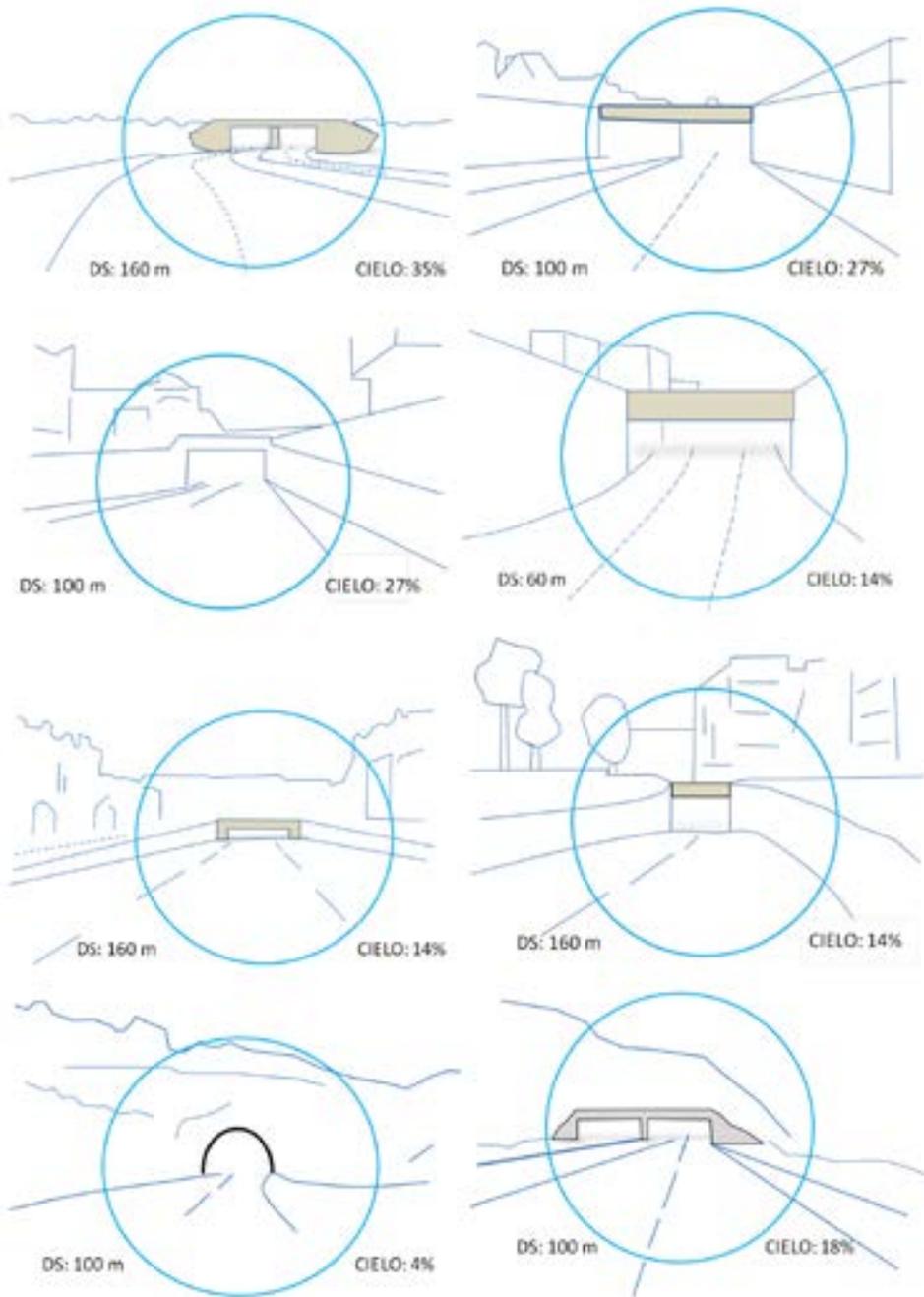


Figura 3.11. Diferentes accesos a túneles y pasos.

3.4.3. Método de aproximación

Es el método a aplicar cuando se reconoce que no existen datos más finos sobre la boca del túnel apreciada desde la distancia de seguridad o frenado del vehículo. En ese caso se procede a una estimación según la tabla adjunta donde:

1. Es un efecto función de la orientación de la boca del túnel. Para el hemisferio norte:
 - B: bajo → entrada sur (el tráfico se mueve hacia el norte).
 - A: Alto → entrada norte (el tráfico se mueve hacia el sur).

Para entradas con otras direcciones se interpolarán valores según ángulo de orientación con referencia en los citados. Por ejemplo si se da una orientación NE pura, se puede dividir la media circunferencia Este de la brújula (entre N y S) en cuatro partes, dándole peso 3/4 a la influencia del norte y peso 1/4 a la del sur, de manera que podría calcularse (situación normal, con el 35% de cielo):

$$O_{NE} = \left(\frac{3}{4}\right) \cdot O_N + \left(\frac{1}{4}\right) O_S = 0,75 \cdot 6 + 0,25 \cdot 4 = 5,5$$

Donde O es el efecto de orientación y sus subíndices son indicativos de la dirección.

2. Efecto que se produce en función del brillo procedente del entorno:
 - B: bajo → reflectancia del entorno baja.
 - A: alta → reflectancia del entorno alta.
3. Mismas consideraciones que en la categoría (1), a la inversa.
4. Para distancias de seguridad cortas no resulta aplicable el valor en condiciones de cielo porcentaje de cielo del 35%. La poca altura del campo de visión cónico y su ángulo de amplitud (veinte grados) son las condiciones geométricas que limitan esta variable.

Tabla 3.8. % cielo en campos de visión.

Tipo de vía	% cielo en campos de visión (cónico 20o)															
	35%				25%				10%				0%			
	Normal		Nieve		Normal		Nieve		Normal		Nieve		Normal		Nieve	
	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A
Situación de brillo en el campo de visión	(1)		(1)		(1)		(1)		(2)		(3)		(2)		(3)	
Distancia de seguridad de 60 m.	(4)		(4)		4	5	4	5	3	4	3	4	2	3	2	4
Distancia de seguridad de 100 a 160 m.	4	6	4	6	4	6	4	6	3	5	3	5	3	5	3	5

3.4.4. Niveles de iluminación en la zona umbral

En una definición extendida el término L_{th} se entiende como la luminancia media en servicio de la superficie de la calzada con mantenimiento de la instalación. Su valor de diseño es función directa de la luminancia de la zona de acceso, previa a la boca física del túnel, relación que se recoge en la expresión:

$$L_{th} = k \cdot 10^3 \cdot L_{20}$$

Lógicamente la luminancia en la zona umbral debe ser superior (la luz diurna contribuye en menor medida que en la zona de acceso) a la de acceso, lo que limita los valores de k por encima de 1. En la práctica el coeficiente presenta valores entre 10×10^3 y 100×10^3 , de manera que cómo mínimo la luminancia en la zona umbral será al menos diez mil veces superior a la considerada para la zona de acceso. El coeficiente k es función de tres variables: el sistema de iluminación empleado en la zona considerada (simétrico o a contraflujo), las exigencias de iluminación del túnel (clase) y la distancia de seguridad en cada caso.

Tabla 3.9. k para contraflujo y simétrico.

k						
Sistema de alumbrado	Contraflujo			Simétrico		
	Distancia de seguridad (m)			Distancia de seguridad (m)		
	60	100	160	60	100	160
Clase						
1	10	15	30	15	20	35
2	15	20	40	20	25	40
3	20	30	45	25	35	45
4	25	35	50	30	40	50
5	30	40	55	35	50	65
6	35	45	60	40	55	80
7	40	50	70	50	60	100

En la aplicación de la tabla anterior debe considerarse que:

- Para distancias de seguridad o de parada (DS) comprendidas entre las señaladas (60-100 y 160 m), los valores del factor (k) se obtienen por interpolación lineal entre las cifras establecidas en la tabla.
- Los valores del factor (k) para el sistema de alumbrado a contraflujo se han determinado para garantizar, en la mayor parte de las circunstancias, un grado de seguridad y comodidad al menos comparable al logrado con el sistema de alumbrado simétrico.
- Las distancias de seguridad o parada de 60, 100 y 160 m equivalen respectivamente a velocidades de diseño del túnel de 60, 80 y 100 km/h.

3.4.5. Evolución de L_{th} en la longitud de la zona umbral

La zona umbral nunca se diseña con una longitud menor que la de frenado o seguridad, ese es el límite inferior de su valor y suele ser el valor de diseño más aplicado. Una vez establecida la longitud umbral de túnel, ya fuera coincidente con la de seguridad o algo mayor, según el criterio del diseñador, ésta se divide

en dos mitades. En la primera mitad según el sentido de la circulación se mantiene el valor calculado para L_{th} , porque esta zona se considera en espacio crítico del umbral; en la otra mitad se puede proceder a una disminución paulatina del valor máximo hasta que éste quede reducido en un 60%, es decir, en el último plano (perpendicular a la calzada y a la dirección del tráfico) que atraviesa el vehículo en la zona umbral y antes de comenzar la zona de transición, debe mantenerse una luminancia residual del cuarenta por 40% de la empleada para iluminar la primera mitad del túnel.

Debe quedar garantizado el carácter gradual del gradiente negativo de luminancia en la segunda mitad de la zona umbral, para lo que se acude a la recomendación de que no se reduzca, en esa graduación escalonada, más de un tercio de la luminancia de un paso al siguiente.

Las paredes se zonifican longitudinalmente. En sus primeros dos metros mantendrán la misma luminancia que la zona umbral con la que se corresponde.

3.4.6. Luminancia en la zona de transición

La zona de transición queda determinada entre el fin de la zona umbral y el comienzo de la interior del túnel. La luminancia de esta zona juega el papel de adaptación entre la de origen (umbral) y la de destino (interior). La velocidad es el parámetro de diseño fundamental porque con ella varían las distancias recorridas en el mismo periodo y eso marca el tiempo de adaptación del conductor a la nueva iluminación.

La tendencia lumínica a la baja desde la segunda mitad de la zona umbral se mantiene en este tramo de transición (Fig. 3.12), sin embargo la derivada negativa no se mantiene en los mismos valores, sino que se va corrigiendo hacia una tendencia de decrecimiento menor. Las luminancias mínimas en la zona de transición son las que se muestran en la ilustración adjunta, que se ha confeccionado bajo parámetro técnicamente y depurado con datos empíricos reales derivados de registros de la adaptación del ojo humano de una alta luminancia a niveles bajos de ésta.

La función matemática que se aproxima con mayor precisión y que permite un manejo adecuado y sencillo es:

$$L_{tr} = L_{th} \cdot (1,9 + t)^{-1,428}$$

donde, t es el tiempo (segundos).

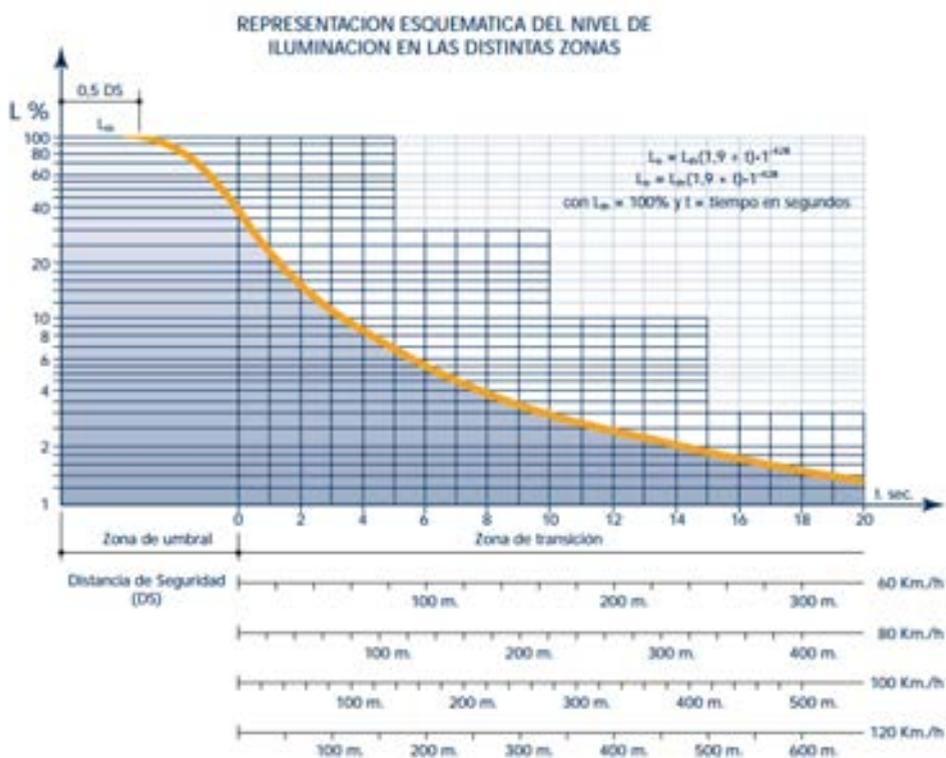


Figura 3.12. Nivel de iluminación en las distintas zonas. Fuente: Luminotecnia.

Aunque la tendencia en su disminución (en los valores mínimos) debe es a estabilizarse, el máximo descenso gradual permitido técnicamente se cifra en escalones contiguos de un tercio, como en la segunda mitad del tramo anterior. Se limita la luminancia de salida de la zona de transición al triple de la que se dispondrá en la zona interior del túnel.

Las paredes, entendidas éstas hasta una altura de dos metros del suelo, mantendrán los mismos niveles de luminancia que la calzada con la que comparten tramo, como mínimo.

3.4.7. Iluminación de la zona de interior

Las dimensiones longitudinales son las que corresponden a la distancia entre la zona de transición y la de salida. Se trata de lo que podría llamarse túnel *per se*, el cuerpo central del túnel.

Desde el punto de vista de la fisiología del órgano visual humano, la zona interior del túnel es aquella en la que el ojo ya se ha adaptado a la nueva circunstancia lumínica, por lo que en este tramo la luminancia se mantiene constante hasta la zona de salida. Las paredes reciben la misma consideración que en los casos anteriores: en sus dos primeros metros de altura mantendrán la misma luminancia que la calzada con la que se corresponde en cada sub-tramo de análisis.

Las luminancias de referencia, en candelas por metro cuadrado, estimadas para la zona interior del túnel se exponen en la Tabla 3.10.

Tabla 3.10. Luminancia de la zona interior.

Luminancias L_{int} (cd/m ²)			
Clase del túnel	Distancia de seguridad (m)		
	60	100	160
1	0,5	2	3
2	1	2	4
3	2	3	5
4	2	3	6
5	2	4	6
6	3	5	8
7	3	6	10

Sabido que se trata del tramo del túnel con una iluminación más baja, denominada luminancia base del túnel, se establecen los requerimientos mínimos que ha de cumplir el sistema de iluminación en el tramo interior:

- Visibilidad de cualquier obstáculo eventual sobre la calzada a una distancia como mínimo igual a la distancia de seguridad, teniendo en cuenta la opacidad de la atmósfera del túnel debido a los gases de escape de los vehículos.

- Guiado sin ambigüedades.
- Buena calidad del ambiente luminoso (efecto psicológico importante sobre todo en los túneles muy largos).

Ningún tramo, zona o sub-tramo del túnel mantendrá unos niveles de luminancia media por debajo de los obtenidos en el cálculo de L_{int} .

3.4.8. Iluminación de la zona de salida

Es esta zona se pasa de la menor de las luminancias del túnel (tramo interior) a un tramo con elevada penetración de la luz diurna. Vuelven a tener importancia los fenómenos de adaptación del ojo del conductor.

El límite inferior de la zona de salida es el final del tramo interior y su límite final es la boca de salida del túnel. El nivel de luminancia en esta zona (L_{ext}) se diseña con el fin de iluminar directamente los vehículos y hacia ellos se orienta. La experiencia y los estudios ópticos indican que, a la salida del túnel, los vehículos ligeros quedan ocultos entre los más pesados o voluminosos. El hecho de iluminar directamente sobre los elementos móviles del tráfico responde a la necesidad de reducir al máximo este fenómeno provocado por la acción sinérgica de la escasa luminancia del interior del túnel y el deslumbramiento de la luz diurna que ya penetra.

Los niveles de referencia permiten, además, la correcta visión de los conductores en el sentido contrario al de circulación, esto es, por el uso de retrovisores, efecto especialmente importante cuando se teme por la distancia de seguridad, tanto cuando ésta debe aumentarse (calzada mojada, por ejemplo en túneles con filtraciones) o altas intensidades de tráfico.

Fisiológicamente la adaptación a mejor iluminación, como la que se da de la luminancia interior (L_{int}) a la luminancia de salida (L_{ext}), es notablemente más rápida y ágil que al contrario. Se confirma que la acomodación del ojo en este caso no es una variable de importancia.

Por lo general, en túneles de las clases 1 a 5 (incluidas) no se requiere multiplicación alguna de la luminancia del interior al pasar a la zona de salida, precisamente por la buena predisposición del ojo humano a volver a percibir luz diurna; sin embargo, deben considerarse las medidas de aumento gradual de la iluminación en la zona de salida en túneles de esta clase cuando aparezcan posibles

fenómenos extraordinarios de deslumbramiento, molestias ópticas, etc., derivadas, por ejemplo, del mal diseño de la boca del túnel o su incorrecta orientación solar. En estos casos el técnico deberá ser capaz de variar fundamentadamente la clase del túnel hasta la que corresponda a una aplicación múltiple de luminancia, por ejemplo elevándolo hasta las clases 6 ó 7 para tratarlos como se indica a continuación.

Las generalidades expuestas sobre la luminancia L_{ext} no son suficientes cuando se trata de cubrir las necesidades de las clases 6 y 7 unidireccionales, casos en los que la luminancia del final de la zona interior debe aumentarse gradualmente hasta los 20 primeros metros en los que se debe multiplicar por 5 la luminancia de entrada en el tramo. Teniendo en cuenta que la distancia de seguridad marca el mínimo de longitud del tramo y lo descrito, se puede escribir:

$$L_{ex(20)} = 5 \cdot L_{int}$$

En una longitud, como mínimo, igual a la de frenado, el incremento positivo escalonado de la luminancia no debe superar la relación de 3 a 1.

3.4.9. Uniformidad en la luminancia sobre la calzada

La homogeneidad en la iluminación de la vía, específicamente en la medida de sus luminancias medias, otorga el valor de correcta guía visual significando un buen sistema de marcar el camino. En cualquier caso el conductor debe percibir información válida sobre el camino no solo mirando a la calzada, que pueden estar ocultas por el propio tráfico, sino también a las paredes. Por los ángulos del campo de visión lateral medios de la mayoría de los modelos de vehículos que circulan por las carreteras enterradas, la altura crítica de la pared como guía visual de la dirección longitudinal del túnel se ha venido considerando alrededor de los 2 metros. Este valor funciona aceptablemente bien como parámetro de diseño, si bien en vías con tráfico tipo diferente del general puede aumentarse (mayoría de vehículos pesados —camiones, autobuses, etc.— y otros).

Los valores mínimos en servicio de luminancia con mantenimiento de la instalación de la uniformidad global (U_0) y longitudinal (U_1) en calzadas, en toda su superficie, tanto anchura como longitud de todos los tramos y zonas del túnel, se recogen en la Tabla 3.11.

Tabla 3.11. Uniformidad de la luminancia en la calzada.

Clase de alumbrado	Uniformidades	
	Global U_0	Longitudinal U_1
1, 2 y 3	0,3	0,5
4, 5, 6 y 7	0,4	0,6

3.4.10. Limitación del deslumbramiento

El deslumbramiento disminuye la capacidad de percepción de objetos temporalmente en el conductor o usuario de la vía, por lo que debe reducirse en lo posible en la fase de diseño del túnel. Sus efectos pueden reducirse también con el sistema de iluminación, como ya se ha apuntado, por ejemplo en el caso del tramo de salida.

El deslumbramiento se analiza y divide en dos partes, una de ellas resulta la limitante a la hora de percibir con claridad la presencia de un objeto: se define como deslumbramiento perturbador. Éste limita con el resto del deslumbramiento en el denominado incremento umbral de contraste (TI), superado el cual los objetos no son perceptibles por el conductor del vehículo. Se relaciona matemáticamente como sigue:

$$TI = 65 \cdot \frac{L_v}{L_m^{0,8}} \quad \text{expresado en \% para } 0 < L < 5 \quad \left[\frac{cd}{m^2} \right]$$

$$TI = 95 \cdot \frac{L_v}{L_m^{1,05}} \quad \text{expresado en \% para } L > 5 \quad \left[\frac{cd}{m^2} \right]$$

Donde, TI es el incremento de umbral correspondiente al deslumbramiento perturbador; L_v , Luminancia de velo total (cd/m^2); y L_m la luminancia media de la calzada (cd/m^2).

El incremento de umbral (TI) debe ser menor del 15% para las zonas de umbral, de transición y zona interior durante el día, y para todas las zonas durante la

noche. Para la zona de salida durante el día no existe limitación en el deslumbramiento perturbador.

3.4.11. Control del efecto *Flicker*

El efecto *Flicker* se produce por la variación periódica de luminancias en el campo de visión, es común tanto por variación de la luminancia en el tiempo para objetos estacionarios, como para campos de visión que varían por movimiento del objeto, como es el caso de los vehículos.

La reducción del efecto está relacionada con el espacio recorrido por el vehículo, esto es, por el ritmo con que varía su campo de visión. A mayores velocidades se recorre más distancia en el mismo o menos tiempo. La disposición relativa, en el espacio, de las luminarias es clave para reducir a términos no molestos o inapreciables el efecto *Flicker*. A tal efecto en el diseño de la iluminación del túnel se dedica el esfuerzo al cálculo de la separación de los puntos de luz.

La sensación de parpadeo que percibe el conductor del vehículo depende de los siguientes factores:

- La velocidad con la que se pasa de tonos claros a oscuros en un mismo ciclo. Depende de la distancia entre luminarias y la velocidad de diseño.
- El número de cambios de luminancia por ciclo, que es la intensidad del efecto por sí misma. Depende de la distancia entre luminarias y de la velocidad de diseño de la vía.
- El tiempo en el que se prolonga el efecto. Función de la velocidad de diseño de la vía y de la separación de las luminarias.
- La relación pico-luz a valle-oscuridad dentro de cada periodo. Función de las características fotométricas, de la velocidad del vehículo y de la separación entre luminarias.

El cálculo del efecto *Flicker* se reduce al simple cociente entre la velocidad y la separación entre luminarias, lo que recoge las tres primeras variables de estudio en su totalidad y buena parte de la cuarta. Téngase en cuenta que para un cálculo eficaz deben coincidir las unidades de longitud empleadas en la velocidad y la distancia entre luminarias.

Los valores críticos del parpadeo son 2,5 Hz y 15 Hz. En esa horquilla de valores el efecto es notable y debe combatirse hasta alcanzar valores bien por debajo, bien por encima, lo que provoca una nula afección del parpadeo al conductor.

3.4.12. Alumbrado nocturno

En una situación de circulación del vehículo por una vía a cielo abierto que presenta un sistema de iluminación artificial, la luminancia a la entrada del túnel deberá ser como mínimo igual a la de la vía de acceso al mismo. La recomendación es superar ese límite inferior en un 50 ó un 100%, es decir, se multiplica por 1,5 o se dobla.

En cuestión de uniformidades no hay cambios en las recomendaciones con respecto a la iluminación en las horas de luz solar, aplicándose los valores expuestos para U_0 y U_1 .

Las condiciones descritas serán de aplicación igualmente en túneles de 100 metros de longitud sin iluminación diurna.

Si el túnel está situado en un trazado de carretera no iluminado se cumplirán las recomendaciones anteriores y se añadirá a aquellas la iluminación del tramo se vía situado inmediatamente a la salida del túnel se iluminará en una distancia que doble la de frenado o en los primeros 200 metros (parámetros mínimos ambos), escogiendo la opción de mayor requerimiento. La luminancia media de la calzada en ese tramo superará en un tercio a la de diseño para la zona de salida.

Los valores mínimos de luminancias en servicio con mantenimiento de la instalación en la calzada se exponen en la Tabla 3.12.

Tabla 3.12. Luminancias del alumbrado nocturno.

Luminancias del alumbrado nocturno	
Clase de alumbrado	Luminancia media (cd/m ²)
1,2	0,5
3,4,5,6 y 7	1

En el caso particular de los túneles o zonas de los mismos donde se instale un sistema de vigilancia de tráfico por cámaras de televisión el nivel nocturno mínimo no bajará de 1 cd/m^2 . Caso de otras instalaciones especiales como pantallas para luz diurna en la entrada del túnel o en su salida, paralúmenes, etcétera, el alumbrado nocturno en los tramos afectados igualará al de diseño para el interior del túnel.

3.5. Iluminación de túneles cortos y pasos inferiores

En la propia naturaleza de los túneles cortos se incluye la penetración de la luz diurna tanto a la entrada como a la salida, hasta el punto de que no habrá espacio para la adaptación en la supuesta zona de transición antes de afrontar la salida. Es común que en el túnel corto el conductor tenga dentro de su campo visual, a la vez, la boca de entrada y la de salida.

Se establece en los 25 metros de longitud el límite a partir del cual no requiere estudio alguno la iluminación del paso o túnel por no ser necesaria en ningún caso sistema de iluminación diurna.

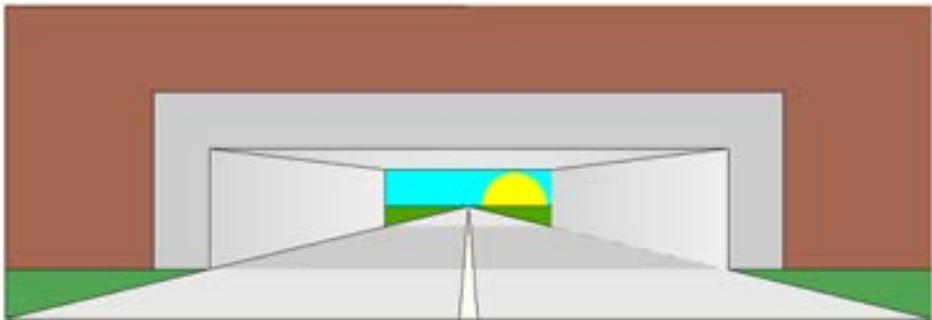


Figura 3.13. Paso/ túnel corto.

Aunque se evidencia la necesidad de disponer de alumbrado nocturno en el túnel, se presenta el caso de tener que decidir sobre diseñar o no un sistema de iluminación diurna. Si por fin se instala tal sistema se atenderá a los mismos parámetros que en los túneles largos.

La toma de tal decisión depende de la evaluación de la capacidad de los conductores de percibir con claridad los objetos que pueden estar presentes en

la vía, tanto en dirección longitudinal como transversal, ya sean vehículos a motor como elementos viales más frágiles como peatones, ciclistas, etcétera. La referencia visual es el campo formado a la distancia de frenado o de seguridad (DS).

Otro parámetro de diseño es la posible visualización de la salida del túnel desde la distancia de seguridad a la boca de entrada, que depende de: la longitud del túnel y las variaciones de dirección en su interior, ya fueran en el mismo plano (curvas dentro de su trazado) o con variación de planos (cambios de pendiente, rasante, etc.).

El contraste entre el llamado marco o fondo del túnel y la visualización de las dos bocas y la luz a su través han de ser también considerados. En la Fig. 3.13 se ha ilustrado el texto con un ejemplo sencillo de un túnel corto con fondo oscuro y correcta visualización del paisaje de fondo a la boca de salida, desde la distancia de seguridad.

Cuando la longitud del túnel se encuentra en el límite de posible instalación de un sistema de iluminación diurno, algo por encima de los 25 metros citados, se recurre a otros parámetros complementarios tales como los tonos oscuros que adoptan las paredes y techo del túnel, así como su fondo. En determinadas circunstancias los vehículos, peatones y obstáculos situados dentro de ese campo visual pueden quedar ocultos por las características ópticas del conjunto, caso en el que resulta ineludible la iluminación diurna.

La decisión sobre si instalar o no alumbrado diurno en un túnel con clasificado como corto puede apoyarse en cálculos propios del proyecto o en la experiencia estadística general que se recoge en los llamados cuadros-guía o diagramas guía.

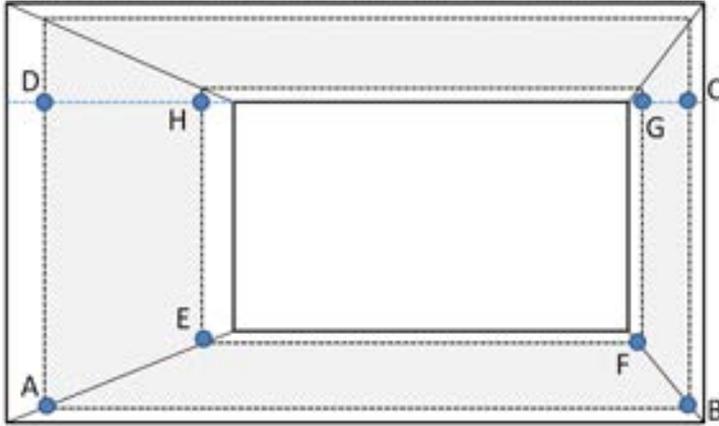
3.5.1. Cálculos en el proyecto

Para completar los cálculos que ayuden a la toma de decisiones sobre la instalación de un sistema de iluminación diurno se recomienda:

- Determinar el porcentaje de visión a través del túnel (LTP).
- Estudiar su aplicación.
- Estudiar su influencia.
- Determinar el método más apropiado que se ajusta al caso.

3.5.2. Determinación del porcentaje de visión a través (LTP)

Se realiza un dibujo (croquis, esquema, etc., en función de la finura del trabajo técnico) de la situación como el que se muestra en la Fig. 3.14, sobre la que se compone la expresión matemática adjunta:



$$LTP = \frac{S_{EFGH}}{S_{ABCD}} \cdot 100$$

Figura 3.14. Determinación de LTP.

La figura en perspectiva se ha trazado contando con las siguientes pautas para determinar su centro geométrico:

- Se encuentra en un punto en una línea horizontal 1,2 m por encima de la superficie de la calzada.
- En el centro del carril de circulación (si hay más de un carril, se ha de determinar para cada carril, aunque los más próximos a las paredes son los que tendrán la situación más crítica).
- Se sitúa a la distancia de parada (calculada para pavimento húmedo) para el portal de entrada aparente influido por la luz natural.

El techo no es tenido en cuenta debido a que normalmente no es un fondo contra el que puedan ocultarse otros usuarios de la carretera u obstáculos.

La penetración de luz natural acorta la longitud visual aparente del túnel. Por ello se usan unas bocas de entrada y salida aparentes cuando se determina LTP. La boca de entrada aparente normalmente está insertada aproximadamente 5 m y la boca de salida aparente está insertada aproximadamente 10 m dentro del túnel. La diferencia entre bocas reales y aparentes puede comprobarse viendo la superficie de la calzada en el túnel desde una larga distancia por delante del túnel, cuando se verá que la claridad de la superficie de la calzada en las bocas es mayor que dentro del túnel. Sin embargo, en la práctica es difícil estimar o medir las distancias de inserción, y las figuras a 5 m y 10 m representan la buena práctica y deberían usarse normalmente.

Las curvaturas en cualquiera de los planos (vertical u horizontal) pueden suponer una dificultad importante a la hora de realizar el dibujo propuesto. En estos casos se da una exactitud suficiente cuando el marco oscuro está basado en dibujos en sección transversal en los planos horizontal y vertical.

Resultan expresiones equivalentes (entre ellas y con la ya vista), por lógica física:

$$LTP = \frac{EF.FG}{AB.BC} .100$$

$$LTP = \frac{\beta_u}{\beta_i} \cdot \frac{\alpha_u}{\alpha_i} .100$$

donde, β_u , β_i , α_u , α_i , son los ángulos que se deducen del planteamiento gráfico de la Fig. 3.15. Los ángulos con subíndice "u" son los definidos para la parte visual de la boca de salida aparente y los de subíndice "i" los referidos a la boca de entrada.

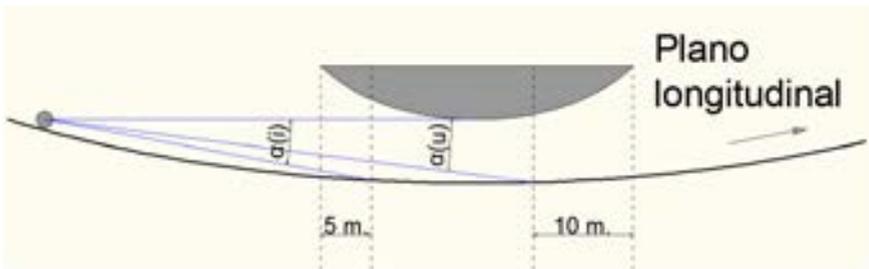


Figura 3.15. Plano longitudinal y plano vertical.

$$LTP_V = \alpha_u \cdot f \cdot \alpha_i$$

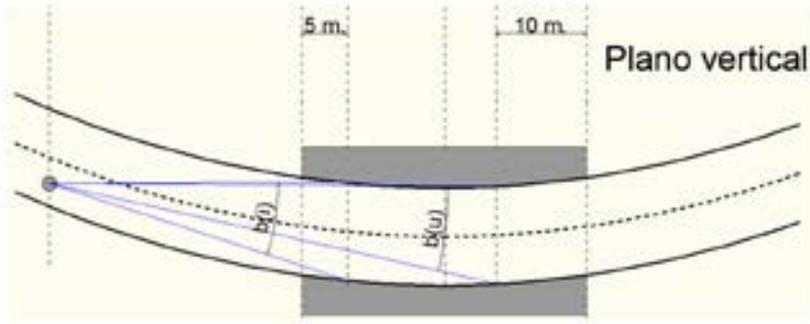


Figura 3.15. Plano longitudinal y plano vertical. (Continuación).

3.5.3. Aplicación del LTP

A partir del gráfico anterior, se aplica el porcentaje de visión a través. Según la experiencia acumulada hasta el momento:

- Para $LTP < 20\%$, siempre se necesita alumbrado artificial durante el día.
- Para $LTP > 50\%$, nunca se necesita alumbrado artificial durante el día.
- Para $20\% < LTP < 50\%$ puede ser necesario alumbrado artificial durante el día.

En este último caso, en el que la LTP toma valores intermedios, debe analizarse la visibilidad de un objeto crítico importante en función de la composición del tráfico: vehículos, ciclistas, peatones, etcétera. Se siguen las siguientes recomendaciones:

- Para vehículos, el objeto crítico es definido como un rectángulo de 1,6 m de anchura x 1,4 m de altura. Para peatones/ciclistas el objeto crítico es definido como un rectángulo de 0,5 m de anchura por 1,8 m de altura.
- El objetivo principal es evitar una colisión y por ello el objeto crítico debe situarse en el centro del carril de circulación.

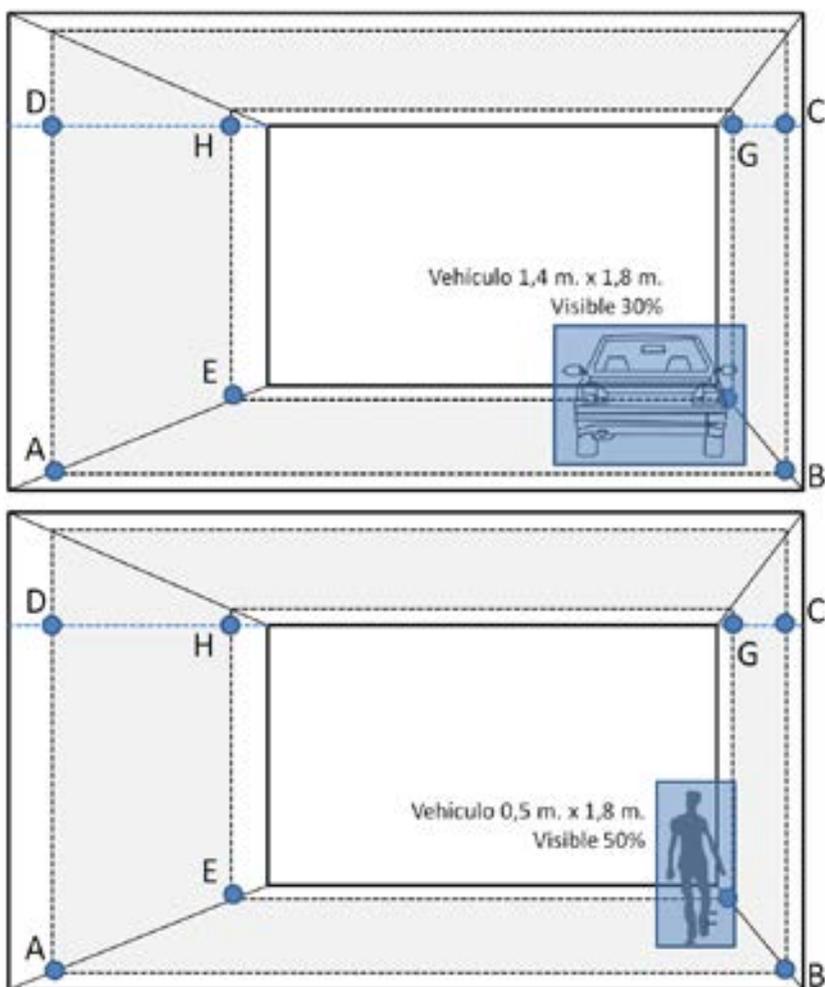


Figura 3.16. Aplicación de LTP.

Es requerido alumbrado artificial cuando se describen las circunstancias siguientes:

- No puede verse más de un 30% del objeto crítico que representa un vehículo contra la boca de salida aparente.
- No puede verse más de un 50% del objeto crítico que representa un peatón/ciclista contra la boca de salida aparente.

3.5.4. Influencia del LTP

Las medidas estructurales participan pasivamente en la longitud aparente del túnel. Las que favorecen la penetración de la luz diurna en el túnel los acortarán sensiblemente, dado que el concepto es dinámico y función de la iluminación disponible. Las recomendaciones que, al respecto, se encuentran en la serie normativa sectorial publicada por el Gobierno de España en 2015 son:

- Aumentar la altura o anchura de la entrada/salida.
- Aplicar cubiertas especulares (azulejos) en las paredes del túnel.
- Romper el túnel en partes más cortas dejando abierto el techo cuando sea posible.

Cualquiera que sea el método empleado, con o sin cálculo, las variables de mayor afección sobre la decisión son:

- La distancia de seguridad, calculada para pavimento húmedo.
- La longitud del túnel.

Nótese que no se han incluido las dimensiones de apertura del túnel. Aunque son importantes para determinar la penetración de la luz natural, no son las variables fundamentales.

3.6. Diagramas guía para túneles cortos

Para la aplicación de la guía que se sirve como apoyo a la toma de decisiones sobre el tipo de alumbrado nocturno a instalar en este tipo de pasos y túneles, así como coadyuvante en la toma de decisiones sobre la necesidad de diseño de un sistema de iluminación diurno, se clasifican estos tramos de vía enterrada en cuatro categorías:

- Tipo A. Túneles situados en entornos urbanos o periurbanos en vías de tráfico (excluidas autopistas y autovías), frecuentemente dotadas de alumbrado público y cuya velocidad de circulación está limitada entre 40 y 60 km/h.

- Tipo B. Túneles interurbanos bidireccionales, considerando un volumen de tráfico denso cuando la intensidad media diaria de los vehículos que circulan es superior a 5.000 (IMD > 5.000).
- Tipo C. Túneles interurbanos unidireccionales (autopistas y autovías), estimando un volumen de tráfico denso cuando la intensidad media diaria de los vehículos que circulan es superior a 10.000 (IMD > 10.000).
- Tipo D. Túneles interurbanos con tráfico de baja velocidad (límite de velocidad considerablemente menor de 80 km/h.), y un volumen de tráfico notablemente inferior a una intensidad media diaria de 5.000 vehículos (IMD < 5.000).

Se elaboran cuadros para la estimación referida en los que se alude a las siguientes variables:

- Longitud (m): se establecen para cada diagrama guía cuatro órdenes de longitudes de túneles cortos o pasos inferiores, expresadas en metros.
- ¿Salida visible?: en cada diagrama guía se considera, cuando el conductor del vehículo que se acerca al túnel y se encuentra, como mínimo, a una distancia igual a la de seguridad (DS) antes de la entrada del mismo, si es o no visible la salida del túnel o paso inferior.
- Velocidad ≤ 80 km/h: en los diagramas guía 2 y 3, correspondientes a los túneles tipo B y C, se contempla si la velocidad de diseño del túnel o paso inferior es mayor o menor que 80 km/h. La velocidad de diseño es muy importante en relación a la distancia de seguridad (DS), así como respecto al riesgo de accidentes y a la gravedad de los mismos.
- Volumen de tráfico: Se tiene en cuenta en los cuadros guía para los tipos B y C el volumen de tráfico, que puede clasificarse en ligero y denso.

Las consideraciones básicas para la aplicación de los diagramas o cuadros-guía mostrados son:

- La configuración real del túnel en sus elementos: carretera, paredes y techo, bocas, etc., tanto a la entrada como a la salida y su interior.
- La cantidad y calidad del tráfico.
- La disponibilidad de un análisis de seguridad vial (accidentes) relacionada con la iluminación.

- La disponibilidad de un estudio de la señalización de seguridad a la entrada del túnel, especialmente en las relativas a la seguridad (DS, obligatoriedad del uso del alumbrado del vehículo, etcétera).
- La existencia de un control efectivo y eficaz sobre los costes de instalación y explotación anual del alumbrado, incluyendo el funcionamiento, mantenimiento y trabajos de reparación relativos a la seguridad y el confort.
- La relación de balance económico de la instalación y su diseño, es decir, el beneficio en relación a los costes generales (instalación, mantenimiento, diseño, gestión, etcétera).

Cuadro guía para túneles-pasos tipo A

Tabla 3.13. Túneles-pasos tipo A.

Túneles-pasos tipo A						
Longitud (m)	< 25	25 a 75		75 a 125		> 125
¿Salida visible?	-	SI	NO	SI	NO	-
Alumbrado	No se requiere		Diurno limitado		Igual al túnel largo	

Cuadro guía para túneles-pasos tipo B

Tabla 3.14. Tipo B.

Túneles-pasos tipo B									
Longitud (m)	0-80		81-120				121-150		> 150
¿Salida visible?	-	SI	NO		SI		NO	SI	NO
Velocidad >80 km/h	-	SI	NO	SI	NO	SI	NO	-	-
Volumen de tráfico	-	-	Ligero	Denso	-	Ligero	Denso	-	-
Alumbrado	No se requiere		Alumbrado diurno limitado			Alumbrado diurno completo		Igual al túnel largo	

Cuadro guía para túneles-pasos tipo C

Tabla 3.15. Tipo D.

Túneles-pasos Tipo C										
Longitud (m)	0-100		100-150				150-200		>200	
¿Salida visible?	-	SI	NO		SI		NO	SI	NO	-
Velocidad >80 km/h	-	SI	NO	SI	NO	SI	NO	-	-	
Volumen de tráfico	-	-	Ligero	Denso	-	Ligero	Denso	-	-	
Alumbrado	No se requiere alumbrado diurno		Alumbrado diurno limitado			Alumbrado diurno completo		Igual al túnel largo		

Cuadro guía para túneles-pasos tipo D

Tabla 3.16. Luminancias del alumbrado nocturno.

Túneles-pasos tipo D						
Longitud (m)	0-100	101-150		151-200		> 200
¿salida visible?	-	SI	NO	SI	NO	-
Alumbrado	No se requiere		Diurno limitado		Alumbrado diurno completo	Igual al túnel largo

3.6.1. Consideraciones para el diseño

Teniendo en cuenta que en los túneles tipo B el volumen de tráfico es denso cuando IMD > 5.000 y en los túneles tipo C el volumen de tráfico es denso cuando IMD > 10.000, se puede construir el siguiente cuadro comparativo, derivado de los anteriores:

Tabla 3.17. Comparativa túneles cortos.

Comparativa túneles cortos				
Tipo de túnel	A	B	C	D
Longitud	< 25	<80	<100	<100
	25-75	80-120	100-150	100-150
	75-125	120-150	150-200	150-200
	>125	>150	>200	>200
¿Salida visible?	SÍ	SÍ	SÍ	SÍ
	NO	NO	NO	NO
Velocidad < 80 km/h		SÍ	SÍ	
		NO	NO	
Volumen de tráfico		Ligero	Ligero	
		Denso	Denso	

Los tramos de menor longitud que se encuentran en los trazados habituales se corresponden con los pasos inferiores de vía bajo ferrocarril o carretera, cuya longitud se encuentra por debajo de los 25 metros, por lo que no suele requerir alumbrado diurno.

Resulta conveniente emplear recursos de diseño en la infraestructura que faciliten o garanticen la máxima penetración de la luz diurna en el túnel. Es recomendable:

- Construir la boca del túnel más elevada.
- Revestimiento de color blanco (recubrimiento especular) en las paredes del túnel.
- Instalar claraboyas en el techo del túnel.

La iluminación de la vía a cielo abierto que da acceso y salida al túnel puede contribuir, si se considera esta particularidad en el diseño, a la penetración de esa luz artificial en el túnel corto o paso.

Un elemento fundamental es el control de la reflectancia de las paredes del túnel, ésta potencia considerablemente el brillo del fondo sobre el contorno de los objetos que pudieran estar presentes, de modo que resultan más visibles. Este efecto se convierte en un recurso esencial cuando la salida desde la distancia de seguridad (contada desde la boca de acceso), aprovechando que con valores adecuados de reflectancia las paredes pueden derivar los haces de luz que entran por la salida hacia el campo visual del conductor. El punto crítico de reflectancia de las paredes se establece en el 40%, por debajo de éste la reflectancia se considera "baja" y por encima "alta"; la categoría baja no contribuye al efecto deseado. Para la aplicación de este criterio deben cumplirse los factores de mantenimiento y depreciación. En caso de reflectancia baja todas las categorías de longitud expuestas en los cuadros anteriores se reducirán en un 20%. Cuando la reflectancia es alta las longitudes mostradas pueden aumentarse en esa misma proporción.

$$\text{Reflectancia} < 40\% \Rightarrow \text{BAJA} \Rightarrow l_{\text{BAJA}} = 0,8 \cdot l_{\text{CUADRO-GUÍA}}$$

$$\text{Reflectancia} > 40\% \Rightarrow \text{ALTA} \Rightarrow l_{\text{ALTA}} = 1,2 \cdot l_{\text{CUADRO-GUÍA}}$$

Cualquier tipo de túnel tendrá sus paredes pintadas de blanco hasta los 2 metros de altura con el mínimo de porosidad (superficie lisa) con alta reflectancia especular. Las superficies de las paredes y posibles bordillos de acera contiguos a las paredes pueden cubrirse con colores que contrasten tanto con la pared como con la calzada, especialmente de oscuro cuando la calzada emite tonos claros. Puede seguirse la misma recomendación en los primeros 0,5 metros de altura de la pared.

Debe considerarse la capacidad de la boca de salida para dejar penetrar la luz exterior del túnel. La orientación solar la de salida, la apertura transversal de la boca de salida (por ejemplo un túnel que alberga cuatro carriles presenta una gran apertura transversal) o los cambios de rasante a menor pendiente o la superficie plana a la salida, determinan casos favorables al respecto.

En carreteras de dos carriles o menos, en las que la boca del túnel se ajusta al límite de éstos, la penetración de la luz exterior resultará escasa, cuestión que se agrava cuando a la salida se encuentra gran cantidad de edificaciones, una incorrecta orientación (norte), pendientes positivas a la salida, etcétera, se da un caso negativo.

Como en cualquier diseño de Ingeniería, ante la decisión de diferentes opciones, se debe escoger la más orientada a la seguridad o la alternativa más conservadora, lo que debe extenderse a los casos en los que el túnel presenta en primer lugar una pendiente y luego una rampa (cambios de plano con diferencias de cotas verticales) o cuando aparecen discontinuidades o singularidades geométricas. La alternativa más conservadora es aplicable también en los casos que el técnico considere más relevantes ante la seguridad, como la presencia de transporte habitual de mercancías peligrosas u otras composiciones del tráfico que pongan en riesgo la seguridad.

3.6.2. Tipología de alumbrado en túneles cortos

Como se deduce de los cuadros-guía que se han expuesto para la toma de decisión sobre el establecimiento de un sistema de iluminación diurno, los casos posibles son:

- Se diseña del mismo modo que un túnel largo.
- Se debe disponer un alumbrado diurno completo.
- Se debe disponer un alumbrado diurno parcial o limitado.
- No se requiere alumbrado diurno en el túnel.

No es preceptivo tratar los casos extremos en los que la falta de requerimiento de sistema de iluminación y la analogía propuesta con los túneles largos, por motivos evidentes.

* Alumbrado diurno limitado

La limitación se refiere al tiempo de función del sistema, que no estará en consumo durante todas las horas solares del día. El sistema artificial se maneja como complemento de la luz solar diurna, entrando en servicio únicamente cuando la penetración de la luz natural en el túnel no garantiza la seguridad vial. Suelen entrar en funcionamiento en las primeras y últimas horas solares, así como en días nublados en los que la luminancia no es suficiente para apreciar el contraste de los objetos sobre el fondo.

La luminancia del alumbrado diurno se limita por lo bajo en 15 cd/m^2 o el triple de la luminancia interior del túnel, referido a la media en servicio de la calzada con mantenimiento de la instalación. El límite de diseño se encuentra en la más restrictiva de las dos condiciones (la de mayor luminancia requerida).

$$L_{\text{corto-lim}} = 3 \cdot L_{\text{int}}, \quad \text{mínimo } 15 \frac{\text{cd}}{\text{m}^2}$$

En el ocaso solar el sistema se pondrá en marcha cuando la luminancia en la zona de acceso (L_{20}) baje de 150 cd/m^2 , el apagado se realiza media hora antes de la puesta del Sol.

A la salida del Sol se enciende simétricamente (media hora después de la salida del Astro) y se apaga cuando la luminancia de la zona de acceso supere las 150 cd/m^2 .

* Alumbrado diurno completo

Se mantiene en funcionamiento de manera complementaria con el alumbrado nocturno (que siempre se requiere), es decir, estará en función durante todas las horas solares diurnas.

La luminancia aplicable al caso es la que se corresponde con la equivalente a la zona umbral de túneles largos, deducida del coeficiente k , una vez aplicada la clase de túnel.

$$L_{\text{diurno-completo}} \sim L_{\text{th}}$$

* Alumbrado de noche

Siempre que la longitud del túnel supere los 25 metros y la carretera de su entorno (aproximación y salida) estén dotadas de sistema de iluminación, se requiere iluminación nocturna en el túnel.

Para la correcta integración del túnel corto en la vía se dispondrá una luminancia limitada inferiormente por la luminancia de la vía de aproximación y superiormente por el doble de ese valor.

$$L_{\text{vía-acceso}} < L_{\text{corto-paso}} \leq 2 \cdot L_{\text{vía-acceso}}$$

* Método alternativo o simplificado para determinar la necesidad de alumbrado artificial durante el día

En su publicación de recomendaciones (2015) para la iluminación en túneles, el Ministerio del ramo ofrece una alternativa al método de cálculo del LTP que no consiste en otra cosa que en identificar el caso más similar al del proyecto en las tablas generadas por la experiencia con cálculos de LTP tabulados según casos reales.

En estas tablas se dan dos situaciones:

- Túneles rectos (la carretera que se aproxima no tiene curvatura en el plano horizontal, pero puede tener pendiente).
- Túneles con curvatura horizontal con una carretera que se aproxima con curvas en el plano horizontal.

La distancia de seguridad se calcula siempre para suelo mojado.

Para túneles rectos se recogen los datos en la Tabla 3.18.

Tabla 3.18. Luminancias del alumbrado nocturno.

DS (calzada húmeda)	Alumbrado artificial durante el día	Carretera de aproximación con pendiente de 0°	Carretera de aproximación con pendiente de 2°	Carretera de aproximación con pendiente de 3°
50 m	SÍ	L > 120 m	L > 100 m	L > 80 m
	POSIBLE	50 m < L < 120 m	50 m < L < 100 m	40 m < L < 80 m
	NO	L < 50 m	L < 50 m	L < 40 m
100 m	SÍ	L > 200 m	L > 150 m	L > 80 m
	POSIBLE	90 m < L < 200 m	60 m < L < 150 m	80 m < L < 50 m
	NO	L > 90 m	L < 60 m	L < 50 m
150 m	SÍ	L > 200 m	L > 150 m	L > 80 m
	POSIBLE	120 m < L < 200 m	70 m < L < 150 m	80 m < L < 50 m
	NO	L < 120 m	L < 70 m	L < 50 m
200 m	SÍ	L > 200 m	L > 150 m	L > 70 m
	POSIBLE	150 m < L < 200 m	70 m < L < 150 m	50 m < L < 70 m
	NO	L < 150 m	L < 70 m	L < 50 m

Los valores de LTP no se han incluido en la tabla, puesto que el interés de quien a ellas acude no es descifrar ese valor, sino concluir la necesidad (o no) del alumbrado diurno en el túnel.

La tabla es importante cuando se aplican las siguientes dimensiones principales y condiciones:

- Un túnel de anchura comprendida entre 9 y 12 m y una altura de túnel entre 4,5 y 6 m.
- La escena detrás del portal de salida está bien iluminada por la luz natural.

Para túneles con curvatura horizontal se propone tomar la decisión según la Tabla 3.19.

Tabla 3.19. Túneles con curvatura horizontal.

DS (calzada húmeda)	Alumbrado artificial durante el día	Radio de la curva (m)	Longitudes límite (m)	Radio de la curva (m)	Longitudes límite (m)
80 m	SÍ	85	L > 20 m	170	L > 50 m
	POSIBLE				20 m < L < 50 m
	NO		L < 20 m		L < 20 m
100 m	SÍ	250	L > 50 m	800	L > 70 m
	POSIBLE		30 m < L < 50 m		50 m < L < 70 m
	NO		L < 30 m		L < 50 m
150 m	SÍ	450	L > 55 m	900	L > 90 m
	POSIBLE		40 m < L < 55 m		60 m < L < 90 m
	NO		L < 40 m		L < 60 m
200 m	SÍ	750	L > 60 m	1500	L > 100 m
	POSIBLE		50 m < L < 60 m		65 m < L < 100 m
	NO		L < 50 m		L < 65 m

3.7. Alumbrado de emergencia

Como cualquier instalación eléctrica los túneles están sometidos a posibles cortes de suministro, que no deben afectar a la seguridad vial. Se hace necesario un sistema de alumbrado de emergencia que cubra la longitud completa del túnel y garantice una luminancia superior al 10% de la luminancia de diseño de la zona interior (L_{int}) o $0,2 \text{ cd/m}^2$, es decir:

$$L_{corto-emerg} > 0,1 \cdot L_{int}, \quad \text{mínimo } 0,2 \frac{\text{cd}}{\text{m}^2}$$

En los túneles con clase de mayor exigencia, a partir de la clase 3, se hace necesario un sistema contra incendios que indique las rutas de escape, lo que debe señalizarse en todos y cada uno de los puntos del interior del túnel desde los que entre en el campo visual la salida.

En todo caso la separación máxima entre luminarias será de 50 metros y se dispondrán a 0,5 metros del suelo.

El RD 635/2006, de 26 de mayo, se refiere a dos tipos de alumbrado de emergencia: el de seguridad y el de emergencia *per se*. Según su texto el alumbrado de seguridad se proporcionará de modo que permita una visibilidad mínima para

que los usuarios del túnel puedan evacuarlo en sus vehículos en caso de avería del suministro de energía eléctrica. Por otro lado, la iluminación de emergencia cumplirá las condiciones descritas al comienzo del presente apartado, siempre con un mínimo de 0,2 cd/m² y 10 lux, con lo que se entiende que, en valores medios, garantizan la eventual evacuación a pie desde el interior del túnel.

La publicación CIE nº 88/2004 y el informe UNE CR 14380 IN (2003) recomiendan que el nivel de iluminancia media máxima sea de 10 luxes y el mínimo de 2 luxes. Deberá ir conectado a una fuente de alimentación de energía ininterrumpida y puede ser parte del alumbrado nocturno del túnel. Ambos documentos delegan el alumbrado en caso de escape en caso de incendio a la norma UNE-EN 1838.

En resumen se determina que:

- El alumbrado de seguridad entrará en funcionamiento en caso de fallo eléctrico. Mediante un sistema de alimentación ininterrumpido se consiga un nivel en la superficie de la calzada de 10 lux de iluminancia media y 2 lux de mínima.
- Alumbrado de evacuación, cuya señalización estará a una altura máxima de 1,5 metros desde la superficie de la calzada y deberá proyectarse de modo que permita guiar a los usuarios del túnel para la evacuación a pie con un mínimo de 10 lux y 0,2 cd/m².

3.8. Mantenimiento

Se emplea un factor de mantenimiento relativo a disminuir los efectos de la suciedad en las luminarias, que provoca su depreciación, y la pérdida de flujo luminoso en su lámpara. Uno de los casos críticos está protagonizado por los túneles con gran afluencia de tráfico (especialmente de motores diesel y vehículos pesados) que significa un alto grado de contaminación que llena de partículas paredes y luminarias.

Las recomendaciones normativas fijan el factor de mantenimiento en 0,7 para la calzada y 0,5 para las paredes del túnel.

Las luminarias (y sus lámparas) dejan de ser útiles cuando la luminancia media que sirven, mantenimiento incluido, no cumple las exigencias establecidas o las uniformidades (U_0 y U_1) no son conformes.

3.9. Encendidos/ apagados

El control de activación y desactivación del sistema de iluminación en el túnel debe ser automático, como los niveles de luminancia de referencia de la zona de transición y umbral son función de la disponible en la vía de acceso, conviene que los automatismos estén referidos a ésta. De este modo se consigue, además, la máxima capacidad de adaptación a las variaciones de la luz diurna en las zonas de aproximación y acceso.

3.10. Alumbrado nocturno en el exterior del túnel

A la salida del túnel se mantendrá iluminada la vía a cielo abierto en una distancia equivalente al doble de la de frenado (2.DS), aunque se puede limitar a un máximo de 200 metros, con una luminancia superior en un tercio a la zona de salida del túnel.

Si se disponen pantallas solares a la entrada y salida del túnel, la referencia de luminancia es el equivalente a la dispuesta en la zona interior del túnel.

3.11. Guiado visual

El guiado visual se basa en una correcta zonificación longitudinal que se presente de la manera más clara posible en el campo visual del conductor. La solución recomendable es disponer el máximo contraste entre las superficies longitudinales contiguas. El guiado ofrece información de primera mano sobre el trazado del túnel, por ejemplo de un cambio de dirección importante a la entrada, y es especialmente importante cuanto más baja es la luminancia en la zona recorrida y más concretamente cuando ésta es la de acceso al túnel¹².

3.11.1. Guiado visual para túneles largos

La señalización horizontal requiere un diseño cuidado en todas las clases de túneles menos la clase 1, es decir, de la 2 a la 7. En las tres clases de mayor exigencia en iluminación (5, 6 y 7) se considera la instalación de dispositivos retro-reflectantes en la superficie de la calzada y las paredes del túnel, una vez considerados los factores de ponderación en función del guiado visual.

¹² Se puede consultar la tabla en la que se han establecido pesos para determinar la calidad del guiado visual.

3.11.2. Guiado en la zona de entrada para túneles de clase 1

A la entrada del túnel, en los primeros 75 metros de longitud, se instalarán al menos 5 luminarias que deben servir una intensidad luminosa, medida hacia el conductor, que cumpla lo indicado en la Tabla 3.20:

Tabla 3.20. Intensidad luminosa en la zona de entrada. Clase 1.

Intensidades luminosas en la zona de entrada en túneles de clase 1				
Ángulo	$80^\circ < \gamma < 87,5^\circ$		$\gamma = 87,5^\circ$	
INTENSIDAD (cd/m^2)				
Tiempo	mínimo	máximo	mínimo	máximo
Durante el día	300	800	-	400
Durante la noche	8	50	-	25

Las luminarias no se separan más de 25 metros y en tramos con el trazado en curva siempre debe haber al menos 4 luminarias.

3.11.3. Guiado visual en la zona interior para túneles de clase 1

Una vez clasificado el túnel con categoría 1 se recurre a lo expuesto en la Tabla 3.21 adjunta:

Tabla 3.21. Intensidades luminosas en la zona interior. Clase 1

Intensidades luminosas en la zona interior en túneles de clase 1				
Ángulo	$80^\circ < \gamma < 87,5^\circ$		$\gamma = 87,5^\circ$	
INTENSIDAD (cd/m^2)				
Tiempo	mínimo	máximo	mínimo	máximo
Durante el día	8	50	-	25
Durante la noche	8	50	-	25

3.11.4. Guiado visual para túneles cortos sin sistema de alumbrado

En los túneles sin sistema de alumbrado, cortos o pasos inferiores, la percepción visual de objetos y las posibles variaciones de dirección del tramo de vía enterrada son especialmente dependientes de la correcta señalización vertical y horizontal. Los elementos más empleados son:

- Marcas retro-reflectantes en la calzada.
- Sistema de balizamiento retro-reflectante (captafaros, hitos, etc.) en la calzada.
- Marcas y balizamiento retro-reflectantes en las paredes.
- Diodos foto-emisores o emisores de luz.

3.12. Soluciones de Iluminación en Túneles: Tecnología LED

El empleo de la tecnología LED en la iluminación en túneles ha llegado a conseguir ahorros del 80% en el consumo. Se trata de una de las aplicaciones de la denominada iluminación inteligente (*Smart Lighting*) junto con sus automatismos asociados.

El servicio en túneles (por su disposición recogen lo malo de las partículas en suspensión del exterior y especialmente las emisiones de los vehículos), en tanto a su calidad y longevidad, es altamente dependiente del factor de mantenimiento. En este aspecto la ventaja de la tecnología LED sobre el resto de las empleadas tradicionalmente, tanto en sistemas simétricos como a contraflujo, es evidente. La inclusión en el proyecto de luminarias LED de calidad garantiza una larga vida útil y una mayor adaptación a la demanda instantánea.

El empleo de esta tecnología contribuye, por efecto directo del ahorro energético, a la reducción del calentamiento global al disminuir el GWP¹³ del conjunto de sistemas instalados, más cuantos más hayan sido sustituidos por los diodos emisivos de luz.

¹³ Global Potential Warming.

La propia tecnología LED requiere de cierta aplicación electrónica y depuración de componentes (semiconductores), de modo que la sociedad que puede formar con los sistemas automáticos de control de intensidad, encendido y apagado no suponen un coste añadido alto y entran en el grupo de actividad del sistema, con una gestión más sencilla que cuando aquellos se combinan con otras tecnologías como VASP.

No solo resultan más eficaces en el apagado y encendido, sino que se trata de los sistemas más eficientes en este aspecto, con una respuesta temporal que nada tiene que ver con los empleados tradicionalmente. Desde el punto de vista de la seguridad, estos encendidos y apagados se producen sin parpadeo alguno y en periodos de microsegundos, de efecto inapreciable para el ojo del conductor en el ejercicio de su labor al transitar por los túneles.

El bajo consumo LED se traduce en una alta eficacia luminosa, es decir, se producen muchos lúmenes por cada vatio de potencia consumido.

En los túneles se producen continuas vibraciones y fenómenos ondulatorios que someten a las luminarias. También en este caso las LED resultan las de menor sensibilidad a estas agresiones, manteniendo una iluminación de calidad durante más tiempo.

Los LED funcionan a baja tensión y eso supone una gran noticia para la seguridad en todos los sentidos, en especial en las operaciones de mantenimiento que procuran el retraso máximo de su depreciación y su máximo periodo de servicio en las condiciones de exigencia que se han descrito.

La luz emitida por el diodo resulta unidireccional, es sencillo orientarla hacia el punto que el diseño haya determinado para alcanzar los objetivos de intensidad luminosa. Un LED de calidad sirve ondas monocromáticas con alto brillo que contribuyen a la percepción correcta del resto de los vehículos u objetos que pudieran estar presentes en la vía enterrada o sus proximidades. Permiten su regulación en un amplio rango de potencias eléctricas (desde la nominal hasta un mínimo lejano) sin variación apreciable del color.

El dispositivo LED necesita evadir calor, cosa que hará con dificultad cuando las temperaturas de su entorno sean muy altas. Aunque las temperaturas en un túnel, como ocurre en una cueva natural, no sufren altas variaciones, en lugares donde las temperaturas estacionales puedan ser muy altas los LED pueden sufrir y reducir su vida útil, entiendo ésta como el período de tiempo que pasa en servicio la lámpara desde su instalación hasta que no es capaz de ofrecer más de un 30% de su flujo original.

Debe hacerse una buena selección del material LED. Si se guarda la calidad de los materiales y en especial la pureza de los semiconductores y la calidad de las soldaduras requeridas, las incidencias durante su vida útil tendrán una importancia muy baja frente al resto de las alternativas.

3.13. Medidas de ahorro en el alumbrado en túneles

En una instalación para vías a cielo abierto la potencia que se instala por cada kilómetro de longitud se encuentra alrededor de los 8-9 kW/km, cuando se disponen el techo y las paredes, en el túnel, se multiplica por 8 ó 10 esa potencia, alcanzando valores entre los 65 y los 85 kW.

En la evaluación energética de instalaciones, aunque se ha dedicado especialmente a edificación, se refiere la calidad del consumo energético a la relación entre la potencia y la superficie iluminada, anualmente (kW/m².año). En túneles la cifra se sitúa en 40 kW/m².año. Es un objetivo a medio plazo reducirla en un 25% para lo que se cuenta con el efecto sinérgico de las recomendaciones CIE para la iluminación del tramo de transición, la reducción de la velocidad de diseño y la aplicación de tecnologías de alto rendimiento luminoso y bajo consumo, papel que actualmente juegan los LED.

Los túneles no urbanos consumen energía por tres vías fundamentales:

- la iluminación (refuerzo en la boca de entrada y la interior),
- la ventilación, y
- los servicios complementarios.

El alumbrado significa alrededor de un 85% del consumo energético total en el túnel, así se convierte éste en el término prioritario sobre el que actuar para el ahorro energético.

Ya dentro del túnel, si se diferencia entre las zonas del mismo, entre un 60 y un 80% de la energía de alumbrado (85% del total del túnel) se consume entre la zona umbral y la de transición, el resto se corresponde al resto del alumbrado del túnel (el permanente, por diferenciarlo del de refuerzo). De esta forma se centra aún más el objetivo de ahorro energético en términos de consumo eléctrico.

Para una correcta estimación de la potencialidad de ahorro energético en el túnel se deben considerar variables como su orientación, las luminancias de velo atmosféricas, de parabrisas y de Fry y, si existe, las medidas adoptadas para disminuir las luminancias ambientales exteriores a la entrada de los túneles. Las fundamentales:

- Prever líneas de árboles o pantallas vegetales que oculten lo más posible el cielo y el horizonte en su lejanía, tapando el sol bajo rasante sobre el horizonte que resulta muy deslumbrante y perjudicial para la visión del conductor. Cuestiones a considerar también en la zona de salida del túnel.
- Implantar calzadas oscuras por el uso de materiales asfálticos con agregados que lo favorezcan y extiendan estas características a lo largo del tiempo.
- Procurar la ocultación de todos los elementos claros del entorno que entren en cualquier momento en el campo de visión del conductor o usuario de la vía en el momento de aproximación al túnel.

Cuando se atiende a esta serie de medidas pasivas de ahorro, los niveles de iluminación requeridos disminuyen sensiblemente a la entrada del túnel y de esta manera queda garantizado una buena parte del ahorro energético fuera cual fuese la tecnología lumínica empleada. El ahorro es importante porque se sabe que cuanto menor es la diferencia entre el nivel de iluminación exterior y el interior del túnel, menor es la distancia requerida para adaptar la visión del conductor.

Los efectos de deslumbramiento a la salida deben corregirse, en lo posible con medidas pasivas directamente sobre la infraestructura. Aunque se pueden combatir con el diseño del sistema de iluminación, para el ahorro energético conviene que la solución sea, en toda la parte posible, estructural. Por ejemplo en un túnel con una boca de salida cuya orientación es inconveniente para el deslumbramiento en el orden de marcha, resulta buena práctica por el ahorro energético curvar ligeramente la salida del túnel, aunque es posible que la amortización de esta medida sea función de los riesgos en seguridad de la vía en este tramo y de la longitud del túnel. La idea es permitir en cierto modo la penetración de la luz diurna, que indique al conductor la dirección de la salida, pero evitando su incidencia directa sobre los ojos, causa del deslumbramiento. Debe tenerse en cuenta que la reacción típica de un conductor cuando se encuentra en ese momento de deslumbramiento es acelerar para pasarlo cuanto antes, sabedor de que el efecto es característico de ese punto concreto del tramo y que este hecho, lógicamente, juega en contra de la seguridad.

En general las orientaciones E-O son inconvenientes en el trazado de cualquier carretera o vía para vehículos motorizados de alta velocidad y más cuando el tráfico es mixto. En este tipo de vías se conduce cara al Sol, de ida, por la mañana y cara al Sol, de vuelta, por la tarde, o a la inversa, de modo que el riesgo de deslumbramiento en el conjunto de la vía para sus usuarios diarios es muy alto. Si lo es en la vía a cielo abierto, tanto más en la boca de salida del túnel. Se puede adoptar, dentro de lo posible, la solución estructural de aumentar la cubierta del túnel en su salida; sin embargo, siempre se trata de un trazado comprometido que debería evitarse.

3.13.1. Reducción de los niveles de iluminación en túneles

Para el ahorro la primera medida es siempre la reducción de las necesidades. Menores requerimientos de iluminación derivan indefectiblemente en un ahorro energético considerable que, además, es permanente y forma parte de la infraestructura. No es un factor a corregir, sino un parámetro presente en el diseño.

Se puede atender a estrategias de reducción de los niveles de iluminación requeridos, siempre sin afección de los mínimos para la seguridad vial establecidos en el RD 635/2006, de 26 de mayo, estudiándolos en los periodos de día y de noche, siempre en la zona interior, donde no se requiere iluminación de refuerzo.

3.13.2. Reducción durante el día

Se define la primera sub-zona en la zona interior del túnel: longitud que, a la velocidad máxima autorizada, es cubierta por un vehículo en 30 segundos. En esta sub-zona la recomendación del CIE es que se cumpla con el 50% de lo establecido en su publicación nº 88¹⁴, con un mínimo en virtud de la seguridad, estimado en 3 cd/m². Las uniformidades (U_0) deben mantenerse en cualquier caso.

La segunda sub-zona interior, toda la que no es la primera, en ciclo diurno el nivel de luminancia media en la calzada del alumbrado base se refiere a la

¹⁴ 2004, de la publicación CIE nº 88, en concreto referencia sobre el cuadro 6.7.1 sobre túneles largos.

misma publicación¹⁵, estableciéndose en el mismo 50% esta vez sobre los túneles clasificados como "muy largos", nunca bajando de las 2 cd/m² teniendo especial cuidado en que se mantenga la uniformidad (U₀).

En el caso específico de túneles urbanos se mantendrán las uniformidades y nunca de bajará de las 4 cd/m².

Por tanto, siempre que se mantenga la uniformidad, los niveles mínimos de luminancia admisibles son:

* Túneles de autovías y carreteras

- Primera sub-zona:

$$L_m \geq 3 \frac{cd}{m^2}$$

- Segunda sub-zona:

$$L_m \geq 2 \frac{cd}{m^2}$$

* Túneles urbanos

- Zona interior:

$$L_m \geq 4 \frac{cd}{m^2}$$

En periodo diurno en lo que se refiere al alumbrado de la zona de entrada (umbral y transición) de los túneles, podrá reducirse el nivel luminoso al 50% en las condiciones que se exponen a continuación.

¹⁵ En este caso sobre el cuadro 6.7.2: túneles muy largos.

3.13.3. Túneles inter-urbanos de dos sentidos

Se podrá reducir el nivel luminoso al 50% cuando su longitud sea igual o inferior a 120 metros, menos en los que concurran una o varias de las siguientes circunstancias:

- Salida no visible.
- Velocidad >70 km/h.
- Tráfico \leq 2.000 vehículos/día. sentido.

3.13.4. Túneles inter-urbanos de un solo sentido

Se podrá reducir el nivel luminoso al 50% cuando su longitud sea igual o inferior a 150 metros, menos en los que concurran una o varias de las siguientes circunstancias:

- Salida no visible.
- Velocidad >70 km/h.
- Tráfico \leq 10.000 vehículos/día. túnel.

3.13.5. Túneles urbanos

Se podrá reducir el nivel luminoso al 50% cuando su longitud sea igual o inferior a 200 metros, menos en los que concurran una o varias de las siguientes circunstancias:

* Salida no visible

Otra posible solución es bajar la velocidad de paso de los vehículos por la zona umbral y de transición en periodo diurno, actuando así también resulta justificable una disminución en los niveles de iluminación. Recurriendo a recomendaciones intracomunitarias europeas¹⁶ se encuentran datos según los cuales debido a la disminución de la longitud de la zona umbral (por su dependencia de la distancia de seguridad) del túnel del orden de un 20-25% cuando se reduce la velocidad

¹⁶ AFE, Asociación Francesa de Iluminación, incorporando el método de dimensionado del Centro de Estudios de Túneles (CETU).

de circulación de 90 a 70 km/h, se producen ahorros energéticos de entre un 20 a un 25% por menor requerimiento (en longitud) de potencia instalada. Con esa misma reducción de velocidad la Lth se puede reducir entre un 25 y un 45% según el sistema empleado (simétrico: 45%; contraflujo: 25%).

A mayores distancias un obstáculo situado en el interior del túnel subtiende un ángulo más pequeño en el ojo del conductor, por lo que resulta menos visible para el conductor desde la zona de acceso.

Se producen otras consecuencias como que la capa de aire entre el conductor que accede y la entrada del túnel es mayor, es decir, se cuenta con mayores luminancias atmosféricas de velo y reducción del contraste del obstáculo, que se aprecia con mayor dificultad. La consecuencia es que se exigen niveles de iluminación elevados en la zona umbral, que además es más larga, doble motivo que justifica el aumento de costes.

3.13.6. Reducción durante la noche

La referencia para el caso, como ya se ha estudiado, es la luminancia de la vía de acceso. Los niveles de iluminación en el interior del túnel deberán ser iguales a los de la vía a cielo abierto que lleva al vehículo a la entrada del túnel, con una recomendación de luminancia media en servicio de mantenimiento de 1 cd/m^2 , no excediendo nunca de un 120% del valor de referencia.

En el caso de un túnel que se encuentra incluido en el trazado de una vía a cielo abierto que no está iluminada en periodo nocturno, la luminancia media debe tener el valor mínimo indicado para el caso anterior (1 cd/m^2), con una uniformidad media global del 40% y una uniformidad longitudinal del 60%.

Por la noche y con velocidades de circulación por encima de los 50 km/h, debe iluminarse la vía a cielo abierto a la salida del túnel, en una longitud igual al doble de la distancia de seguridad o frenado y como mínimo en una distancia de 200 metros. La luminancia media en la calzada no será inferior a un tercio de la de diseño para la zona interior del túnel, con el mismo mínimo que el resto de los casos: 1 cd/m^2 .

Otra variable a controlar en este campo es el deslumbramiento perturbador o incremento de umbral TI. Éste debe ser inferior al 15% para las zonas umbral, transición e interior del túnel.

3.13.7. Otras consideraciones

La adecuación a la demanda y, por tanto, la variación en tiempo real en función de las variables de dependencia (durante el día la distancia de seguridad y L_{20} ; durante la noche la luminancia de la vía de acceso), es un aspecto a tener presente en el ahorro energético. Se pueden conseguir adaptaciones a días nublados, noches, momentos de mayor o menor luminancia natural y penetración de ésta, etcétera.

Las células fotoeléctricas que se han empleado tradicionalmente se sustituyen por luminancímetros, encargados del control de encendido y apagado. El cambio supone un ahorro de en torno al 25%.

Para que las medidas de ahorro pasivas sean eficaces deben ser compatibles con el conjunto de medidas activas y para tal efecto es importante la comprobación y limpieza de los fotómetros de control de las zonas de acceso y umbral del túnel (iluminación de refuerzo), así como su calibrado anual, lo que se traduce en un correcto mantenimiento y control sistemático sobre los fotómetros. Se trata de mecanismos preceptivos para el cumplimiento de las medidas de seguridad citadas en el RD 635/2006 y la Directiva 2004/54/CE¹⁷.

3.13.8. Ejemplos de mejora de la eficiencia (instalaciones existentes)

En la Orden circular 36/2015 sobre criterios a aplicar en la iluminación de carreteras a cielo abierto y túneles¹⁸ se registran diversas experiencias de mejora de la eficiencia energética en túneles. Las propuestas generales para conseguir un mayor rendimiento de los sistemas de iluminación en túneles son:

- Sustitución de componentes de la instalación.
- Mando de los regímenes de alumbrado.
- Sistemas de regulación de flujo y consumo de los puntos de luz.
- Organización y mejora de la explotación.

¹⁷ De 29 de abril.

¹⁸ Tomo II. Recomendaciones para la iluminación en túneles.

3.13.9. Sustitución de componentes de la instalación

Se procede a la identificación de los elementos críticos cuya sustitución puede mejorar sensiblemente el rendimiento. En la mayoría de las instalaciones en funcionamiento son:

- Las fuentes de luz y los equipos eléctricos auxiliares.
- Las luminarias.

3.13.10. Fuentes de luz y los equipos eléctricos auxiliares

Los túneles en servicio estudiados por el Gobierno de España presentan tres tipos de fuentes:

- Lámparas fluorescentes (en poca cantidad).
- Lámparas de sodio a baja presión (en poca cantidad).
- Lámpara de sodio alta presión (masivamente).

La mayoría de las lámparas fluorescentes registradas son de 26 mm de diámetro con balastos inductivos y se han empleado principalmente en los alumbrados de régimen permanente, nocturno y de media noche. El reemplazo más conservador ha llevado a pensar en la nueva generación de lámparas T-5 de 16 mm de diámetro, con balasto electrónico regulable. Las mejoras alcanzadas tienen que ver con:

- Eficacia luminosa que pasaría de 65-70 lm/W (lámpara + equipo) a 90-95 lm/w (lámpara + equipo), es decir se podría ahorrar un 25-30% del consumo total debido a estas lámparas.
- Duración de vida, que pasaría de unas 30.000 horas a unas 45.000 horas, prolongando un 50% más la vida de las lámparas.
- Se puede regular su flujo luminoso y consumo de manera progresiva, pudiendo reducir los niveles permanente, nocturno y de media noche en la medida que se desee, consiguiéndose al menos un 20-25% adicional de ahorro.

El ahorro total que puede alcanzarse siguiendo esta recomendación llega a un 40-45%.

Las lámparas de sodio a baja presión que se han registrado se montan en luminarias con eje mayor de gran longitud y se montan sobre un balasto poco eficiente, con grandes pérdidas. La sustitución conservadora propuesta varía la tecnología a VSAP que se montan con balastos electrónicos regulables para las zonas que requieren refuerzo. La mejora es notable en:

- Una mejora de la eficacia luminosa que pasaría de 65-70 lm/W (lámpara + equipo) a 90-95 lm/W (lámpara + equipo), es decir se podría ahorrar un 25-30% del consumo total debido a estas lámparas.
- Una mayor duración de vida, que pasaría de unas 30.000 horas a unas 45.000 horas, prolongando un 50% más la vida de las lámparas.
- Una regulación de su flujo luminoso y consumo de manera progresiva, pudiendo reducir los tramos de refuerzo de mayor nivel en el túnel, es decir en los tramos de umbral y transición, con lo que la reducción podría llegar a valores de un 30 - 35% adicional.

El ahorro general si se siguen estas pautas puede alcanzar el 50-55%.

Las lámparas de vapor de sodio de alta presión con balasto inductivo presentes en los túneles existentes pueden ser sustituidas para mejorar la eficiencia reemplazando los inductivos por balastos electrónicos regulables, con lo que se alcanza una mejor del 10-15% en términos de reducción de pérdidas del conjunto. Se puede conseguir otro tanto adicional por la mejora de la capacidad de regulación en todo el túnel, de manera los tramos umbral, transición e interior contribuyan a alcanzar un total de 30-35%.

En la Fig. 3.17 se muestra un tramo de la M40 (segunda circunvalación de Madrid), concretamente de trata del Túnel de las calzadas superpuestas, iluminado con VSAP. Zona interior, fotografía tomada en el sentido de la marcha¹⁹.

En las zonas de régimen permanente las VSAP pueden sustituirse por tecnologías LED con fuentes de alimentación auto-regulables, de lo que se derivan los siguientes beneficios:

- Una eficacia luminosa equivalente (lámpara + equipo).
- Una duración de vida, que pasaría de unas 45.000 horas a unas 70.000 horas, prolongando un 50% más la vida de las lámparas.

¹⁹ Fuente: Orden circular 36/2015 sobre criterios a aplicar en la iluminación de carreteras a cielo abierto y túneles. Tomo II.

- Una regulación del flujo luminoso y consumo de manera progresiva, pudiendo reducir los consumos en un 35-40% adicional.



Figura 3.17. Tramo de un túnel de la M40 VSAP.

En la Fig. 3.18 aparece un tramo de la M40 iluminado con LED, se trata del mismo túnel que en la ilustración anterior con una luminancia media de 3 cd/m².



Figura 3.18. Aplicación de LTP.

El resultado final, al sustituir en los tramos de luminancia constante, lámparas de VSAP por LED, podría llegar a ser de un ahorro del orden de un 35-40%.

3.13.11. Luminarias

La sustitución de las luminarias presenta un coste alto tanto en mano de obra como en la diferencia de valor del material saliente y el nuevo. Sólo se ejerce esta opción cuando los plazos de amortización (demostrables) están por debajo de los tres años. Los casos en los que su estudio de rentabilidad puede potenciar la acción suelen coincidir con:

- En luminarias de sodio a baja presión por luminarias de sodio a alta presión y balasto electrónico regulable.
- En luminarias de sodio alta presión por luminarias con LED y fuente de alimentación regulable para alumbrados permanente, nocturno y media noche.

3.13.12. Mando de los regímenes de alumbrado

En la práctica totalidad de los túneles inventariados (únicamente se salvan un par) la evaluación de la luminancia L_{20} se ha venido haciendo con célula fotoeléctrica. Para evitar los errores cometidos por este mando conviene que se sustituya por un luminancímetro de mando por boca de túnel, si éste es bidireccional, o con uno solo por túnel si éste es unidireccional.

Todos los túneles de Europa montan este tipo de dispositivo de mando que consigue ahorros de entre un 20 y un 25% además de tomar valores mucho más próximos y adaptables a los requerimientos ópticos del conductor.

3.13.13. Sistemas de regulación de flujo y consumo de los puntos de luz

Los sistemas de este tipo, alternativos para variar el flujo luminoso y el consumo de las fuentes de luz, principalmente en aquellos puntos de luz que formaban parte del alumbrado denominado permanente o nocturno se han montado exclusivamente en conjuntos con lámparas VSAP, en dos variedades:

- Los balastos de doble nivel.
- El estabilizador-reductor de cabecera de línea.

Los balastos electrónicos que se montan hoy consiguen aumentar los ahorros en consumos al poder regular de forma progresiva los flujos luminosos con una horquilla de disminución de consumos mucho mayor y sin dañar a las lámparas, además de generar menos pérdidas. Dado que realizan idéntica función que los balastos de doble nivel y son mucho más competentes en ella, no tiene sentido ya la instalación de aquellos.

Los estabilizadores-reductores de cabecera siguen siendo empleados por su bajo mantenimiento, aunque para garantizar su correcto servicio conviene que se revisen según los periodos establecidos. Es un sistema con gran capacidad de adaptación a instalaciones existentes y de bajo coste, razones suficientes para insistir en su aplicación en el alumbrado nocturno y de media noche.

Tanto el fluorescentes, como en VSAP y en LED, seguramente las únicas tecnologías que quedarán en los túneles europeos en breve, se han desarrollado tecnologías de regulación capaces de adecuar el flujo luminoso de cada punto de luz a aquél que se necesita en cada instante para cada régimen de alumbrado y para cada tramo de adaptación.

La adaptación a la curva de percepción del ojo humano es una de las variables que más gana con las tecnologías fluorescentes y LED en su totalidad y parte de las lámparas de VSAP. En todas ellas se puede regular el flujo entre el 10 y el 100%, horquilla algo más amplia en las LED de calidad y no aplicable para las VSAP con potencias superiores a 150W, que sólo pueden regular flujo luminoso a partir del 30%. Sin acudir a esta ventaja tendrían que configurarse complejos circuitos eléctricos que disparan los costes.

En cualquier renovación de sistemas en túneles existentes deberán prevalecer estos sistemas de regulación progresivos y estables, siempre que se justifique la inversión con los beneficios relativos al ahorro y la eficiencia energética, así como el incremento de su longevidad.

3.13.14. Organización y mejora de la explotación

Cualquiera de las recomendaciones descritas no tendrán efecto alguno sin una correcta organización, control y mejora continua de la explotación. Para la organización racional se recomienda²⁰.

²⁰ Orden circular 36/2015 sobre criterios a aplicar en la iluminación de carreteras a cielo abierto y túneles. Tomo II.

- El empleo de fuentes de luz regulables progresivamente para adaptar su flujo y consumo a las necesidades de cada tramo, régimen y situación.
- La instalación en cada luminaria de un sistema de control (emisor-receptor) de las órdenes dictadas desde un puesto centralizado, incluido todo ello en un sistema de gestión integral del túnel.
- El establecimiento de un sistema de comunicaciones fiable en una instalación sometida a las solicitudes de un túnel, y con un protocolo de comunicaciones abierto.
- La utilización de un sistema de gestión (similar a un DMX o un DALI) para poder integrar todas las funciones de manera automática o manual, a voluntad, para poder gobernar el túnel de la manera más adecuada.

3.13.15. Análisis económico

Las recomendaciones para el análisis económico resultan aplicables tanto a proyectos nuevos como a túneles en los que se operan las mejoras asociadas a su renovación o mantenimiento. Se impone la comparativa entre las opciones y alternativas propuestas, de manera que deba escogerse la de mayor ahorro energético por eficiencia y la más rentable económicamente considerando la instalación, el servicio y su mantenimiento. Pueden diferenciarse en:

- Proyectos de nueva construcción.
- Proyecto de rehabilitación y mejora.

Una de las diferencias más claras entre ellos es la consideración de los ingresos para gestionar el balance económico, cuestión aplicable a la rehabilitación y mejora, no a los de nueva construcción. Por esta razón debe presentarse, en cualquier caso el VAN y añadirse el TIR en el caso de la rehabilitación y mejora. Debe considerarse un periodo económico de 20 años, porque es ésta la vida útil para la que se programan los nuevos sistemas.

Los contenidos del capítulo de análisis económico para el caso de un proyecto de nueva construcción pueden ser²¹:

²¹ Proyecto de nueva construcción de la Instalación de alumbrado del túnel Juan Manuel Morón García. Autovía del Norte A-1, P.K. 92+092.

1. Introducción. Objeto.
2. Descripción general de la actuación.
3. Cálculo de la inversión.
4. Determinación de los gastos de consumo energético.
5. Determinación de los gastos de mantenimiento.
6. Análisis de rentabilidad.

Apéndice 1. Planos.

Apéndice 2. Presupuestos.

Para el caso de un Proyecto de Rehabilitación y mejora, los contenidos del capítulo de análisis económico puede seguir el mismo esquema.

Los apartados en los que las tipologías de lámparas entran en competencia en el capítulo económico se aprecian en las alternativas que se deben presentar.

En el ejemplo consultado (nueva construcción) las alternativas fueron:

- Alternativa 1 \Rightarrow VSAP.
- Alternativa 2 \Rightarrow LED+VSAP.

Los esquemas de las dos soluciones, tomados de la Orden circular 36/2015 sobre criterios a aplicar en la iluminación de carreteras a cielo abierto y túneles (Tomo II), se muestran en las Fig. 3.19 y 3.20.

En la alternativa 1, instalación proyectada con lámparas de VSAP, se instala iluminación exterior cuyas lámparas tienen una potencia de 400W, los báculos tienen 12 m de altura y una interdistancia aproximada de 40 m, e iluminación interior, cuyas lámparas tienen una potencia de 150, 250 y 400W, la altura de montaje es de 4,48 m y sus interdistancias medias aproximadas son de: 1,4 m en la zona de umbral, 3,5 m en las de transición y 12,8 m en la interior. Con esta solución está previsto instalar 511 puntos de luz.

En la alternativa 2, instalación proyectada con lámparas de VSAP y LED, se instala iluminación exterior de LED, cuyas lámparas tienen una potencia de 210 W, los báculos tienen 12 m de altura y una interdistancia aproximada de 35 m, e iluminación interior, cuyas lámparas de VSAP tienen una potencia de 250 y 400 W y las de LED de 104 W, la altura de montaje es de 4,48 m y sus interdistancias medias aproximadas son: 2,4 en las zonas de umbral, 6,5 m en las de transición y 15 m en la interior. Con esta solución está previsto instalar 436 puntos de luz.

El túnel consta de dos tubos unidireccionales de sección tipo bóveda con revestimiento de hormigón. Cada uno de ellos consta de tres carriles de 3,5 metros de ancho cada uno, arcones derecho e izquierdo 0,8 y 1 m de ancho respectivamente.

En el resto de aspectos ambas alternativas tienen las mismas características, que son las siguientes:

La instalación dispone de una acometida a la red y dos cuadros de mando (uno para cada tubo).

Existen cuatro regímenes de funcionamiento:

- Alumbrado "Pleno sol".
- Alumbrado "Nublado".
- Alumbrado "Crepuscular".
- Alumbrado "Nocturno" o "Permanente".

La distribución desde los cuadros hasta los puntos de luz se realiza mediante canalización de PVC en bandeja.

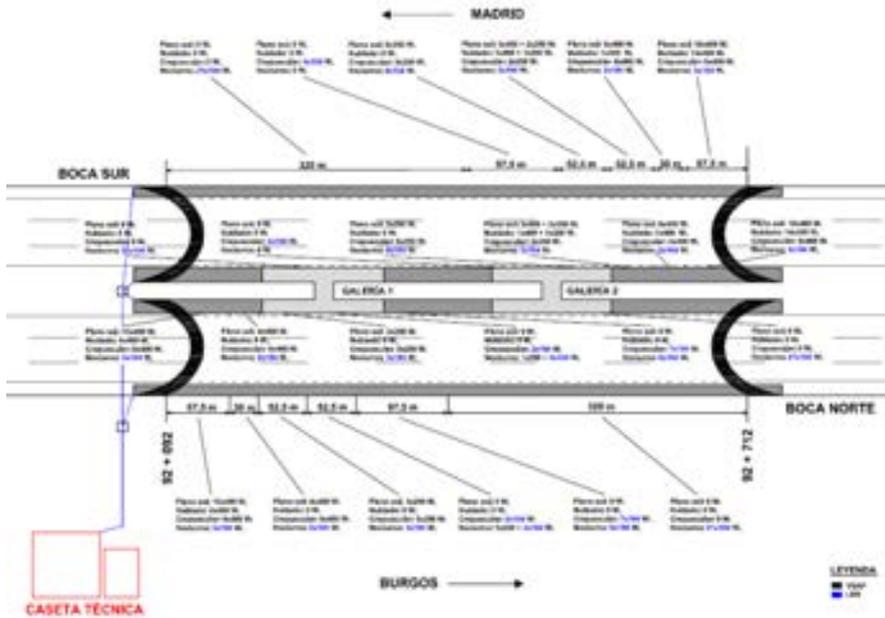


Figura 3.19. Solución 1.

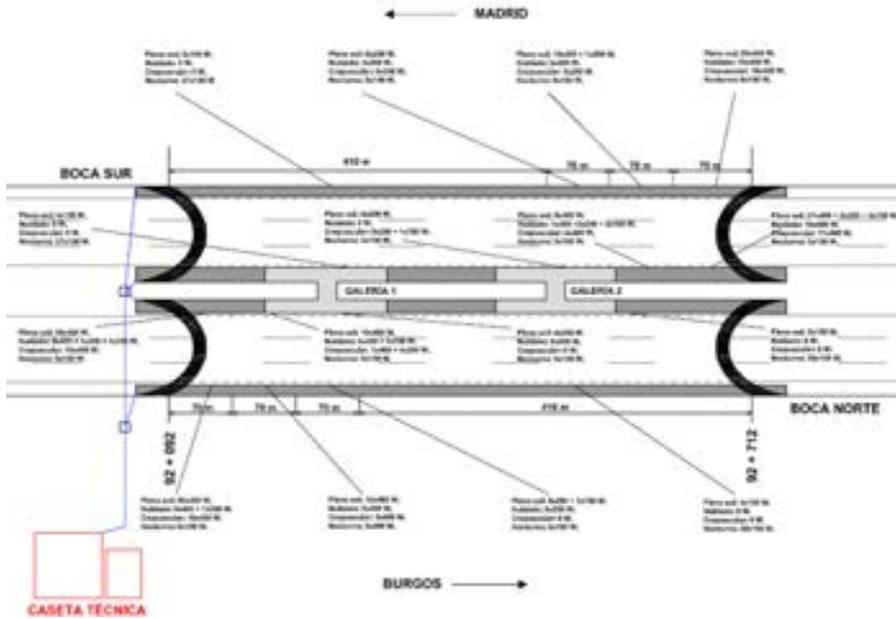


Figura 3.20. Solución 2.

Para la primera alternativa se ha construido la Tabla comparativo 3.22, en el que el VAN se ha calculado según:

- Plazo: El periodo de estudio considerado es de 20 años.
- Tasa de actualización: Se ha previsto una tasa anual única como media para todo el periodo del 5%, que es la rentabilidad que se estima que tendrá como media la deuda del estado en los 20 años.
- Inflación: Se ha considerado una inflación anual media del 3% para todos los años.

La nota (1) en el coste fijo anual, indica que la cifra deducida del cálculo original se ha multiplicado por 1,07 para considerar las pérdidas de la instalación, es decir, se la agregado 7%.

Tabla 3.22. Estudio económico para dos alternativas (nueva construcción). Clase 1.

Grupo de estudio	Variable de estudio	Alternativa	
		VSAP	LED+VSAP
Inversión	Coste de la instalación eléctrica	443.422,93 €	552.377,67 €
Consumo energético	Consumo teórico anual	673.940,26 kWh	459.526,00 kWh
	Coste fijo anual (1)	5.211,65 €	3.425,55 €
	Coste variable anual	80.872,83 €	55.143,12 €
	Costes totales explotación, anual	86.084,48 €	58.703,39 €
Mantenimiento ordinario	Revisiones y mediciones	24.809,00 €	24.809,00 €
	Limpieza luminarias	5.110,00 €	3.290,00 €
	Sustitución de lámparas	57.497,72 €	388.779,44 €
	Sustitución de equipos auxiliares	35.770,00 €	30.520,00 €
Mantenimiento correctivo	Reposición lámparas averiadas	143,75 €	426,25 €
	Reposición equipos auxiliares	89,42 €	76,30 €
Revisiones + reposiciones		30.152,17 €	28.601,55 €
Rentabilidad	VAN20 (5%,3%)	2.585.371,00 €	2.524.342,00 €

Aunque un primer principio de selección pudiera ser el menor VAN, también conviene analizar qué porcentaje representa la inversión inicial con respecto al total de los desembolsos y si éstos tienen una distribución a lo largo de los años que pueda ocasionar algún problema.

4.1. Introducción

La zonificación de las instalaciones de metro responde al siguiente esquema:

- Distribuidores principales.
- Vestíbulos¹.
- Andenes.
- Áreas de tránsito.
- Áreas de máxima concurrencia.
- Áreas de acceso.
- Zonas laborales o áreas de trabajo.

Las instalaciones del metro se encuentran en un grado de enterramiento mucho mayor que la mayoría de los túneles en vías de carretera. Por un lado se trata de túneles ferroviarios, y en ese aspecto pudieran ser técnicamente similares a los que forman parte de las infraestructuras típicas del sector del tren, pero, por otro, ninguno de los túneles (o de manera muy ocasional, como ocurre en algunas estaciones o tramos en superficie) tienen boca de entrada y salida como tales, se trata de instalaciones con muy escasa o nula penetración de la luz diurna.

El paso de los tramos oscuros (túneles *per se*) a los andenes es la situación equivalente al acercamiento del vehículo a la boca de salida del túnel (metro de París, Fig. 4.1)². Lo descrito afecta directamente a un menor requerimiento de iluminación de refuerzo. Aunque se considerara que los andenes presentaran una iluminación alta, sólo en aquellos con penetración de la luz natural diurna se llegaría a situaciones similares a las descritas para los túneles de carretera. En el metro

¹ En algunas clasificaciones quedan incluidas en la categoría de los "distribuidores principales".

² Fuente: Iluminación Lledó. Lledó SA.

los gradientes lumínicos que se producen entre las zonas oscuras y las más abiertas resultan de mucha menor entidad que en las carreteras.



Figura 4.1. Metro de París. Clase 1. Fuente: Lledó SA.

El control sobre el respeto a la velocidad de diseño es mucho más fiable en las instalaciones del metro que en las vías de circulación por las que el tráfico es más variado en su composición y los conductores no están desarrollando su trabajo, sino yendo hacia aquel o desplazándose por otra razón. Este hecho genera un efecto directo sobre la seguridad de la vía.

Las instalaciones de metro incluyen estancias que requieren iluminación convencional por sus características: oficinas, locales, etc. Otros elementos procedentes de la zonificación de la instalación como pasillos, escaleras, etc., guardan analogías claras con cualquier otra instalación interior semejante, con ciertas especificaciones orientadas a la seguridad de los usuarios que, a menudo, muestran prisa en sus desplazamientos entre andenes, especialmente en los necesarios trasbordos en las grandes ciudades.

Los estudios de ocupación y uso del metro en cualquiera de las ciudades indican que es un medio de transporte, como todos los públicos, con una irregular distribución diaria en el número de usuarios, cuestión particularmente importante a la hora de estimar la eficiencia energética de las instalaciones de iluminación interior. En las horas punta se acumulan viajeros mientras que en las valle son escasos.

En las citadas horas punta los intervalos entre trenes son menores y, por tanto, la gran masa de usuarios sigue una frecuencia equivalente. Cuando los beneficiarios llegan al metro desde el exterior lo hacen de manera individual o por pequeños grupos; cuando los viajeros provienen de zonas interiores del metro o de otro tipo de instalaciones de transporte como los trenes de cercanías o autobuses (caso de estaciones de metro que tienen conexión en los intercambiadores de transporte), acceden en masa y se significan momentos críticos para la iluminación, en especial, en las zonas con cambios de plano (escaleras,...) en la rutas que aquellos siguen o zonas con embudos, cruces de pasillos, etcétera. En un estudio correcto de iluminación debiera tenerse en cuenta la cantidad de sombras que en esos momentos proyectan los propios usuarios sobre sus compañeros de trayecto. Con las tecnologías actuales de control de la iluminación ésta debiera acomodarse a la afluencia irregular de viajeros, periódica, como se hace en la propia distribución de trenes.

Otra de las cualidades específicas del metro, aunque extensible a cualquier aplicación ferroviaria, es la iluminación de los elementos móviles: vagones, máquinas, etcétera. Todos ellos requieren iluminación interior para la comodidad visual y seguridad de los viajeros, así como exterior que permita que el encargado de guiar el convoy amplíe su campo visual hasta que éste garantice la seguridad del transporte.

Hasta el momento no se ha tratado la iluminación de los vehículos, como elementos componentes del tráfico rodado, por carretera; sin embargo, en el metro debieran considerarse. Las razones son claras: el gestor de las instalaciones es asimismo responsable de máquinas y vagones, y el ejercicio de la estandarización y el derivado control sobre las eficacias y eficiencias de la iluminación de estos elementos es posible (prácticamente imposible en los vehículos que circulan por carretera, dada su variabilidad en marcas, disposición, diseño, estado de conservación y limpieza, etc.).

La ventilación, en tanto a su influencia sobre las renovaciones de aire, es un elemento a tener en cuenta así como las temperaturas en algunas zonas de las instalaciones en las que no se cuente con la climatización adecuada. Para muchos de los sistemas de iluminación con alta eficiencia, por ejemplo para los LED, la temperatura de servicio presenta afecciones directas sobre su eficiencia y vida útil. Otras condiciones de servicio que pueden complicar la longevidad de los sistemas son la humedad, la temperatura geotérmica (término para diferenciarla de la temperatura acumulada por maquinaria, usuarios, luminarias, etc.).



Figura 4.2. Metro de París. Andenes. Fuente: Lledó SA.

Como en cualquier tipo de vía se considera la anchura de la misma. Así como en carreteras se habla de carriles, aquí se hace de vías. La particularidad es que exista o no una andén separador de las vías (metro de París, Fig. 4.2), como elemento análogo a una mediana de carretera. En el metro no existen dos vías paralelas con el mismo sentido de circulación, a diferencia de las autovías y autopistas. En las instalaciones que ahora se tratan, cuando existe vía doble (para dos sentidos de circulación) la boca es tanto de entrada como de salida, aunque para su gestión lumínica favorece el menor gradiente entre la zona oscura y la de andenes. Puede darse el caso, y afectaría al estudio lumínico, de la disposición estructural de columnas o pilares entre las dos vías (metro de Nueva York, Fig. 4.3). Es solo uno de los ejemplos de la necesaria adecuación del sistema de iluminación a la arquitectura el entorno en que se pone en servicio.

El desarrollo de espacios comerciales en las instalaciones enterradas de metro es otra de las características intrínsecas a la instalación que debe tenerse en cuenta. El comercio y los servicios presentan cualidades lumínicas que, en algún caso, pueden sufrir conflicto de intereses (rótulos luminiscentes, iluminación específica de escaparates, técnicas lumínicas de captación de la atención a posibles clientes, etc.) que deben gestionarse con profesionalidad atendiendo a los criterios prioritarios de seguridad y calidad en el servicio.



Figura 4.3. Metro de Nueva York. Fuente: Lledó SA.

En lo referente a la normativa se seguirán las reglamentaciones recogidas en el Código Técnico de la Edificación (CTE), en el Reglamento de Baja Tensión (REBT) y sus instrucciones técnicas (IT), así como en las normas, leyes y reglamentos que en cada zona de la instalación sean de aplicación según la legalidad vigente de la zona político-geográfica en la que la instalación desarrolle su servicio.

La iluminación de emergencia y en especial la de señalización para evacuación son especialmente importantes dado que los usuarios se encuentran en zona sensible que puede quedarse a oscuras a cualquier hora del día y que la tendencia ante cualquier emergencia (incendio, accidente, etcétera) es la de salir a la superficie, lo que supondría una acumulación masificada hacia las zonas abiertas. Los medios de atención a posibles heridos o de gestión del accidente, si de eso se tratara, comparten la vía de acceso con la de salida en la mayoría de los casos, lo que complica la gestión de la situación.

Para el planteamiento de la solución adecuada se procede a las siguientes actuaciones primarias:

- Situación político-geográfica de la instalación.
- Entorno de ubicación de la instalación: conformado por las personas, el conjunto de las instalaciones, la arquitectura, etc.

- Disposición geotérmica de la instalación.
- Usos fundamentales.
- Aspectos funcionales del diseño.

Con estas pautas se considera caracterizada la instalación de metro y se procede a la propuesta de soluciones aplicables.

4.1.1. Usuarios y trabajadores

Bajo este epígrafe se integran los viajeros y el personal de metro que trabaja en sus instalaciones. Al tratarse de un servicio no debe olvidarse nunca al beneficiario, de modo que en el proyecto de iluminación ha de ser considerado.

Atendiendo a las recomendaciones de la Dirección General de Tráfico sobre las personas para su caracterización, deben detectarse sus condiciones previas, las consecuencias de éstas y considerar, por fin, qué esperan del servicio esas personas para que conformen una variable de alta importancia en la futura solución propuesta. Las condiciones previas de las personas son:

- Socio-personales.
- De salud.
- Ambientales.

Las consecuencias de estas condiciones pueden ser limitaciones de tipo ambiental o funcional. Se debe trabajar para mejorar las condiciones y adaptarlas tanto a las personas como al entorno físico en el que se incluye el proyecto. Así las soluciones se plantearán según las esperanzas de las personas, que de un servicio como el metro esperan:

- Recorridos adaptados.
- Hábitos y comportamientos de movilidad.
- Adecuación de las normas (Incluyendo condiciones de Seguridad).
- Adaptación del ambiente (Áreas que procuren tal efecto).
- Adaptación a la tarea visual.

Para las limitaciones funcionales los factores más importantes son: el estado psíquico, la visión y el estado del aparato locomotor. Entre las limitaciones funcionales de las personas en los desplazamientos a realizar en las instalaciones del metro aparecen los problemas motores (58%), distinguir el color de los semáforos y señales (42%) y percibir la velocidad de los vehículos (44%). La distracción al caminar, que crece exponencialmente con la edad (20-30% en mayores de 70 años) pero también con el uso de móviles y otras tecnologías personales portátiles en todas las edades pero con un mayor impacto en los jóvenes y edades medianas; los problemas de orientación, cada vez presentes a más temprana edad y que pueden ser graves a partir de los 80 años (25%); antes, sobre los 65, la falta de aplicación de la memoria y los problemas de comprensión de las señales (25%). Como se aprecia en las proporciones indicadas entre paréntesis no se trata de limitaciones funcionales particulares, sino muy extendidas en el conjunto de la población³.

La predisposición de las personas a mejorar el entorno por su parte, tiene que ver directamente con su estado de ánimo, que varía con la edad (disminuye claramente desde los 55 a los 80, por ejemplo).

Los factores básicos considerables para las limitaciones ambientales son: las aglomeraciones, los cambios de nivel, el alumbrado y la señalización. De manera que se muestra claramente la relación entre el sistema de iluminación y las limitaciones ambientales para las personas. Las mayores dificultades registradas en este grupo son las grandes aglomeraciones (68%) y los bordillos altos (31%). Como compensación suelen elegir para caminar vías bien alumbradas (92%), con el piso en buen estado (77%), con aceras anchas (73%) y bien señalizadas (61%). Con la edad se incrementa la preferencia para pasear por pisos en buen estado y aceras anchas. Sólo un 10% señala que encuentran vías con escasez de ruido para caminar.

El último grupo de personas a tratar es el de aquellas que realizan su trabajo cada día en las instalaciones de metro. Éstos permanecerán en áreas restringidas y de uso exclusivo para el personal de la empresa y subcontratas de servicios, relacionadas con ésta. Los espacios que ocupan se pueden categorizar en:

- Industriales.
- De oficina.
- Instalaciones en general.

³ Según datos de la DGT.

En general la iluminación funcionará como un sistema centralizado que actúe sobre todas y cada una de las áreas derivadas de la zonificación de una instalación de metro y que estudie y proponga soluciones concretas sobre:

- Alumbrado General.
- Alumbrado Emergencia.
- Alumbrado de Vigilancia.
- Sistemas de Tele-vigilancia.
- Sistemas de Megafonía.
- Sistemas de Señalización.
- Cableados independientes.
- Sistemas de regulación en función del aporte de luz natural exterior.

4.2. Normativa a cumplir en las instalaciones de iluminación de redes metropolitanas subterráneas (Metro)

Tal y como indica el CEI⁴ en su participación en el grupo EVE⁵, la modificación de luminarias ya existentes adaptándolas a diferentes soluciones LED, implica que la organización encargada de dichas modificaciones adquiere la responsabilidad sobre la luminaria en aspectos de seguridad, compatibilidad electromagnética, fotometría y medio ambiente, así como otros aspectos legales. Esta responsabilidad perdura incluso si la luminaria vuelve a ser modificada volviendo a su arquitectura primitiva (extracción del bloque óptico/lámpara de LED), puesto que puede haberse dañado la luminaria original.

El producto resultante de las modificaciones anteriormente mencionadas se convierte en una nueva luminaria; por tanto, quien efectúa dichas modificaciones pasa a convertirse en fabricante de la misma, siendo aplicable la totalidad de la Legislación mencionada en este documento, así como la responsabilidad sobre el producto y su correcto funcionamiento. El usuario debe exigir al suministrador

⁴ Comité español de la Energía.

⁵ Ente vasco de la Energía.

todas las características y certificados de ensayo de las normas anteriormente señaladas, la responsabilidad del nuevo producto, los cálculos y ensayos luminotécnicos y la aptitud a la función del nuevo producto de acuerdo con lo establecido en la totalidad de la legislación vigente.

Deben cumplirse las normativas generales para las instalaciones de iluminación exterior, así como las específicas para túneles y vías enterradas o subterráneas. Muchas de las cuales se han venido desarrollando en este volumen. En general:

- Normativa nacional.
- Guías y recomendaciones de referencia.
- Normas UNE.
- Normativa europea.
- Normativa para luminarias de alumbrado exterior (REBT, CTE, etc.).

En implantación de tecnología LED el caso más extendido es el de sustitución de equipos anteriores (fluorescentes, VSAP, etc.) por nuevos equipos LED, de ahí que se preste mayor atención a los proyectos de reforma y rehabilitación que a los nuevos proyectos LED. La luminaria original está diseñada, fabricada, homologada y certificada para su funcionamiento con determinadas fuentes de luz, con el correspondiente equipo auxiliar, para un sistema óptico adecuado (fotometría amparada en los cálculos, mediciones y ensayos consiguientes), con el sistema de cierre complementario, así como la estructura mecánica necesaria, de forma que todo el conjunto cumpla con las especificaciones marcadas en la normativa. Este tipo de sustituciones se realizan para adaptar bloques ópticos de LED en luminarias instaladas diseñadas para el funcionamiento con lámparas de descarga y equipadas con los equipos auxiliares necesarios para éstas.

Al integrar el bloque óptico/lámpara de LED se ha de modificar o sustituir el actual circuito de alimentación para adaptarlo a la nueva fuente de luz. Estas modificaciones pueden comprometer la seguridad y características de la luminaria original. Es importante considerar que únicamente es posible garantizar la seguridad y características durante el funcionamiento de los componentes, incluidas las fuentes de luz tipo LED y sus accesorios asociados, cuando éstos son ensayados con la luminaria en la que se integrarán, cumpliendo todos los requerimientos de las normas UNE-EN 60598 y cualquier otra reglamentación de aplicación. Este tipo de sustituciones presentan diferentes problemas en los ámbitos de seguridad, ambiental y otras normativas que se desarrollan a continuación.

Cada uno de los componentes integrados en una luminaria debe cumplir las normas que le sean de aplicación:

- Módulos LED -UNE-EN 62031.
 - Módulos LED para alumbrado general. Requisitos de seguridad.
- Equipos de control y alimentación.
 - UNE-EN 61347-2-13. Dispositivos de control de lámpara. Requisitos particulares para dispositivos de control electrónico alimentados con corriente continua o corriente alterna para módulos LED.
- Lámparas LED con equipo de alimentación integrado.
 - El trámite como proyecto de norma con denominación provisional PNE-FprEN 62560, concluyó en la UNE-EN 62560:2013 y el título "Lámparas LED con balasto propio para servicios de iluminación general con tensión >50V. Especificaciones de seguridad". Las lámparas LED con equipo de alimentación integrado, también deberán cumplir con esta norma cuando sea aprobada.

4.2.1. Normativa nacional

- RD 1890/2008, de 14 de noviembre, por el que se aprueba el Reglamento de Eficiencia Energética en Instalaciones de Alumbrado Exterior y sus Instrucciones técnicas complementarias EA-01 a EA-07 y su Guía de Interpretación.
- Real Decreto 635/2006, de 26 de mayo, sobre requisitos mínimos de seguridad en los túneles de carreteras del Estado, que constituye la transposición al ordenamiento jurídico español de la Directiva 2004/54/CE de 29 de abril.
- Orden Circular 36/2015 sobre criterios a aplicar en la iluminación de carreteras a cielo abierto y túneles :TOMO I y TOMO II. El tomo II es específico para iluminación en túneles "Recomendaciones para la iluminación de túneles".
- Dirección General de Carreteras (1999). Recomendaciones para la iluminación de carreteras y túneles. Ministerio de Fomento, Madrid.

4.2.2. Otras guías y recomendaciones de Referencia

- Publicación CIE N° 88/2004. "Guía para el alumbrado de túneles de carretera y pasos inferiores".
- Publicación CIE N° 189/2010. "Criterios de Calidad de los cálculos de Iluminación en Túneles".
- Publicación CIE N° 193/2010. "Alumbrado de Emergencia en Túneles de Carretera".
- Publicación CIE N° 194/2011. "Medición in-situ de las propiedades fotométricas en Iluminación de Carreteras y Túneles".

4.2.3. Normas UNE

- Norma UNE-EN 62560:2013. "Lámparas LED con balasto incorporado para servicios de iluminación general con tensión > 50 V. Especificaciones de seguridad".
- Norma UNE-EN CR 14380:2007. "Aplicaciones de iluminación. Alumbrado de Túneles".

Recoge un informe de carácter técnico sobre la iluminación en túneles y vías subterráneas con tráfico motorizado y mixto. En toda su extensión trata las mismas propiedades, cualidad, características y circunstancias que se han desarrollado en el capítulo dos de la presente guía.

4.2.4. Normativa Europea

- Directiva 2004/54/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 29 de Abril de 2004, sobre requisitos mínimos de seguridad para túneles de la red trans-europea de carreteras.

4.2.5. Normativa para Luminarias de alumbrado exterior

- Directiva de Baja Tensión - 2006/95/CEE. Relativa a la aproximación de las Legislaciones de los estados miembros sobre el material eléctrico destinado a utilizarse con determinados límites de tensión.

- Directiva de Compatibilidad Electromagnética - 2004/108/CEE. Relativa a la aproximación de las Legislaciones de los estados miembros en materia de compatibilidad electromagnética y por la que se deroga la directiva 89/336/CE.
- Directiva ROHS 2011/65/UE. Relativa a las restricciones a la utilización de determinadas sustancias peligrosas en aparatos eléctricos y electrónicos.
- Directiva de Eco-diseño 2009/125/CE. Por la que se instaura un marco para el establecimiento de requisitos de diseño ecológico aplicables a los productos relacionados con la energía.
- Reglamento N° 1194/2012 de la Comisión, por el que se aplica la Directiva de Ecodiseño-2009/125/CE a las lámparas direccionales, lámparas LED y sus equipos.
- Reglamento CE N° 245/2009, de la Comisión de 18 de marzo por el que se aplica la Directiva 2005/32/CE del Parlamento Europeo relativo a los requisitos de diseño ecológico, para lámparas, balastos y luminarias.
- Reglamento N° 874/2012, de la Comisión de 12 de julio de 2012 por el que se complementa la Directiva 2010/30/UE del Parlamento Europeo y del Consejo en lo relativo al etiquetado energético de las lámparas eléctricas y las luminarias.
- Real Decreto 154/1995, por el que se modifica el Real Decreto 7/1988, de 8 de enero, sobre exigencias de seguridad del material eléctrico destinado a ser utilizado en determinados límites de tensión y su Guía de Interpretación.
- Real Decreto 1890/2008, que aprueba el Reglamento de eficiencia energética en instalaciones de alumbrado exterior y sus instrucciones técnicas complementarias EA-01 a EA-07 y su Guía de Interpretación.
- Real Decreto 842/2002, por el que se aprueba el Reglamento Electro-técnico de Baja Tensión y sus instrucciones Técnicas Complementarias ITC-BT-01 a ITC-BT-51.

4.2.6. Requisitos de Seguridad

- UNE EN 60598-1 Luminarias. Requisitos generales y ensayos.

- UNE EN 60598-2-3 Luminarias. Requisitos particulares. Luminarias de alumbrado público.
- UNE EN 60598-2-5 Luminarias. Requisitos particulares. Proyectores.
- UNE EN 62493 Evaluación de los equipos de alumbrado en relación a la exposición humana a los campos electromagnéticos.
- UNE EN 62471-2009 Seguridad fotobiológica de lámparas y aparatos que utilizan lámparas.
- PNE-FprEN 62722 Características de funcionamiento de luminarias. Parte 2-1. Requisitos particulares para luminarias LED.

4.2.7 Compatibilidad Electromagnética

- UNE-EN 61000-3-2. Compatibilidad electromagnética (CEM). Parte 3-2: Límites. Límites para las emisiones de corriente armónica (equipos con corriente de entrada 16 A por fase).
- UNE-EN 61000-3-3. Compatibilidad electromagnética (CEM). Parte 3: Límites. Sección 3: Limitación de las variaciones de tensión, fluctuaciones de tensión y *flicker* en las redes públicas de suministro de baja tensión para equipos con corriente de entrada 16 A por fase y no sujetos a una conexión condicional.
- UNE-EN 61547. Equipos para alumbrado de uso general. Requisitos de inmunidad CEM.
- UNE-EN 55015. Límites y métodos de medida de las características relativas a la perturbación radioeléctrica de los equipos de iluminación y similares.

4.2.8. Componentes de las luminarias

- UNE-EN 62031. Módulos LED para alumbrado general. Requisitos de seguridad.
- UNE-EN 61347-2-13. Dispositivos de control de lámpara. Parte 2-13: Requisitos particulares para dispositivos de control electrónicos alimentados con corriente continua o corriente alterna para módulos LED.

- UNE-EN 62384. Dispositivos de control electrónicos alimentados en corriente continua o corriente alterna para módulos LED. Requisitos de funcionamiento.
- PNE-FprEN 62717 Módulos LED para iluminación general. Requisitos de funcionamiento.

4.2.9. Certificaciones sobre normativa

Entre todas las certificaciones de componentes, seguridad, eficiencia, integración ambiental, etc., destacan algunas como:

- Certificados ROHS. En cumplimiento de la Directiva del mismo nombre sobre las restricciones a la utilización de determinadas sustancias peligrosas en aparatos eléctricos y electrónicos.
- Certificados EMC. Compatibilidad electro-magnética.

No es posible garantizar la conformidad EMC (compatibilidad electromagnética) del bloque óptico/ lámpara LED de forma independiente a la luminaria. Por este motivo, para garantizar el cumplimiento de los requisitos de compatibilidad electromagnética estipulados en las normas UNE-EN es obligatorio ensayar cada tipo de luminaria modificada.

4.2.10. Otras consideraciones

* Mercado legal

Según el CEI⁶, el marcado del fabricante original de la luminaria pierde validez ante este tipo de modificaciones, siendo responsabilidad del encargado de realizar las mismas el obtener nuevamente el marcado CE de la nueva luminaria resultante. Cabe destacar que el marcado CE, supone elaborar un "Expediente Técnico" donde se explique la normativa aplicada, los medios con los que cuenta en su proceso productivo y su sistema de calidad. Una vez elaborado dicho expe-

⁶ Comité español de iluminación.

diente, debe redactarse una "Declaración de Conformidad" con toda la Legislación aplicable y la Normativa con la que cumple y, a continuación, marcar sobre la luminaria modificada el logotipo CE, o en la forma que se señala en la propia directiva. En este caso se consideraría a quien realice las modificaciones como un fabricante de luminarias, por lo que además de marcar la luminaria CE, deberán tenerse en cuenta el resto de obligaciones que la propia modificación conlleva.

* Consideraciones ambientales

Los componentes que se integran en la luminaria deben cumplir la legislación vigente sobre la restricción de sustancias peligrosas en productos electrónicos para el medio ambiente.

Las luminarias, las lámparas y los LED están sometidos a la Directiva de Residuos Eléctricos y Electrónicos 2002/95/CE, traspuesta a la Legislación Española por el Real Decreto 208/2005, que obliga al productor a responsabilizarse de la recogida de estos residuos y su correcto tratamiento, para lo cual deberá estar inscrito en un SIG (Sistema Integrado de Gestión), y abonar las tasas ECORAE correspondientes.

La nueva luminaria deberá acreditar su cumplimiento sobre las normas de seguridad Fotobiológica.

* Distribución luminosa

La modificación del bloque óptico de la luminaria variará el resultado fotométrico obtenido en la instalación, pudiendo no cumplir el Reglamento de Eficiencia Energética en Alumbrado Exterior vigente.

El flujo luminoso de la luminaria y su distribución variará, por lo que la nueva instalación no garantiza el cumplimiento de los parámetros luminosos (luminancias, iluminancias, uniformidades, deslumbramiento, etc.) alcanzados en la instalación original.

El reflector de la luminaria está diseñado para una lámpara de descarga con un único punto de emisión de luz. Al sustituir esta lámpara por un bloque óptico/lámpara equipada con tecnología LED, varía el centro emisor de luz, afectando así a la distribución fotométrica resultante.

* **Disipación térmica, flujo y vida útil**

Al integrar esta nueva tecnología en una luminaria no diseñada para ello, no garantiza la correcta disipación de calor del nuevo sistema. El aumento de la temperatura de funcionamiento del LED, provoca la reducción del flujo luminoso emitido por el LED, su vida útil e incluso, el fallo total del mismo.

Por todos los motivos anteriormente reseñados, es cuestionable que la nueva instalación garantice los parámetros de diseño originales.

* **Garantía de la luminaria**

Las modificaciones citadas provocan la pérdida de toda garantía del fabricante original de la luminaria ante posibles reclamaciones, es decir, el fabricante original de la luminaria queda excluido de toda responsabilidad relativa a resultados, funcionamiento y seguridad de la luminaria.

El fabricante original del producto manipulado y transformado, podría exigir daños y perjuicios al responsable de dicha transformación si estima que la misma ha dañado su nombre, prestigio o imagen.

* **Norma 12464.1. Iluminación de los lugares de trabajo en interior**

Norma relacionada con la Directiva 2002/91/CE relativa a la eficiencia energética de los edificios. En 2002 se aceptó una de las transposiciones exigidas por la citada directiva, ésta se corresponde con la Norma UNE 12464-1 relativa a "Iluminación de los lugares de trabajo en interior".

La Norma, a la que debe acudirse en el origen de todos los proyectos de iluminación para lugares de trabajo en interiores recomienda el cumplimiento no solo cuantitativo, sino también cualitativo, de dos aspectos fundamentales de la tarea visual:

- Confort visual.
- Rendimiento del color.

Dentro del confort visual se incluyen otros parámetros y variables importantes como la relación de luminancias entre tarea y entorno, o el control preciso del deslumbramiento producido por las fuentes de luz, e incluso las pautas para evitar deslumbramientos por las pantallas en el ejercicio del trabajo. Se tratan las pérdi-

das de valor, vida útil y media por falta de mantenimiento o por su envejecimiento. Con todo ello, la novedad más concreta es la que incide sobre el rendimiento del color: delimita el uso de determinadas lámparas cuando no reproducen los colores con la calidad adecuada para el trabajador.

Para cualquier tarea visual relacionada con salas o recintos en los que se produce ocupación de gran duración o permanente, se exige un índice de $R_a > 80$. Cuestión diferente es la de pasillos y zonas de tránsito.

La norma recoge todo tipo de actividad como la escolar, sanitaria y otras que, por razones obvias no se tratan aquí. Sí se apuntan las que tienen relación con las instalaciones de metro.

* Requisitos según actividad

Los requisitos expuestos responden a tres necesidades básicas humanas:

- Confort visual.
- Prestaciones visuales, que aumenta considerablemente el tiempo durante el que se puede ejercer la tarea visual.
- Seguridad.

Se establece una referencia para cada tipo de actividad y a ella se asocian diferentes valores en una tabla confeccionada para la Norma, que contiene las siguientes columnas:

- Tareas o actividades.
- Iluminancia mantenida.
- Límites de UGR.
- Índice R_a .
- Se recogen aplicaciones especiales y excepciones.

* Lugares de pública concurrencia

Para la UE el R_a es una variable que mide con mayor capacidad la calidad de la iluminación como la iluminancia mantenida o la temperatura del color, lo que

puede comprobarse en la Tabla 4.1. De ella se ha extraído únicamente aquello que puede relacionarse con las instalaciones de metro, suprimiéndose apartados como los dedicados a restaurantes y hoteles, teatros, salas de conciertos y cines, ferias y pabellones de exposiciones, museos, bibliotecas y aparcamientos públicos.

Tabla 4.1. Áreas comunes.

Áreas comunes				
nº ref	Área, tarea, actividad	Em (lux)	UGR _l	R _s
1.1	Halls de entrada	100	22	80
1.2	Guardarropas	200	25	80
1.3	Salones	200	22	80
1.4	Oficinas de taquillas	300	22	80

* Áreas de transporte

La cantidad de horas que los trabajadores pasan en los medios de transporte así como la consideración laboral *in itinere* de los traslados de las personas, han hecho recomendable introducir una tabla específica en la Norma (Tabla 4.2). De nuevo el límite se establece en un R_s = 80. En el cuadro mostrado se ha prescindido de los apartados que no tienen referencia directa con las instalaciones de metro, es decir, los aeropuertos.

Tabla 4.2. Instalaciones ferroviarias.

Instalaciones ferroviarias				
nº ref.	Área, tarea, actividad	Em (lux)	UGR _l	R _s
2.1	Andenes cubiertos y pasos subterráneos de pasajeros	50	28	40
2.2	Sala de taquillas y vestíbulo	200	28	40
2.3	Oficina de billetes, de equipajes y contadores	300	19	80
2.4	Salas de espera	200	22	40

Según la zona variará la temperatura del color y la luminancia media establecida, pero no el índice de reproducción cromática que siempre será mayor de 80. En concreto, en ferrocarriles y metro la recomendación es la misma ($R_a > 80$) para las salas de espera y oficinas de despacho de billetes y/o equipajes; en el caso de andenes y pasos subterráneos de pasajeros se reduce a la mitad: $R_a > 40$. En la práctica, dado que los pasillos no suelen ser solo eso, sino disponer de una cierta oferta comercial y de ocio, en los proyectos suele considerarse el estable 80 para su conjunto.

Cuando las personas se trasladan, especialmente en transportes públicos, requieren confort y salud visual, facilidad para ubicarse y localizar los puntos de interés y seguridad.

* Actividades industriales y artesanales

En las labores de mantenimiento y en las tareas propias de la labor en talleres de metro son aplicables segmentos específicos de este cuadro, que resulta el más extenso de la norma y en el que aparecen apartados dedicados a: agricultura, panaderías, peluquerías, etc. En la Tabla 4.3 se extraen únicamente las referencias en interés para este capítulo.

Tabla 4.3. Industria eléctrica.

Industria eléctrica				
nº ref.	Área, tarea, actividad	Em (lux)	UGR _L	R _a
6.5	Trabajo de ensamblaje basto	300	25	80
6.6	Trabajo de ensamblaje medio	500	22	80
6.7	Trabajo de ensamblaje fino	750	19	80
6.8	Trabajo de ensamblaje de precisión	1000	16	80
6.9	Talleres de electrónica, ensayos y puesta a punto	1500	16	80
Trabajo y tratamiento de metales				
nº ref.	Área, tarea, actividad	Em (lux)	UGR _L	R _a
13.1	Forja en troquel abierto	200	25	60
13.2	Estampación en caliente y soldadura	300	25	60
13.3	Mecanzación basta y media	300	22	60
13.4	Mecanzación de precisión	500	19	60
13.5	Trazado e inspección	750	19	60
13.6	Talleres de estirado de hilos y tubos, conformado en frío	300	25	60

Tabla 4.3. Industria eléctrica. (Continuación).

13.7	Mecanización de chapa (e>5mm)	200	25	60
13.8	Mecanización de chapa (e<5mm)	300	22	60
13.9	Fabricación de herramientas de corte	750	19	60
13.10	Montaje basto	200	25	80
13.11	Montaje medio	300	25	80
13.12	Montaje fino	500	22	80
13.13	Montaje de precisión	750	19	80
13.14	Galvanización	300	25	80
13.15	Preparación de superficies y pintura	750	25	80
13.16	Fabricación de herramientas, patrones, mecánica de precisión y micromecánica	1000	19	80
Centrales de energía eléctrica				
nº ref.	Área, tarea, actividad	Em (lux)	UGR _c	R _v
15.1	Planta de suministro de combustible	50	-	20
15.2	Alojamiento de la caldera	100	28	40
15.3	Salas de máquinas	200	25	80
15.4	Salas laterales (bombas, condensadores, ...)	200	25	60
15.5	Salas de control	500	16	80
15.6	Aparatos de conmutación exterior	20	-	20
Fabricación de vehículos				
nº ref.	Área, tarea, actividad	Em (lux)	UGR _c	R _v
19.1	Carrocería y montaje	500	22	80
19.2	Pintura, cámara, pulverización, cámara de pulido	750	22	80
19.3	Pintura: retoque e inspección	1000	19	80
19.4	Fabricante de tapicería	1000	19	80
19.5	Inspección final	1000	19	80

4.3. Soluciones de iluminación para estaciones de metro: tecnología LED

La determinación de la solución adecuada requiere de caracterizaciones previas relativas a los puntos listados como pautas en el apartado anterior. El trabajo se organiza por niveles:

- Nivel 0: preparación (adaptación al entorno).
- Nivel 1: requerimientos del entorno.
- Nivel 2: personas.
- Nivel 3: conjunto de instalaciones.

En el entorno de inclusión de la instalación se estudiarán los niveles de iluminación en función de las condiciones climatológicas. Los niveles máximos de iluminación se determinarán en función de la actividad o área a estudio.

La temperatura de color de la fuente luminosa, así como el índice de reproducción cromática simulara luz del día:

- 4.000 K para grandes áreas IRC >85%.
- 6.000 K para áreas de dimensiones reducidas IRC > 85%.

El sistema de iluminación deberá significar una solución flexible en su integración en el conjunto de la arquitectura de la instalación. Se incidirá sobre su integración específicamente en color y forma (con la tecnología presente se puede variar la longitud de onda emitida —color— cuando se requiera).

Si la integración arquitectónica mermara de alguna forma el potencial o la capacidad de iluminación del sistema o alguna de sus partes, se incorporarían subsistemas ópticos que equilibraran esas carencias hasta optimizar el servicio del conjunto. Se podrán emplear: difusores acrílicos de alta transmitancia, reflectores especiales.

El estudio del entorno arquitectónico incluirá:

- Materiales constructivos empleados.
- Diseño arquitectural de los cañones.
- Diseño del trazado.
- Áreas de máxima concurrencia.
- Iluminación específica de elementos ornamentales.

De su análisis derivaran las decisiones que lleven a determinar:

- Nivel de reflexión de los paramentos.
- Ubicación y sistemas de fijación.
- Disposición de la iluminación y refuerzo de áreas de alto riesgo.
- Adecuar los niveles de iluminación.
- Solución específica de iluminación según su máxima integración arquitectónica.

La presencia de paramentos claros, con un acabado mate, conseguirá evitar deslumbramientos o efectos de luz desagradables al viajero (Fig. 4.4).



Figura 4.4. Paramentos claros en los pasillos.

La variabilidad de los sistemas de anclaje es función de la arquitectura propia de cada espacio. Las claves son su adaptabilidad a cualquier tipo de fijación a techo, pared u otro elemento presente (vigas, pilares, etc.), de manera que no afecte a las características ingenieriles de la estructura. En la Fig. 4.5 se aprecian diferentes disposiciones de sujeción en estaciones de metro.



Figura 4.5. Diferentes sujeciones de luminarias en el Metro.

La distribución de luminarias es función de la zona a la que dan servicios: vestíbulos, distribuidores principales (Fig. 4.6, izquierda), andenes, escaleras, conectores o pasillos de tránsito, áreas de máxima concurrencia (zonas de tornos, conectores de intercambiadores o trasbordos, etc.), accesos y salidas (conexiones con el exterior), áreas laborales (ocupadas por los trabajadores del metro o las empresas que a éste dan servicio. Fig. 4.7, derecha).



Figura 4.6. Distribuidores principales y áreas de trabajo en el Metro.

Los requerimientos fundamentales del entorno desembocarán en el diseño de la solución adecuada diferenciándola en:

- Iluminación de superficies.

- Iluminación arquitectónica.
- Seguridad.
- Emergencia.
- Vigilancia.
- Comunicación.

Suponiendo también la base de estudio para la estimación de los costes de mantenimiento y los costes energéticos, cuyas funciones se minimizarán en la aplicación de la solución adoptada.

En lo referido a las personas las soluciones de alumbrado estarán orientadas hacia la mejora de: la movilidad (Fig. 4.7, izquierda, VSAP), estado de aglomeración, señalización de emergencia, entorno industrial (Fig. 4.7, derecha), oficinas y centros de gestión.



Figura 4.7. Movilidad de las personas y talleres del Metro de Madrid.

4.3.1. Conjunto de instalaciones

En el conjunto de instalaciones se procede a la recogida de datos de la que derivará el análisis pertinente. Según la zonificación varían los requerimientos generales de servicios y, con éstos, los de iluminación. En cada área se definirán las claves específicas propias (CEP), el conjunto de los sistemas existentes (SE) (por si en algún caso pueden interactuar con el sistema de iluminación que se proponga

para la solución), los parámetros arquitectónicos (PA), las instalaciones propias de la función del área o zona y, por último, los requerimientos del sistema de iluminación (ILU). De este modo se elaboran fichas como las que siguen:

ZONA/ÁREA: identificación del área o zona

- **CEP:** claves específicas propias.
- **SE:** conjunto de los sistemas existentes.
- **PA:** parámetros arquitectónicos.
- **IP:** instalaciones propias de la función del área o zona.
- **ILU:** requerimientos del sistema de iluminación.
- **SOL:** marco caracterización de las soluciones.

ZONA/ÁREA: Zonas de acceso

- **CEP:** Iluminación y Seguridad.
- **SE:** Alumbrado General, Alumbrado Emergencia, Sistemas de Tele-vigilancia, Sistemas de Señalización.
- **PA:** Geometría Interior / Exterior.
- **IP:** Sistemas de Vigilancia Señalización.
- **ILU:** Solución adaptada a la arquitectura Niveles medios 100-200 lux Iluminación delimitadora de perímetros.
- **SOL:**
 - Iluminación General adecuado sobre plano de trabajo.
 - Sistema de iluminación canalizador y guía de luz.
 - Iluminación integrada en elementos de movilidad.

ZONA/ÁREA: Distribuidores principales

- **CEP:** Orientación y Seguridad.
- **SE:** Alumbrado General, Alumbrado Emergencia, Alumbrado de Vigilancia, Sistemas de Tele-vigilancia, Sistemas de Megafonía, Sistemas de Señalización.
- **PA:** Áreas de doble altura Arquitectura particular Elementos de movilidad.
- **IP:** Megafonía, distribución homogénea; Alumbrado de emergencia, integrada en luminaria, bloques autónomos; Alumbrado de vigilancia, cableado específico en iluminación; Señalización, adaptada a las dimensiones del área.
- **ILU:** Solución adaptada a la arquitectura; Refuerzo de la arquitectura; Niveles medios 250-300 lux; Intensificar la iluminación en las zonas próximas a los accesos; Delimitadora de los perímetros.
- **SOL:**
 - Iluminación General adecuado sobre plano de trabajo.
 - Realce de la arquitectura (Iluminación indirecta / Cambio de color).
 - Refuerzo de los perímetros para una mejor orientación.
 - Alumbrado de Exterior integrado en el interior.

ZONA/ÁREA: Áreas de máxima concurrencia

- **CEP:** Orientación, Seguridad y Vigilancia.
- **SE:** Alumbrado General, Alumbrado Emergencia, Alumbrado de Vigilancia, Sistemas de Tele-vigilancia, Sistemas de Señalización Cableados independientes.
- **PA:** Funcional Obstáculos para la movilidad Regulación del flujo de personas.
- **IP:** Alumbrado de emergencia, integrada en luminaria, bloques autónomos; Alumbrado de vigilancia, cableado específico en iluminación; Sistemas de Vigilancia; Señalización.
- **ILU:** Solución adaptada a la arquitectura; Niveles medios 300 lux; Iluminación de lectura y reconocimiento; Iluminación delimitadora de elementos particulares.

ZONA/ÁREA: Áreas de máxima concurrencia

- **SOL:**
 - Iluminación localizada.
 - Alumbrado de señalización.
 - Iluminación como guía de luz.

ZONA/ÁREA: Áreas de trabajo

- **CEP:** Iluminación y Seguridad.
- **SE:** Alumbrado General, Alumbrado Emergencia, Alumbrado de Vigilancia, Sistemas de Señalización.
- **PA:** Geometría Interior / Exterior.
- **IP:** Alumbrado de emergencia, integrada en luminaria, bloques autónomos; Alumbrado de vigilancia, cableado específico en iluminación; Sistemas de Vigilancia; Señalización, Megafonía.
- **ILU:** Solución adaptada a la necesidad Iluminación general / localizada; Niveles medios 300/ 500 lux; Iluminación libre de deslumbramiento molesto; Iluminación con protección añadida.
- **SOL:**
 - Iluminación con gran confort visual.
 - Niveles de iluminación adaptados a la actividad.
 - Ergonomía en los puestos de trabajo.
 - Ausencia de deslumbramiento molestos.
- **Cocheras y talleres**
 - Iluminación general desde grandes alturas.
 - Niveles de iluminación adaptados a la actividad Iluminación localizada en áreas de trabajo.
 - Iluminación exterior en zonas de entrada.

ZONA/ÁREA: Andenes

- **CEP:** Seguridad y Vigilancia.
- **SE:** Alumbrado General Alumbrado, Emergencia Alumbrado de Vigilancia, Sistemas de Tele-vigilancia, Sistemas de Megafonía, Sistemas de Señalización, Cableados independientes.
- **PA:** Geometría del túnel, Espacio disponible (movilidad).
- **IP:** Alumbrado de emergencia, integrada en luminaria, bloques autónomos Alumbrado de vigilancia, cableado específico en iluminación Sistemas de Vigilancia Señalización, Megafonía.
- **ILU:** Solución adaptada a la arquitectura; Niveles medios 350-500 lux sobre área de seguridad andén; Iluminación de lectura y reconocimiento; Iluminación delimitadora de perímetros.
- **SOL:**
 - Iluminación directa (línea continua o discontinua- Fig. 4.8, izquierda).
 - Iluminación indirecta (línea continua- Fig. 4.8, derecha- o discontinua).



Figura 4.8. Iluminación directa e indirecta.

ZONA/ÁREA: Áreas de tránsito de personas

- **CEP:** Iluminación Adaptada a las necesidades.
- **SE:** Alumbrado General Alumbrado, Emergencia Alumbrado de Vigilancia, Sistemas de Tele-vigilancia, Sistemas de Megafonía, Sistemas de Señalización Cableados independientes, Sistemas de regulación.
- **PA:** Geometría del túnel Elementos de movilidad Longitud de los pasillos.

ZONA/ÁREA: Áreas de tránsito de personas

- **IP:** Alumbrado de emergencia, integrada en luminaria, bloques autónomos; Alumbrado de vigilancia, cableado específico en iluminación; Sistemas de Vigilancia Señalización.
- **ILU:** Solución adaptada a la arquitectura Niveles medios 150-200 Lux; Iluminación de reconocimiento; Iluminación delimitadora de los perímetros; Iluminación específica para los elementos de movilidad.
- **SOL:**
 - Iluminación General adecuado sobre plano de trabajo.
 - Sistema de iluminación canalizador y guía de luz.
 - Iluminación integrada en elementos de movilidad.

4.3.1. Iluminación funcional e iluminación integrada

Se diferencian los sistemas de iluminación en dos grandes grupos según el papel que juegan en el servicio de las instalaciones de líneas metropolitanas. En los distribuidores principales, las áreas de acceso y las de tránsito, se impone el criterio de integración en el entorno arquitectónico; en andenes, áreas de máxima concurrencia y áreas de trabajo, la funcionalidad de la iluminación es prioritaria sobre cualquier otra consideración, como se aprecia en la Fig. 4.9. Se puede determinar que la iluminación funcional es la solución cuando se trata de áreas que se definen como "estancia", en las que la presencia de personas se dilata en el tiempo, bien con cambio o sin cambio de aquellas; la integración arquitectónica gana en importancia en las zonas donde las personas se encuentran de paso.



Figura 4.9. Iluminación integrada y funcional.

Los criterios a seguir para configurar las zonas de paso (iluminación integrada en el entorno arquitectónico) son:

- Niveles medios de Iluminación con mayor o menor uniformidad.
- Iluminación no continua.
- Realce de la arquitectura.
- Garantizar la orientación.
- Iluminación Indirecta con apoyo de luminarias de luz directa.

Los parámetros sobre los que se establecerá una solución adecuada para los sistemas de iluminación funcionales (estancias o máxima concurrencia), son:

- Niveles medios de Iluminación adaptados a la actividad Iluminación continua y canalizadora de otras instalaciones.
- Garantizar la orientación y la evacuación en caso de emergencia.
- Iluminación Directa / Indirecta → proporcione luz de volumen, aumento de la seguridad de los usuarios.
- Confort visual.

La iluminación directa deberá garantizar una luz adaptada a la tarea, aportar seguridad en la movilidad y constituir un elemento de orientación precisa. Se empleará siempre que se requiera: iluminación óptima en plano de trabajo, iluminación vertical sobre paramentos, iluminación de reconocimiento o iluminación de orientación.

La iluminación indirecta cumplirá funciones de realce del diseño global, confort visual y mejora de la orientación, captando la atención (incluso pasiva) de las personas. Se aplicará como solución siempre que la situación contemple la necesidad de: iluminación de perímetros, iluminación arquitectural, iluminación de volumen o un control absoluto del deslumbramiento directo.

4.3.2. Dirección del haz de luz

La dirección de orientación del haz de luz es función de la zonificación de la instalación.

En distribuidores principales la iluminación indirecta es útil para la mejora del sentido de la orientación a los usuarios al delimitar mejor el perímetro; la directa cumple tres funciones: situada sobre los accesos ayudan a una orientación rápida y segura en el camino a seguir, como refuerzo para una mejor iluminación de las zonas de acceso y fuente de niveles de iluminación en el plano de trabajo y un mayor nivel de luz de reconocimiento.

En las zonas de tránsito la iluminación directa proporciona niveles de iluminación óptimos en el plano de trabajo y un mayor nivel de luz de reconocimiento; la indirecta mejora el sentido de la orientación a los usuarios al delimitar mejor el perímetro. En estas áreas (pasillos, escaleras, etc.) se deben mantener niveles medios de entre 150 y 200 lux (Fig. 4.10), teniendo en cuenta que la iluminación directa debe garantizar el suficiente reconocimiento de objetos, personas y animales.

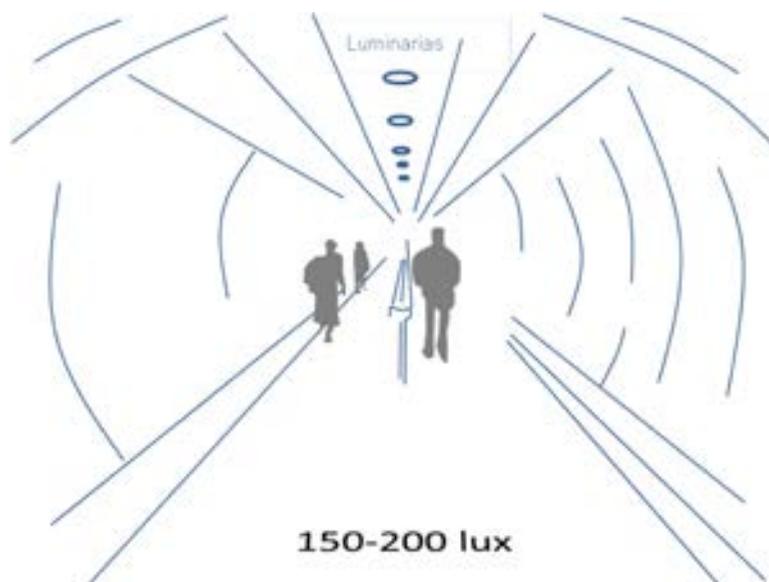


Figura 4.10. Pasillo en la red de metropolitano.

En andenes la iluminación directa sobre la línea de seguridad (anden/vía) proporciona la iluminación necesaria tanto a nivel de suelo como de pared del vagón mejorando la movilidad; si no se dispusiera iluminación indirecta el espacio parece más reducido y se dificulta su percepción, aumentando la inseguridad en la movilidad. Si, para solucionar este efecto, se aplicara luz totalmente indirecta, desciende el nivel de luz de reconocimiento aunque aumenta la percepción del espacio.

La iluminación localizada sobre la línea de seguridad en el andén (a borde del mismo) mejora el flujo de viajeros. Resultan convenientes los refuerzos de los niveles de iluminación con iluminación directa perimetral. Se pueden aplicar refuerzos *uplight* en la línea de seguridad. Son soluciones únicamente para el guiado, que no garantizan la iluminación del espacio vagón-andén ni de las paredes exteriores del convoy. La solución es la disposición de iluminación directa sobre los paramentos verticales de los vagones y sobre la línea de seguridad, de este modo el sistema mejorando la movilidad y su seguridad.

Tanto en andenes como en áreas de máxima concurrencia se emplea la iluminación indirecta para que el espacio se realce y la directa se dirige sobre vagones y línea de seguridad para cumplir las funciones descritas.

En la Fig. 4.11 se representa un tramo de andén del Metro de Nueva York, que cuenta únicamente con iluminación directa, en el que se han dispuesto las iluminancias medias requeridas según la diferenciación en áreas funcionales: paredes de los vagones, zona de espera al tren en el andén y banda o línea de seguridad.

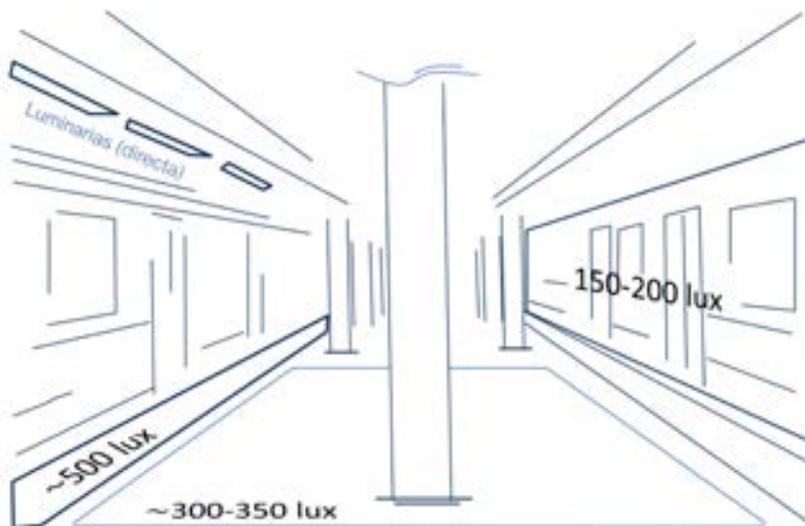


Figura 4.11. Representación de un andén en el Metro de Nueva York.

En los andenes se manejan los siguientes valores de iluminación (referido a un usuario que entra):

- Bases de escaleras (cambios de plano) zonas de espera a la llegada del tren y otros accesos al andén: 300 lux.

- Zonas de espera a la llegada del tren con condiciones especiales (estrechez, obstáculos presentes, etc.): 350 lux.
- Áreas de acceso directo a los vagones (línea de seguridad y alrededores): 500 lux.
- Sobre las paredes de los vagones (en especial en las puertas de acceso a éstos): 150-200 lux.

4.3.3. Cuadro de requerimientos técnicos

Con los datos tomados y la zonificación realizada según los criterios establecidos, se caracteriza la solución a partir de las condiciones de la instalación de metro, se elabora un cuadro que responde a los cuatro niveles descritos (Tabla 4.4).

Tabla 4.4. Cuatro niveles técnicos de evaluación. Fuente: Lledó SA.

Nivel 0	Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3
ENTORNO	ARQUITECTURA	PERSONAS	CONJUNTO DE INSTALACIONES
Fuente de luz	Definición de áreas a iluminar	Recorridos adaptados a su uso	Realce de la arquitectura por medio de la luz
Temperatura del color	Tipo de paramentos	Hábitos y comportamientos de movilidad	Dimensiones adaptadas a la arquitectura
Color y forma adaptados	Disposición de la iluminación según tipologías	Adaptación ambiental y Seguridad	Integración alumbrado señalización, Sistemas de megafonía, y Televigilancia
Sistemas de control	Costes: mantenimiento y energéticos	Adaptación a la tarea visual	Dimensionamiento de los componentes ópticos
			Establecer los Niveles de estanqueidad y resistencia al choque
			Iluminación Arquitectural / Funcional

4.3.4. Sistema canalizado

El sistema de iluminación canalizado se presenta como una solución óptima para instalaciones modernas de metro donde los espacios son amplios y se pretende sencillez y funcionalidad. En este tipo de sistema se integran sistemas como la megafonía (Fig. 4.12, izquierda) y quedan totalmente integrados en la arquitectura propia de la instalación (a la derecha de esa misma figura).



Figura 4.12. Integración de sistemas en instalación canalizada.

Esta opción permite incluir en la misma instalación la totalidad de los requerimientos lumínicos así como una elevada capacidad de control. En las soluciones que la empresa Lledó SA estimó para el Metro de Madrid, Metro de Barcelona y la estación del AVE de Lleida, la estructura mecánica básica es la que se muestra en la Fig. 4.13. Además de los sistemas que se exponen en esta ilustración se integran los sistemas de regulación en función del aporte de luz natural exterior.



Figura 4.13. Esquema de la luminaria.

La disposición del sistema según Lledó es la que aparece en la Fig. 4.14 donde se diferencia entre la estructura de medio túnel y túnel completo. En el primero de los casos será de aplicación un reflector asimétrico, frente al segundo en el que la iluminación requerida aconseja el empleo de la simetría en la luminaria.

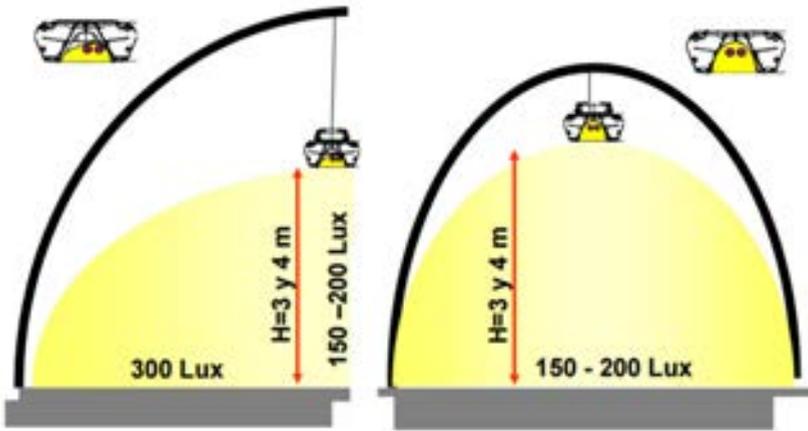


Figura 4.14. Disposición en el túnel.

En andenes el nivel de reflexión de los distintos paramentos hacen que el volumen general de los distintos recintos y los límites perimetrales queden perfectamente delimitados. En las áreas de tránsito el aporte de luz que proporciona las escaleras mecánicas ayudan a reducir el número de líneas de luz en la instalación. En estas mismas áreas la aportación de las escaleras mecánicas reduce la necesidad del número de líneas en la instalación.

En las áreas de máxima concurrencia la iluminación de los ejes de evacuación y la incorporación de elementos de orientación luminosos proporcionan una mayor orientación al usuario. En áreas de tornos y máquinas expendedoras la iluminación de refuerzo con luminarias estándar es una solución más a tener en cuenta cuando estas no disponen de iluminación propia.

En los llamados cañones de tránsito una buena solución, de total compatibilidad con el sistema canalizado que integra todos los subsistemas citados, es el empleo de luminarias con forma elíptica de dimensiones reducidas acorde con el nuevo espacio. Se propone la resolución de estas áreas con los siguientes parámetros (corte transversal de la canalización/ luminaria en la Fig. 4.15):

- Montaje en línea continua.
- Suspensión por caña 10 mm + cáncamo de suspensión.
- Difusor de policarbonato.
- Componente Directa.
- Canalizador de Luz.
- Longitudes dobles 3078 mm 1+1x58W.
- IP20.

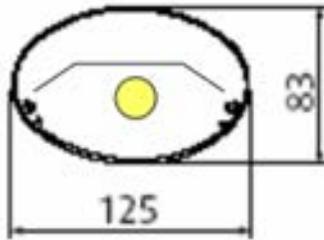


Figura 4.15. Esquema de la luminaria elíptica.

El sistema canalizado parece expresamente creado para los tubos fluorescentes que, por otra parte, han venido siendo la solución histórica para las instalaciones de metro allí donde se encuentren. La aparición de la tecnología LED de calidad y de sus equipos de regulación y control, han supuesto una revolución en este campo en el que, respondiendo a las mismas técnicas de diseño de la solución que se han descrito, admiten la evolución sobre los tubos fluorescentes, sustituyéndolos por la tecnología LED y sus equipos asociados, lo que disminuye los consumos alrededor de un 55-60%. Cuando además se cuenta con sistemas tipo DALI y luminancímetros donde éstos se requieren, estos ahorros pueden reducirse en un 10-15% adicional.

La solución más evolucionada y progresista es, por tanto, la instalación de tubos LED en sustitución de los fluorescentes (en muchas ocasiones T8). Los tubos LED que se ponen en servicio suelen tener características similares a las siguientes⁷:

⁷ Datos equivalentes a los de los equipos empleados en el Metro de Madrid.

- Tubos LED driver externo.
- Regulable 0-10 V, Zigbee.
- 50.000 horas de duración.
- Etiqueta energética A+ ó superior.
- Potencia del tubo (driver incluido): 19 W, 24 W, etc.
- Potencias equivalentes (otras tecnologías): 36 W (19 W), 58 W (24 W).
- Dotado de sensor de luminosidad inalámbrico (alrededor de 30 metros).
- Gateway sin cables (normalmente 5 V, 0,29 A, 1,5 W).

Con gráficos de distribución lumínica como el de la Fig. 4.16.

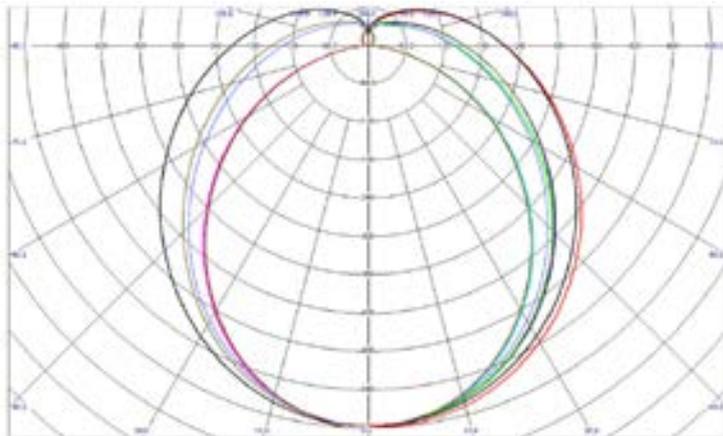


Figura 4.16. Distribución luminosa.

4.3.5. Resumen de casos reales

* Metro de Lisboa

Se recogen casos reales en los que las soluciones descritas han cumplido su función y tenido el efecto deseado, como son el ya incluido en parte del Metro de Barcelona, Metro de Madrid y Estación del AVE de Lleida (en este caso ferroviaria). Otras situaciones en las que se ha instalado el sistema canalizado.

En el Metro de Lisboa, con una altura libre de 3,5 metros en andenes y zonas con penetración de la luz natural, se dispusieron en canalización los elementos como se representa en la ilustración adjunta (Fig. 4.17). El sistema integra: alumbrado general, alumbrado de emergencia, alumbrado de vigilancia, sistemas de tele-vigilancia, sistemas de megafonía, sistemas de señalización, cableados independientes, sistemas de regulación en función del aporte de luz natural exterior. Este sistema se completa con las recomendaciones de uso de: Lámparas de tubo fluorescente de 4.000 K⁸.

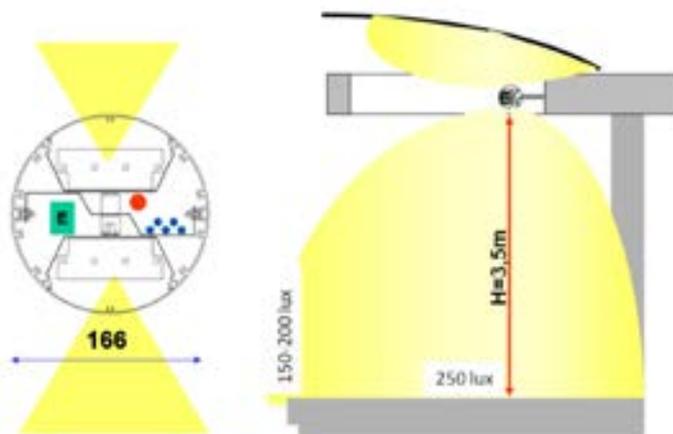


Figura 4.17. Esquema de luminaria y andén. Fuente: Lledó SA.

* Metro de Madrid

A mediados de 2004 el Metro de Madrid instalará iluminación LED en 60 estaciones y 480 coches, lo que permite ahorros energéticos de hasta el 62%. Es la primera fase de un proyecto que abarcará toda la red y todos los trenes de viajeros. Con esta tecnología, se reducen más de un 50% las emisiones de CO₂. La inversión prevista para esta primera fase es de 3,5 millones de euros. Cuando se sustituya en toda la red y en los trenes, se conseguirán ahorros por valor de 4 millones de euros anuales.

Alguna de las soluciones estimadas en las instalaciones de metro es la sustitución de tecnología de Fluorescencia (T8 y otras) por sus equivalencias en Tecnología LED, lo que suele suponer ahorros de más del 50%.

⁸ OSRAM: LUMILUX 840, PHILIPS: MASTER T-D 80.

La tecnología LED ha llegado también en el último año al depósito de Fuen-carral. La tecnología LED sustituirá progresivamente los 330.000 tubos fluorescentes que funcionan más de 8.000 horas al año, el paso de una tecnología a otra supondrá un ahorro energético superior al 62% sobre la actual iluminación.

Igualmente, también serán sustituidos por tecnología LED los más de 60.000 tubos fluorescentes que actualmente funcionan más de 6.000 horas al año en los trenes de viajeros. Esta implantación de nueva tecnología de iluminación en los trenes se realizará, en una primera fase en los convoyes de las series 7.000 y 9.000, donde se sustituirán hasta 480 tubos.

La vida útil de los tubos fluorescentes es de 17.000 horas y con el cambio a la nueva tecnología de iluminación LED pasará a ser de 50.000 horas. De este modo, también se aumenta el tiempo de sustitución de los tubos LED y por lo tanto, se reducen los residuos generados por Metro de Madrid en dos tercios y la emisión de CO₂ en más de un 50% en lo que a iluminación se refiere.

A este nuevo sistema de tecnología que ahorra un 62% en el consumo de energía eléctrica hay que sumarle la implantación de sistemas de regulación de niveles de iluminación en estaciones que gestionan la intensidad lumínica entre valores predeterminados, pudiendo estos valores variar en función de las necesidades que puedan presentarse en determinadas situaciones. La aplicación de esta medida, que hasta ahora no existía, supondrá un ahorro adicional del 15%, lo que provocaría un ahorro que podría llegar hasta el 75% del consumo eléctrico actual.

* **Metro Donostialdea**⁹

La red del Metro Donostialdea se compone solo de una línea, que empezó su servicio en 2012. Ésta conecta la población Lasarte-Oria con Donostia-San Sebastián, capital de la provincia Gipuzkoa, Pasaia, Irún y Hendaye. Para satisfacer los requisitos del Gobierno Vasco, la iluminación de los pasillos, andenes y zonas de paso de las estaciones de metro Intxaurreondo y Herrera se ha realizado con tecnología LED. Una de las exigencias del proyecto consistía en la gran eficiencia para minimizar el consumo de energía manteniendo la calidad de la luz.

Las luminarias específicas del proyecto han sido desarrolladas en colaboración con OSRAM y la empresa *Targetti Poulsen Spain SAU* encargada de su fabrica-

⁹ Fuente: Proyectos OSRAM. María Jesús Palencia.

ción. La empresa local *Susaeta Pro Lighting* es la responsable del proyecto de iluminación. Uno de los grandes retos que se encontró la empresa responsable del proyecto su el empleo de una sola luminaria para todas las instalaciones del metro donostiarra, cuestión compleja dada la variabilidad arquitectónica de los diferentes espacio y, en especial, de las estaciones. En la Fig. 4.18 se muestra (arriba) la estación de Intxaurreondo techado en forma de bóveda con altura máxima de 7 metros; comparada con la de Herrera (Fig. 4.18, abajo), subterránea en espacio rectangular con 5 metros de altura.



Figura 4.18. Metro de Donosti.

La solución adoptada se compone de emisión de luz directa e indirecta. Para la parte directa se integra una fila doble de módulos LED *LINEARlight POWER* de OSRAM con gran flujo luminoso de hasta 2.250 lm/m. El cuerpo de aluminio, en el cual se encuentran montados los módulos LED con su lente de 30°, ofrece una gestión térmica eficiente. Ambas filas pueden orientarse de tal forma que, independientemente de la altura de montaje de las luminarias, la estación quede iluminada bajo una luz agradable. Es posible conectar entre sí estos módulos regulables para formar una banda luminosa continua. Cada driver OPTOTRONIC puede poner en servicio hasta seis de estos módulos, quedando así integrados en el sistema de gestión de la iluminación. El módulo LED lineal flexible *LINEARlight POWER Flex* emite luz indirecta y, gracias a su anchura de tan solo 8 mm, puede instalarse de forma sencilla en la parte superior de la luminaria. Debido a que los módulos son divisibles, es posible adaptarlos a los requisitos de cada estación de metro. Con un flujo luminoso en longitud de 1.200 lm/m, los *LINEARlight POWER Flex* generan el nivel de claridad necesario para evitar la impresión de sentirse en una cueva en los andenes de las estaciones. Además, la luz reflejada por el techo complementa la iluminación general.

Para la fabricación de esta luminaria tan singular, se eligieron ambos modelos de módulos LED con una temperatura de color de 4.000 K y con un índice de reproducción cromática mayor de 80. El *binning* de los LED asegura en este caso que no se produzcan desviaciones de la temperatura del color y el flujo luminoso. Este aspecto es muy importante debido a las superficies blancas que reflejan la luz. Ambos módulos, *LINEARlight POWER* y *LINEARlight POWER Flex*, han sido diseñados para una tensión constante de 24 V aportada por el equipo de control OPTOTRONIC Oti DALI 75 1-4 CH. Con el fin de aumentar la atención y seguridad de los pasajeros, el sistema de gestión de la luz se encarga de regular la iluminación hasta un flujo luminoso de 100% cuando un tren llega al andén y, tras partir, reduce el flujo hasta el 50%. De esta forma, la solución luminosa LED contribuye también a la seguridad.

* Estación de Waverley

La reforma de la estación de Waverley, en Edimburgo, incluyó la instalación de luminarias *SuperGlass* de montaje en superficie con 2 tubos fluorescentes 49W T5. Los tubos se utilizan junto con fijaciones *SuperGlass* para iluminar los accesos desde las escaleras principales de Waverley, por las nuevas escaleras eléctricas hasta el primer subsuelo de la estación, y también para la iluminación de las nuevas cubiertas de las plataformas 8 y 9. Un requisito clave del proyecto fue la distribución

asimétrica de la luz a fin de minimizar el derroche de luz hacia las vías. Gracias a su difusor prismático de policarbonato con prismas internos, *Prismashield* lo consiguió de forma sencilla, además de ser resistente a actos vandálicos. Pese a su perfil reducido de solo 73 mm, *Prismashield* soporta impactos de hasta 50 julios.



Figura 4.19. Estación de Waverley.

* Estación de Kings Cross¹⁰

El posicionamiento óptimo de las luminarias de montaje alto *SuperGlass* mediante el uso de refractores *SuperGlass* en las cocheras de la estación de *Kings Cross*, en combinación con el sistema de control de iluminación *Controluz*, ha permitido ahorrar un 56% en costes energéticos, en comparación con el diseño original. Nuestros diseñadores emplearon modelado sólido en 3D para evaluar el diseño inicial y propusieron una disposición alternativa de las luminarias para aprovechar al máximo la excepcional capacidad de distribución de la luz de *SuperGlass*. De esta forma, las lámparas de 450 W sugeridas se reemplazaron por lámparas de 400 W que permitieron ahorrar energía. De hecho, esto aún superaba los niveles de luz requeridos, por lo que el sistema de funcionamiento de iluminación optimizada de *Carandini* (*Controluz*) se configuró para ajustar las lámparas a una potencia inicial inferior con objeto de reducir todavía más el consumo de energía. A medida que la vida de las lámparas vaya llegando a su fin y disminuya

¹⁰. Fuente: Carandini.

el rendimiento de lúmenes, se aumentará la potencia a fin de mantener los niveles de iluminancia. Controluz también permite atenuar la iluminación de acuerdo a los niveles de luz natural, y entre la medianoche y las 04:00 h.



Figura 4.20. Estación de King Cross.

* Túnel

Metrolux y *Widerlite*¹¹ para la iluminación de los túneles del Metro de Londres y de otros entornos exigentes ser emplean hace veinte años en el Metro de Londres. Diseñadas de forma específica para aplicaciones en túneles ferroviarios, las luminarias *Metrolux* y *Widerlite* cumplen toda la legislación vigente y las buenas prácticas. Ambas están equipadas con un refractor de vidrio prismático que garantiza una distribución uniforme de la luz y minimiza las sombras al tiempo que facilita la adaptación visual. En consecuencia, ofrecen una excelente distribución de la luz para conductores, empleados de mantenimiento y pasajeros que se apeen en situaciones de emergencia. También están diseñadas para ofrecer un mantenimiento sencillo. Las instalaciones más recientes en el metro de Londres han aprovechado al máximo las nuevas fuentes de luz LED para ofrecer una óptima

¹¹ Marcas de Carandini.

eficiencia energética, controlabilidad y una vida útil prolongada de las lámparas. Esto incluye nuevas instalaciones y la actualización de la iluminación existente con los kits LED de actualización *Metrolux* y *Widerlite*.



Figura 4.21. Trabajos de mantenimiento en el túnel. Metro de Londres.

* Bounds Green LMD

Cuando *Network Rail* decidió reformar la iluminación de montaje alto de su depósito de mantenimiento ligero (LMD) de *Bounds Green*, en Londres, optó por las luminarias *SuperGlass* y por dispositivos de control digital *Controluz*¹². Esta combinación proporcionó a *Network Rail* un gran ahorro en consumo de energía, en combinación con un esquema de iluminación muy mejorado y un mayor confort visual para la plantilla. Una ventaja adicional fue la vida útil prolongada de las lámparas. Las luminarias de montaje alto *SuperGlass* emplean un exclusivo reflector de vidrio prismático que sirve tanto para la reflexión como para la refracción de la luz. Esto se traduce en una distribución de la luz muy eficiente, que permite que un número inferior de luminarias cumplan los requisitos de diseño de *Bounds Green*, con un entorno visual optimizado y una excepcional iluminancia vertical y horizontal. Se alcanza más eficiencia gracias al sistema de funcionamiento de

¹² De Carandini.

iluminación optimizada Controluz, vinculado a detectores de presencia para regular los niveles de iluminación en base al nivel de la ocupación en las plataformas. Todo ello proporciona una reducción del 38% en el consumo de energía, en comparación con el sistema de iluminación sin control que estaba instalado anteriormente.



Figura 4.22. Zona de talleres.

✿ Estación de Victoria

Las exigencias del proyecto fueron la máxima eficiencia, rendimiento y estética, y la adaptación a la arquitectura y el espacio. La solución emplea una combinación de 1 luminaria de 400 W y 2 luminarias “de huevo” de 400W con lámparas de haluro metálico, con 75% de luz descendente y un 25% de luz ascendente para iluminar la estructura del tejado arquitectónico. Las luminarias superaron pruebas exhaustivas con el fin de garantizar que no cayeran residuos en caso de explosión en la estación.

Las fijaciones “de huevo” se combinan con luminarias fluorescentes resistente a actos vandálicos y con alumbrado proyectado Top 404 para el alumbrado direccional. La iluminación de la estación está activada las 24 horas del día, de forma que para alcanzar una eficiencia energética máxima, las fijaciones “de huevo” más grandes se han vinculado a un sistema de control de iluminación Controluz a fin de atenuarse en respuesta a la luz natural y minimizar el consumo energético durante el día.



Figura 4.23. Vestíbulo.

* Sistemas de Regulación y Control. Gestión Energética

En los sistemas canalizados la regulación y control tiene un papel fundamental en las zonas de andenes, aquellas con aporte de luz natural. El nivel de iluminación general en andenes es establecido al 60% de su nivel de luz aumentando hasta el 100% a la llegada del tren. En las zonas con penetración de la luz natural, preestablecido el nivel de iluminación sobre el plano útil el sistema de gestión analiza constantemente el aporte de luz día regulando todo un grupo de luminarias.

En la iluminación de andenes se consiguen ahorros energéticos de hasta un 40% cuando las luminarias se equipan con balastos electrónicos regulables y sensores de movimiento instalados a la entrada y salida de las estaciones. En la Fig. 4.24 se aprecia la operación en paralelo de las luminarias dirigidas por el sistema de regulación y control, según la llegada de los trenes.



Figura 4.24. Esquema del sistema de regulación y control

5.1. Introducción

Un intercambiador de transportes es una infraestructura que se diferencia por su especial zonificación:

- Zonas de espera o circulación de viajeros.
- Dársenas (acceso o deceso de los viajeros y trabajadores a los vehículos).
- Embocadura de rampas.
- Oficinas y despachos.
- Locales técnicos.
- Circulación de vehículos y autobuses.

La arquitectura de los edificios, como en el caso de las instalaciones de metro, determina ciertos parámetros de desarrollo para el proyecto de iluminación. En la ilustración adjunta (Fig. 5.1) se aprecia el aspecto, en 1880, del edificio que hoy contiene el intercambiador de Príncipe Pio.



Figura 5.1. Príncipe Pio en 1880.

Las exigencias en iluminación, que se desarrollarán a continuación, se refieren a:

- El alumbrado normal de cada zona.
- La uniformidad.
- El alumbrado de socorro.
- El alumbrado de emergencia y su uniformidad.
- Valor de la eficiencia energética (VEEI).
- Características eléctricas. Criterios de encendido.
- Tipología de la lámparas empleadas.
- Tipología y dotación de las tomas de corriente.

Por otro lado los criterios de cálculo, la calidad de materiales y equipos, así como de la ejecución y el cumplimiento de la normativa y legalidad completan las exigencias específicas para este tipo de infraestructuras.

En la Fig. 5.2 se han dispuesto un alzado y una sección longitudinal del intercambiador del Príncipe Pio, como ejemplo. Se determinan las zonas (de izquierda a derecha) de cuartos de instalaciones, zonas de rodadura (circulación de autobuses), salidas de emergencia, ascensores, vestíbulo de acceso al intercambiador, zona de rodadura de autobuses interurbanos, zonas de circulación de personas y acceso al Metro de Madrid (ramal Príncipe Pío).

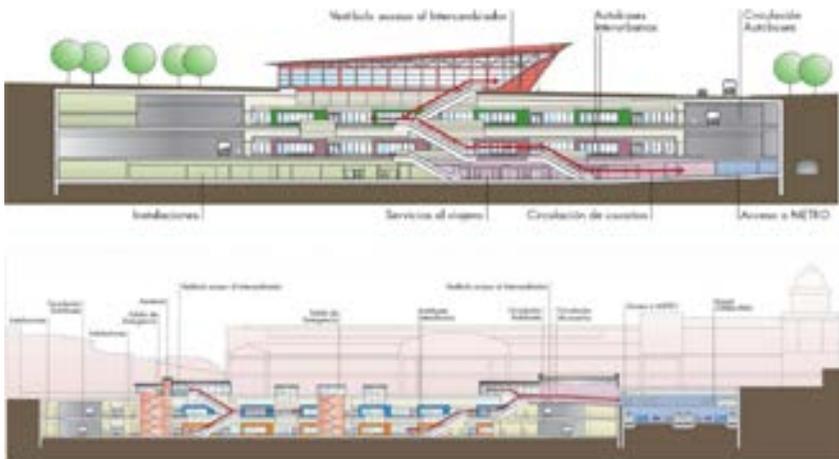


Figura 5.2. Intercambiador de Príncipe Pio. Fuente: COIIM.

Dársenas, zonas de rodadura de los autobuses, pasos de peatones, accesos a instalaciones, etc., del intercambiador de Plaza Elíptica (nivel 1) se aprecian con claridad en el esquema aportado por el COIIM¹.



Figura 5.3. Nivel 1 del intercambiador de Plaza Elíptica. Fuente: COIIM.

Las particularidades y especificaciones de los intercambiadores pueden condensarse en:

- Grandes espacios bajo rasante.
- Espacios cerrados. Entradas, salidas y viales limitados.
- Sin cobertura radioeléctrica para 4. Necesidad de un Centro de Control.
- Centros de muy alta movilidad.
- Elevado volumen de operaciones (~4.000 por día).
- Elevado número de viajeros (~2.000 por día).
- Concentración de varios modos de transporte (necesidad de coordinación).

¹ Colegio Oficial de Ingenieros Industriales de Madrid.

- Adaptación expresa en sistemas tecnológicos.
 - CCTV, sistema de reconocimiento de matrículas.
 - WIFI para localización, control e información de servicios.
 - Mecanismos de aforo de usuarios.
 - CCTV, para la seguridad.
 - Sistemas automatizados para la seguridad, control del tráfico y mantenimiento.
 - Redes de comunicación desarrolladas a medida.
- Necesidad de un centro de control.
 - Control de tráfico y servicios.
 - Control y gestión de la seguridad.
 - Sistemas de mantenimiento y gestión de la edificación e instalaciones.
- Elevados requisitos de seguridad.
 - Seguridad de las personas.
 - Seguridad de las instalaciones.
 - Protocolos de actuación y atención a emergencias conforme a los requisitos legales de explotación.

Conocidos todos los sistemas presentes y habiendo caracterizado y zonificado la instalación especial de Intercambiador de Transportes, se acomete el estudio de sus particularidades lumínicas para proponer las soluciones más adecuadas.

5.1.1. Requerimientos lumínicos

Una vez establecida la zonificación del intercambiador de transportes se debe atender a los siguientes requerimientos:

5.1.2. Alumbrado normal

El alumbrado normal tendrá los siguientes valores mínimos de iluminación según estancia:

- Espera o circulación de viajeros: 600 lux.
- Embocadura de rampas: 300 lux.
- Oficinas y despachos: 500 lux.
- Locales técnicos: 300 lux.
- Circulación de vehículos y autobuses: 100 lux.

5.1.3. Uniformidad

La uniformidad para estos niveles de iluminación normal será del 60% y el plano de trabajo considerado será 0,5 metros del suelo. Se recomienda, para una mayor uniformidad, que las luminarias lineales sean paralelas a los flujos principales dentro de las islas y zonas de viajeros. Asimismo en las zonas de aceras, la iluminación más adecuada es lineal, en tira continua paralela a la acera.

5.1.4. Alumbrado de socorro

El alumbrado de socorro será como mínimo un tercio del alumbrado normal siendo la uniformidad 20%. Se agruparán las luminarias de socorro y emergencia, por zonas, en circuitos independientes pero bajo diferenciales comunes, de tal forma que la caída de un diferencial haga saltar las emergencias de la zona.

Tanto en las zonas de rodadura como en las de permanencia de personas deben existir dos conceptos diferenciados de iluminación de emergencia: la iluminación para evacuación de personas en caso de fallo en el suministro eléctrico y el guiado en el suelo para evacuación de personas en caso de incendio (el humo del incendio puede tapar una iluminación colocada a una altura igual o mayor a la de puertas) De manera adicional a esta iluminación se recurrirá a la iluminación electro-foto-luminiscente para los 25 metros a cada lado de los accesos de salidas de emergencia.

5.1.5. Alumbrado de emergencia

El alumbrado de emergencia tendrá los siguientes valores mínimos de iluminación según estancia:

- Vías de evacuación: 5 lux.
- Equipos de protección contra incendios: 10 lux.
- Alumbrado anti-pánico general: 3 lux.
- Todas se situarán de forma que señalicen claramente los pasillos y zonas de evacuación.

La uniformidad para la iluminación de emergencia será del 40% y el plano de trabajo considerado será el suelo.

5.1.6. Valor de la eficiencia energética (VEEI)

Valor de la eficiencia energética de VEEI debe ser según el uso asociado a cada zona los que se describen a continuación:

- 5 para la zona de rodadura o dársenas.
- 6 para la zona de espera de pasajeros.
- 8 para la zona de usos de servicios complementarios al viajero.

5.1.7. Características eléctricas

Las características eléctricas de los circuitos de alimentación a receptores vienen definidas en el apartado de distribución eléctrica. Los criterios de encendido serán:

- En las zonas de estancia de viajeros será manual desde cuadro o automática desde el puesto de control mediante tele-ruptores, los encendidos se agruparán por tercios conservando en todo momento la uniformidad.

- En el resto de zonas en encendido será desde un interruptor local en cada estancia, sin embargo los circuitos dispondrán de tele-ruptores para hacer el apagado centralizado.

5.1.8. Tipología de las luminarias

La tipología de luminaria a emplear según estancia será:

- *Zonas de estancia de viajeros* (ejemplo en la Fig. 5.4). Luminarias empotradas en falso techos con protección IP 54/clase I mínima, equipada con lámparas fluorescentes T5 2x36 o 2x58 W y reactancia electrónica. La temperatura del color de la lámpara será entre 3.300 y 5.300 K, con una óptica de alvéolos de doble parabolicidad, longitudinal y transversal, de aluminio especular placado, anti-reflejo y anti-deslumbrante de bajísima luminancia 65°. Se sustituye por el equivalente en LED, con un ahorro energético de más del 50% directo en potencia.



Figura 5.4. Representación del Intercambiador de Avenida de América.

- *Locales técnicos*. Luminarias de superficie con protección IP 65/clase I mínima, equipada con lámparas fluorescentes T5 2x36 o 2x58 W y re-

actancia electrónica, el difusor será estampado por inyección de policarbonato transparente prismatizado en su parte interior para un mayor control luminoso, auto-extinguible V2, estabilizado a los rayos UV y el reflector será de acero laminado en frío, cincado en caliente anti-fisura, revestido con fondo de pintura de base epoxídica 7/8 μ , barnizado estabilizado a los rayos UV, anti-amarilleo, en poliéster lúcido, color blanco, espesor 20 μ .

- *Oficinas.* Luminarias empotradas en falso techos, equipada con lámparas fluorescentes T5 2x36 W y reactancia electrónica. La temperatura del color de la lámpara será entre 3.300 y 5.300 K, con una óptica de alvéolos de doble parabolicidad, longitudinal y transversal, de aluminio especular placado, anti-reflejo y anti-deslumbrante de bajísima luminancia 65°.
- *Vías de evacuación.* Luminarias de superficie con protección IP 65/clase I mínima, equipada con lámparas fluorescentes T5 2x36 W y reactancia electrónica. Los cruces de las vías de evacuación en las zonas de rodadura se reforzará los niveles de iluminación de socorro y de emergencia, el difusor será estampado por inyección de policarbonato transparente prismatizado en su parte interior para un mayor control luminoso, auto-extinguible V2, estabilizado a los rayos UV y el reflector será de acero laminado en frío, cincado en caliente anti-fisura, revestido con fondo de pintura de base epoxídica 7/8 μ , barnizado estabilizado a los rayos UV, anti-amarilleo, en poliéster lúcido, color blanco, espesor 20 μ .
- Luminarias de LED empotradas en el suelo para caminos guiados de evacuación, resistentes al tráfico pesado en zona de rodadura.
- *Zonas de rodadura autobuses en las dársenas.* Luminarias suspendidas o adosadas a la pared con protección IP 65/clase I equipadas con lámparas de halogenuros metálicos de 150 W, el difusor será de cristal templado de protección, espesor 5 mm, resistente al shock térmico y a golpes y el reflector será de aluminio 99,85 estampado prismatizado, oxidado anódicamente, con espesor 6/8 μ y abrigantado para un alto rendimiento luminoso. En la pared opuesta al andén se dispondrá perimetralmente balizas de señalización a base de luminarias IP 65/clase I con luminaria fluorescente compacta de 26 W o mediante LED separadas 8 m entre sí y a 1,5 m del suelo, el difusor será de vidrio templado resistente a cambios bruscos de temperatura y a golpes y el reflector será asimétrico de aluminio rayado.

- *Túneles y rampas de acceso* (Fig. 5.5, acceso desde el exterior): luminarias en disposición pareada o tresbolillo adosadas a la pared con protección IP 65/clase I equipadas con lámparas de vapor de sodio. Además se montarán luminarias de balizamiento a una altura de 1,5 metros del suelo con protección IP 65 y lámpara fluorescente de 1x58 W, el difusor será de cristal templado resistente a cambios bruscos de temperatura y a golpes y el reflector será asimétrico de aluminio martillado 99,85, oxidado anódicamente, espesor 2 μ y abrigantado. La iluminación de los túneles no debe tener prestaciones inferiores a las generales. Debe incluirse la regulación en función de la luminancia exterior y del horario de explotación (día nublado, hora punta, etc.).
- En todas las zonas se utilizarán luminarias de emergencia con una hora de autonomía, IP 65 mínimo de superficie y 300, 150 y 85 lúmenes según la superficie.



Figura 5.5. Intercambiador de Avenida de América. Acceso desde el exterior.

En todo caso la tipología de las luminarias será lo más reducida y estandarizada posible para facilitar el mantenimiento de las mismas.

5.1.9. Tipología y dotación de la tomas de corriente

La tipología y dotación de tomas de corriente de usos varios será según estancias:

- En cuartos técnicos: una caja estanca IP65 con protección diferencial y magnetotérmica dotada de una toma trifásica de 32 A y otra monofásica de 16 A en todos los cuartos técnicos.
- En dársenas; una caja estanca IP65 con protección diferencial y magnetotérmica dotada de una toma trifásica de 32 A y otra monofásica de 16 A cada 60 metros, se instalarán a 1,7 metros de suelo.
- En zona de espera de viajeros: una caja estanca IP55 con protección diferencial y magnetotérmica dotada de una toma trifásica de 32 A y otra monofásica de 16 A cada 60 metros, se instalarán a 2,3 metros de suelo.
- En oficinas, independientemente de la dotación de cada puesto de trabajo, se dispondrá de una toma monofásica de 16 A cada 15 m².
- Puesto de trabajo; independientemente de su ubicación, dispondrá de una caja con 4 tomas de corriente monofásicas (dos de SAI) y cuatro conexiones RJ-45.
- Las zonas de uso esporádico dispondrán de un control de encendido y apagado por sistema de detección de presencia o sistema de temporización.

Se instalarán sistemas de aprovechamiento de la luz natural, que regulen el nivel de iluminación en función del aporte de luz natural en todas las luminarias situadas bajo un lucernario.

5.1.10. Zona de mamparas

La iluminación de la franja del cerramiento de la formación de cola debe asegurar, al igual que en la zona de viajeros, 600 lux, pero se diferencia de ésta mediante la temperatura de color. Es de tipo *downlight* de bajo consumo, y contempla una luminaria por cada módulo de 125 cm y otra para el módulo del paramento opaco, a la salida hacia la dársena.

En el cerramiento de zona de espera y salida, se prevé iluminación para señalar, en el lado exterior, la ubicación de las puertas de salida y tiene 300 lux como mínimo.

5.1.11. Criterio de cálculo

Como base de cálculo en el caso de un intercambiador de transporte se atenderá a las siguientes consideraciones:

- Se considerará un mínimo de 500 W en las tomas de corriente correspondiente a usos varios.
- Deberán justificarse los coeficientes de simultaneidad adoptados que deberán quedar en todo caso del lado de la seguridad, en alumbrado normal debe considerarse el 100% de la carga.
- La potencia consumida por las lámparas de descarga se incrementa en un 80% para el dimensionado del cableado de alimentación.
- La caída de tensión admisible para el dimensionado de los circuitos de alumbrado será del 4,5%, desde CGBT hasta el receptor.
- Factores de mantenimiento: El índice corrector utilizado en el diseño de iluminación para compensar el factor de depreciación lumínica, causado por el envejecimiento de la lámpara (depreciación lumínica y fallos) y la acumulación de polvo (luminaria y entorno) será del 0,8, para garantizar que la iluminancia no descienda por debajo del valor mantenido.
- Los coeficientes de reflexión en paredes, techo y plano de trabajo, a efectos de cálculo de iluminación no serán superiores a un 30% (valor conservador), aunque el valor final dependerá del acabado definitivo y podrá ser superior a este valor umbral.

5.1.12. Calidad en la ejecución y en materiales y equipos

Para certificar la calidad en la ejecución, en materiales y equipos se cumplirán los siguientes requerimientos:

- Los balastos deberán, ser electrónicos y cumplir la directiva de la Unión Europea, UE 2000/55/CE.
- El índice de reproducción cromática (R_a ó IRC): deberá estar entre 60 y 80 en zona de dársenas, vestíbulo de viajeros, zonas de tránsito, pasillos y escaleras mecánicas. En zona de oficinas, locales técnicos, despacho

de billetes, el Ra estará comprendido entre 80 y 90. Las prestaciones visuales y la sensación de confort y bienestar, serán por tanto, como mínimo del tipo “Bueno” y “Muy bueno”.

- Las lámparas con un índice de rendimiento en color menor de 80 no deberán ser usadas en interiores en los que las personas trabajen o permanezcan durante períodos largos.
- En zona de circulación de vehículos, áreas de aparcamiento o estacionamiento, rampas de acceso se permitirá un índice de reproducción cromática de 20.
- El índice de deslumbramiento unificado (UGR): en zona de circulación de vehículos, áreas de aparcamiento o estacionamiento, rampas de acceso será como máximo de 25. En zona de dársenas, vestíbulo de viajeros, zonas de tránsito, pasillos y escaleras mecánicas será como máximo de 22.

5.2. Normativa, reglamentación y legalidad

Serán de aplicación todos los reglamentos y normas vigentes para este tipo de instalación² y en concreto:

- UNE 12464.1 de Septiembre de 2002, Norma Europea sobre la iluminación para interiores.
- Reglamento Electrotécnico para baja tensión, del Ministerio de Industria, aprobado por Real Decreto 842/2002, de 2 de agosto publicado en el BOE 224 de 18 de Septiembre de 2002.
- Los equipos deberán cumplir las normativas europeas, impuestas por el mercado CE.
- CIE 88:2004 “Guía para alumbrado de túneles de carretera y pasos inferiores”

² En cualquier caso se remite al lector al capítulo anterior “instalaciones de metro” para la normativa, reglamentación y legalidad en general para las instalaciones de iluminación, así como para las instalaciones que resultan análogas entre uno y otro tipo de estudio (metro e intercambiadores).

- REAL DECRETO 1890/2008, de 14 de noviembre, por el que se aprueba el Reglamento de eficiencia energética en instalaciones de alumbrado exterior y sus Instrucciones técnicas complementarias EA-01 a EA-07.

En instalaciones análogas se aplican los mismos reglamentos que los citados y descritos para el metro y ferrocarriles subterráneos, desarrollados en el capítulo anterior.

Los valores de VEEI deben corresponderse con los establecidos en el CTE³. El resultado de su cálculo, representativo de la eficiencia energética de la instalación, es función del área a la que se refiera. En 2013 se incorporó una nueva sección al DB HE 3, se trata de la titulada "eficiencia energética en instalaciones de iluminación". Caracteriza y cuantifica las exigencias en VEEI (Valor de la Eficiencia Energética de la Instalación), potencia instalada y sistemas de control y regulación. Establece protocolos de verificación y justificación de la exigencia, ofrece los métodos de cálculo y alude a las condiciones óptimas de mantenimiento y conservación. Es de aplicación en:

- Edificios de nueva construcción.
- Intervención en edificios existentes con una superficie útil total final (incluidas las partes ampliadas, en su caso) superior a 1.000 m², donde se renueve más del 25% de la superficie iluminada.
- Otras intervenciones en edificios existentes en las que se renueve o amplíe una parte de la instalación, en cuyo caso se adecuará la parte de la instalación renovada o ampliada para que se cumplan los valores de eficiencia energética límite en función de la actividad y, cuando la renovación afecte a zonas del edificio para las cuales se establezca la obligatoriedad de sistemas de control o regulación, se dispondrá de estos sistemas.
- Cambio de uso característico del edificio.
- Cambios de actividad en una zona del edificio que impliquen un valor más bajo del Valor de Eficiencia Energética de la Instalación límite, respecto de la actividad inicial, en cuyo caso se adecuará la instalación de dicha zona.

³ Código Técnico de la Edificación.

De los ámbitos descritos se excluyen casos que no son afectan a las instalaciones que aquí se estudian, salvo uno: la iluminación de emergencia, que queda igualmente excluida del cumplimiento de este reglamento.

La eficiencia energética de una instalación de iluminación de una zona, se determinará mediante el Valor de la Eficiencia Energética VEEI (W/m²) por cada 100 lux, mediante la siguiente expresión:

$$VEEI = \frac{P}{S \cdot E_m} \cdot 100$$

donde:

P = Potencia de las lámparas más la de sus equipos auxiliares (W).

S = Superficie iluminada (m²).

E_m = Iluminancia media horizontal mantenida (lux).

Los VEEI límite en recintos interiores de un edificio se establecen en la Tabla 5.1⁴. Estos valores incluyen la iluminación general y la iluminación de acento, pero no las instalaciones de iluminación de escaparates y zonas expositivas.

La potencia instalada en iluminación, teniendo en cuenta la potencia de lámparas y equipos auxiliares, no superará los valores especificados en la Tabla 5.2. La regla define "equipos auxiliares" como los equipos eléctricos o electrónicos asociados a la lámpara, diferentes para cada tipo de lámpara. Indica que su función es el encendido y control de las condiciones de funcionamiento de la lámpara. Estos equipos auxiliares, salvo cuando son electrónicos, están formados por combinaciones de arrancador/cebador, balasto y condensador.

⁴ Fuente: IDAE. Esta tabla de la nueva sección funde las que existían en la anterior, que separaba en dos grupos las actividades; sin embargo, la diferenciación entre éstas se recoge con la misma fidelidad en la nueva (2013) que aquí se expone.

Tabla 5.1. VEEI. Fuente: CTE.

Zonas de actividad diferenciada	VEEI límite	VEEI límite anterior
administrativo en general	3	3,5-6
andenes de estaciones de transporte	3	3,5-6
pabellones de exposiciones o ferias	3	3,5
salas de diagnóstico	3,5	3,5
aulas y laboratorios	3,5	4
habitaciones de hospital	4	4,5
recintos interiores no descritos en este listado	4	4,5
zonas comunes	4	4,5
almacenes, archivos, salas técnicas y cocinas	4	5
aparcamiento	4	5
espacios deportivos	4	5
estaciones de transporte	5	6
supermercados, hipermercados y grandes almacenes	5	6
bibliotecas, museos y galerías de arte	5	6
zonas comunes en edificios no residenciales	6	7,5
centros comerciales (excluidas tiendas)	6	8
hostelería y restauración	8	10
religioso en general	8	10
salones de actos, auditorios y salas de usos múltiples y convenciones, salas de ocio y espectáculo, salas de reuniones y salas de conferencias	8	10
tiendas y pequeño comercio	8	10
habitaciones de hotel, hostales, etc.	10	12
locales con nivel de iluminación superior a 600 lux	2,5	no esitía

Tabla 5.2. Potencia máxima instalada. Fuente: CTE.

Uso del edificio	Potencia máxima instalada (W/m ²)
Administrativo	12
Aparcamiento	5
Comercial	15
Docente	15
Hospitalario	15
Restauración	18
Auditorios, teatros, cines	15
Residencial público	12
Otros	10
Edificios con nivel de iluminación superior a 600 lux	25

Las instalaciones de iluminación dispondrán, para cada zona, de un sistema de regulación y control con las siguientes condiciones:

- Toda zona dispondrá al menos de un sistema de encendido y apagado manual, no aceptándose los sistemas de encendido y apagado en cuadros eléctricos como único sistema de control. Toda zona dispondrá de un sistema de encendidos por horario centralizado en cada cuadro eléctrico. Las zonas de uso esporádico dispondrán de un control de encendido y apagado por sistema de detección de presencia o sistema de temporización.
- Se instalarán sistemas de aprovechamiento de luz natural, que regulen proporcionalmente y de manera automática por sensor de luminosidad el nivel de iluminación en función del aporte de luz natural de las luminarias de las habitaciones de menos de 6 metros de profundidad y en las dos primeras líneas paralelas de luminarias situadas a una distancia inferior a 3,5 metros de la ventana, y en todas la situadas bajo un lucernario, cuando se den las siguientes condiciones:
 - En las zonas de los grupos 1 y 2 que cuenten con cerramientos acristalados al exterior, cuando éstas cumplan simultáneamente las siguientes condiciones:
 - El ángulo de visión del cielo $\theta > 65^\circ$ (Fig. 5.6).

$$\frac{T \cdot A_w}{A} > 0,11.$$

- Donde: T es el coeficiente de transmisión luminosa del vidrio de la ventana del local en tanto por uno; A_w , el área de acristalamiento de la ventana de la zona (m^2); y A, el área total de las fachadas de la zona, con ventanas al exterior o al patio interior o al atrio.

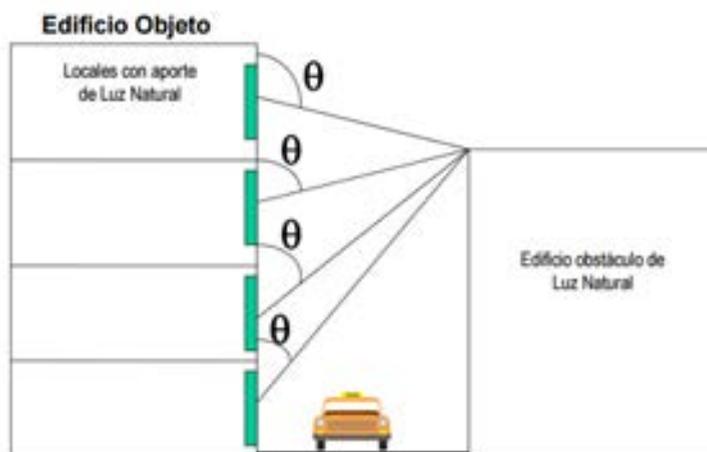


Figura 5.6. Ángulo de incidencia de la luz solar.

- En todas las zonas de los grupos 1 y 2 que cuenten con cerramientos acristalados a patios o atrios, cuando éstas cumplan simultáneamente las siguientes condiciones:
 - En el caso de patios no cubiertos cuando éstos tengan una anchura (a_i) superior a 2 veces la distancia (h_i), siendo h_i la distancia entre el suelo de la planta donde se encuentre la zona en estudio, y la cubierta del edificio. En el caso de patios cubiertos por acristalamientos (atrios) cuando su anchura (a_i) sea superior a $2/T_c$ veces la distancia (h_i), siendo h_i la distancia entre el suelo de la planta donde se encuentre la zona en estudio, y siendo T_c el coeficiente de transmisión luminosa del vidrio de cerramiento del patio o atrio, expresado en %.

$$\frac{T \cdot A_w}{A} > 0,11$$

- Para $\theta > 65^\circ$ está garantizado el aporte de luz natural, por tanto, para patios con anchura (a_i) 2 veces la distancia a la Cubierta del Edificio (h_i), estará garantizado dicho aporte de Luz Natural.

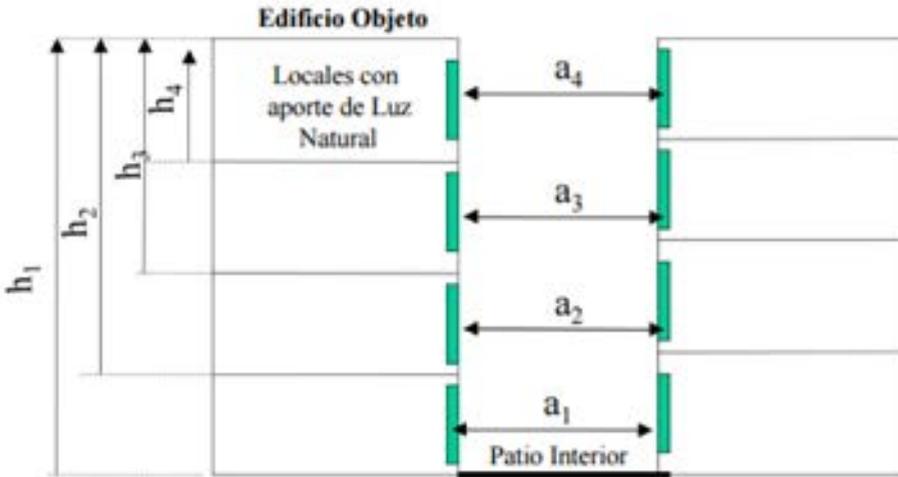


Figura 5.7. Locales con aporte de luz natural. (I).

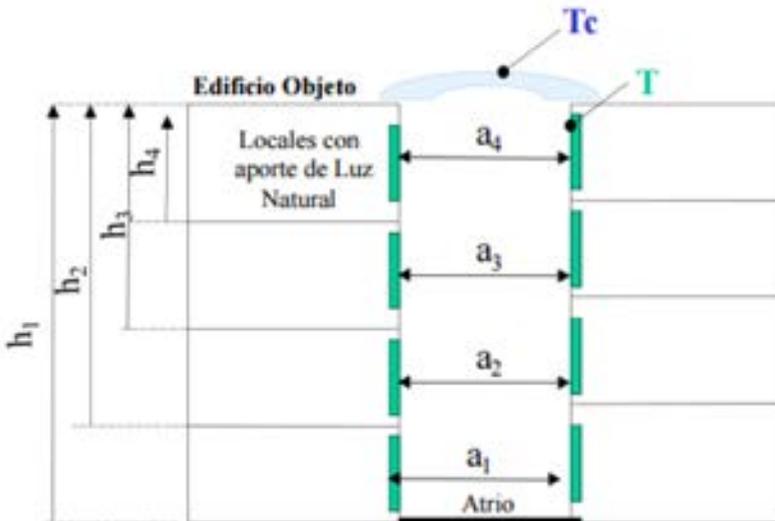


Figura 5.8. Locales con aporte de luz natural (II).

Para determinar el cálculo y las soluciones luminotécnicas de las instalaciones de iluminación interior, se tendrán en cuenta parámetros tales como:

- El uso de la zona a iluminar.
- El tipo de tarea visual a realizar.
- Las necesidades de luz y del usuario del local.
- El índice del local K o dimensiones del espacio (longitud, anchura y altura útil).
- Las reflectancias de las paredes, techo y suelo de la sala.
- Las características y tipo de techo.
- Las condiciones de la luz natural.
- El tipo de acabado y decoración.
- El mobiliario previsto.

Los parámetros que definen la calidad y confort lumínico deben establecerse en la memoria del proyecto. A efectos del cumplimiento de las exigencias de esta sección, se considerarán como aceptables los valores establecidos en la norma UNE EN 12464-1 y en la norma UNE EN 12193⁵.

Para garantizar en el transcurso del tiempo el mantenimiento de los parámetros luminotécnicos adecuados y la eficiencia energética de la instalación VEEL, se elaborará un plan de mantenimiento de las instalaciones de iluminación que contemplará, entre otras acciones, las operaciones de reposición de lámparas con la frecuencia de reemplazamiento, la limpieza de luminarias con la metodología prevista y limpieza de la zona iluminada, incluyendo en ambas la periodicidad necesaria. Dicho plan también deberá tener en cuenta los sistemas de regulación y control utilizados en las diferentes zonas.

Las Instalaciones de Iluminación deberán cumplir conjuntamente las siguientes condiciones:

- La instalación de Iluminación no superará un Valor de Eficiencia Energética (VEEL límite) para cada zona del edificio, ni una potencia máxima instalada en iluminación para todo el edificio (W/m^2). Los valores de VEEL han sido reducidos en una media del 20% y junto con los nuevos límites

⁵ UNE-EN 12464-1. Iluminación de los lugares de trabajo. Parte I: Lugares de trabajo en interiores. UNE EN 12193: Iluminación. Alumbrado de instalaciones deportivas.

de potencia máxima instalada para cada edificio, darán lugar a una reducción de demanda de energía eléctrica para iluminación, respecto al HE-3 anterior de hasta un 30%.

- Se dispondrá de un sistema de control que permita ajustar el encendido a la ocupación real de la zona, así como de un sistema de regulación que optimice el aprovechamiento de la luz natural, en las zonas que reúnan determinadas condiciones que lo hagan viable. El aumento en las exigencias tecnológicas a los sistemas de control, junto con el incremento del número de luminarias que se obligan a ser reguladas según aporte de luz natural, supondrán un incremento de ahorro del 10% en ciertos edificios, respecto al HE-3 anterior.
- Para las instalaciones de iluminación del edificio se establecerá un plan mantenimiento.

En un proyecto de reforma y rehabilitación de la iluminación se citarán las normas, reglamentos y leyes que deben cumplirse. Se muestran aquí, por ejemplo, las listadas en el proyecto de adecuación del alumbrado de emergencia en las escaleras del intercambiador de Príncipe Pío en Madrid.

- Reglamento Electrotécnico para Baja Tensión e Instrucciones Técnicas Complementarias (Real Decreto 842/2002 de 2 de Agosto de 2002).
- Real Decreto 1890/2008, de 14 de noviembre, por el que se aprueba el Reglamento de eficiencia energética en instalaciones de alumbrado exterior y sus instrucciones técnicas complementarias EA-01 a EA-07.
- Real Decreto 1955/2000 de 1 de Diciembre, por el que se regulan las Actividades de Transporte, Distribución, Comercialización, Suministro y Procedimientos de Autorización de Instalaciones de Energía Eléctrica.
- Código Técnico de la Edificación, DB SI sobre Seguridad en caso de incendio.
- Código Técnico de la Edificación, DB HE sobre Ahorro de energía.
- Código Técnico de la Edificación, DB SU sobre Seguridad de utilización.
- Código Técnico de la Edificación, DB-HR sobre Protección frente al ruido.
- Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios.
- Ley 31/1995, de 8 de noviembre, de Prevención de Riesgos Laborales.

- Real Decreto 1627/1997 de 24 de octubre de 1.997, sobre Disposiciones mínimas de seguridad y salud en las obras.
- Real Decreto 486/1997 de 14 de abril de 1997, sobre Disposiciones mínimas de seguridad y salud en los lugares de trabajo.
- Real Decreto 485/1997 de 14 de abril de 1997, sobre Disposiciones mínimas en materia de señalización de seguridad y salud en el trabajo.
- Real Decreto 1215/1997 de 18 de julio de 1997, sobre Disposiciones mínimas de seguridad y salud para la utilización por los trabajadores de los equipos de trabajo.
- Real Decreto 773/1997 de 30 de mayo de 1997, sobre Disposiciones mínimas de seguridad y salud relativas a la utilización por los trabajadores de equipos de protección individual.

5.3. Soluciones en Intercambiadores

5.3.1. Alumbrado general

En el alumbrado general la tecnología LED está garantizando ahorros por encima del 50% entrando en proyectos nuevos y especialmente en las sustituciones sobre:

- Tubos fluorescentes (presentes por ejemplo en la instalación de alumbrado de emergencia del intercambiador de Príncipe Pío).
- VSAP (presentes por ejemplo en rampas de comunicación del intercambiador de Plaza Elíptica).
- Focos halógenos (presentes por ejemplo en la instalación de partida a la entrada de los túneles del intercambiador de Plaza Elíptica).
- Balizas (en cualquiera de los intercambiadores gestionados por el CTCM).

Los ahorros se mantienen en las mismas valoraciones que en las instalaciones de alumbrado en túneles o en las de metro, con reducciones superiores al 50% que se potencian en un 10-15% adicional cuando se cuenta con sistemas eficaces de regulación y control.

En el ejemplo del intercambiador de Plaza de Castilla se han conseguido ahorros como los descritos con las siguientes sustituciones por zonas:

- Zona de rodadura Islas 1, 2 y 3.
 - Había 160 tubos fluorescentes de 18 W.
 - Se han sustituido por 160 unidades de LED de 9 W.
- Zona de viajeros en dársenas de Islas 1, 2 y 3.
 - Había 110 Downlight de 70 W.
 - Se han sustituido por 110 unidades de led de 18 W.
- Aseos públicos.
 - Había 58 Downlight de 70 W.
 - Se han sustituido por 58 unidades de led 18 W.

Los ahorros directos tienen que ver con la reducción de las potencias de los equipos y, por otra parte, el término complementario es competencia de los equipos de regulación y control asociados.

5.3.2. LED para los sistemas de balizamiento

El balizamiento luminoso de obstáculos va destinado a reducir el peligro para los vehículos mediante la señalización de la presencia de obstáculos. Los objetos altos, fijos o móviles, deben ser señalizados cuando se encuentran en determinadas condiciones susceptibles de provocar un riesgo de colisión.

El proyecto consiste en las luminarias de balizamiento existentes en las zonas de rodadura por otras que incorporen la tecnología LED, reduciendo el consumo en un 90%.

El balizamiento previo está resuelto mediante luminarias estancas con tubos fluorescentes de 18W. El objetivo de la medida es disminuir el consumo de esta instalación sin disminuir la eficacia de la misma. Para ello se pueden emplear lámparas de LEDs de color verde, con alto flujo luminoso, que consumen unos 2W cada una.

Las ventajas derivadas de la aplicación de este sistema son:

- Disminución de la factura energética de las estaciones.
- Prolongación de la vida útil de los equipos e instalaciones.
- Reducción de los costes de mantenimiento al alargar significativamente la vida útil de las lámparas.
- Reducción de emisiones indirectas gracias a la reducción del consumo energético.
- Consolidación de la empresa gestora del conjunto de los recursos con conforman el intercambiador como empresa responsable en el uso de recursos energéticos.

Estudiado el caso para el CTCM⁶, la Tabla 5.3 indica los ahorros derivados por la sustitución de equipos.

Tabla 5.3. Ahorros en consumo eléctrico por LED. Fuente: CTCM.

INTERCAMBIADOR	UDS	CONSUMO ACTUAL	CONSUMO LED	AHORROS
PLAZA DE CASTILLA	152	28.295 kWh	2.219 kWh	26.076 kWh
AVENIDA DE AMÉRICA	152	28.295 kWh	2.219 kWh	26.076 kWh
PLAZA ELÍPTICA	140	26.061 kWh	2.044 kWh	27.017 kWh
PRÍNCIPE PÍO	132	24.572 kWh	1.927 kWh	22.645 kWh
MONCLOA	240	44.676 kWh	3.504 kWh	41.172 kWh
TOTAL	816	151.898 kWh	11.914 kWh	139.985 kWh

5.3.3. Alumbrado de emergencia

El alumbrado de emergencia tiene por objeto asegurar, en caso de fallo de la alimentación al alumbrado normal, la iluminación en los accesos hasta las salidas, para una eventual evacuación del público o iluminar otros puntos que se señalen.

La alimentación del alumbrado de emergencia será automática con corte breve (alimentación automática disponible en 0,5 s como máximo).

⁶ Consorcio de Transportes de la Comunidad de Madrid.

Es el alumbrado de seguridad estará previsto para garantizar la seguridad de las personas que evacuen una zona o que tienen que terminar un trabajo potencialmente peligroso antes de abandonar la zona. Está previsto para entrar en funcionamiento automáticamente cuando se produce el fallo del alumbrado general o cuando la tensión de éste baje a menos del 70% de su valor nominal.

La instalación de este alumbrado será fija y estará provista de fuentes propias de energía.

Sólo se podrá utilizar el suministro exterior para proceder a su carga, cuando la fuente propia de energía esté constituida por baterías de acumuladores o aparatos autónomos automáticos.

El REBT⁷ define tres tipos de alumbrado de seguridad:

- Alumbrado de Evacuación.
- Alumbrado ambiental o anti-pánico.
- Alumbrado en zonas de alto riesgo.

Se dispondrá de alumbrado de seguridad mediante equipos autónomos de 250 lm. Este alumbrado es del tipo evacuación, que se caracteriza el reconocimiento y la utilización de los medios o rutas de evacuación.

Este alumbrado debe proporcionar, a nivel del suelo y en el eje de los pasos principales, una iluminancia horizontal mínima de 1 lux. En los puntos en los que estén situados los equipos de las instalaciones de protección contra incendios que exijan utilización manual y en los cuadros de distribución del alumbrado, la iluminancia mínima será de 5 lux. La relación entre la iluminancia máxima y la mínima en el eje de los pasos principales será menor de 40.

El alumbrado de evacuación deberá poder funcionar, cuando se produzca el fallo de la alimentación normal, como mínimo durante una hora, proporcionando la iluminancia prevista.

Los equipos de alumbrado de emergencia y señalización tendrán las siguientes características:

⁷ Reglamento de Baja Tensión.

- Alimentación: 240 V, 50 Hz.
- Número de Lámparas: 2 (Señalización + Emergencia).
- Interruptor de desconexión de lámparas no accesible al público.
- Difusor prismático de poliestireno.
- Cumple con la norma UNE-EN 60.598-2-22 y la norma UNE 20.392 ó UNE 20.062 y la instrucción ITC-BT-28 del REBT.

Las luminarias escogidas para estas funciones, emergencia y lugares de acceso a las áreas que requieren este tipo de iluminación reúnen condiciones similares a las siguientes.

Equipo autónomo de emergencia para alumbrado y señalización, marca ELECTROZEMPER SA de 250 lm, grado de estanqueidad IP65, autonomía de 1h, modelo FAE-1252. Las características principales son:

- Flujo luminoso (Luminaria): 225 lm.
- Flujo luminoso (Lámparas): 250 lm.
- Potencia de las luminarias: 11W.
- Clasificación luminarias según CIE: 89.
- Código CIE Flux: 40 70 90 89 90.
- Lámpara: 1 x lámpara fluorescente de 11W (en la actualidad de sustituye por su equivalente LED, lo que supone ahorros energéticos, integración ambiental y facilidad de aplicación de los sistemas de regulación y control).

Como en otros casos se comprueba que, históricamente, se han instalado lámparas fluorescentes que venían cumpliendo las exigencias, sobre todo en términos de Ra; sin embargo, ya se ha demostrado que su sustitución por tubos LED significará ahorros muy considerables, por encima del 50%. Los cálculos eléctricos para el caso muestran las cualidades luminotécnicas de la solución aplicada en el caso de la iluminación de emergencia en el intercambiador de Príncipe Pío. En la Fig. 5.9 se muestra el procesado de colores falsos de la escalera (derecha) y la distribución lumínica de la lámpara fluorescente aplicada al caso.

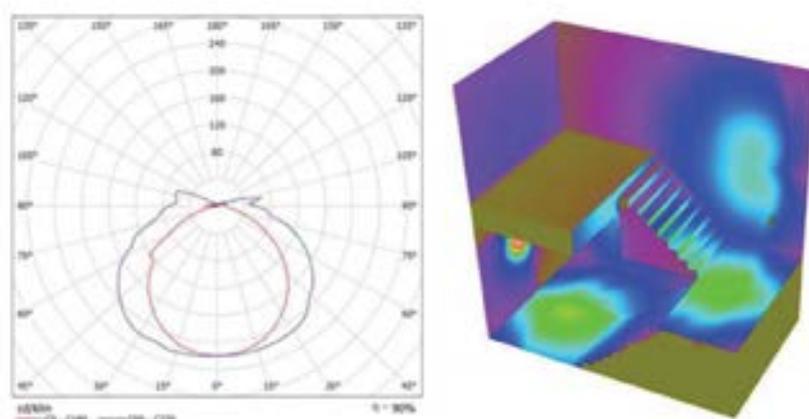


Figura 5.9. Simulación en colores falsos y distribución luminosa.

5.3.4. Sistemas de regulación y control

Actualmente los sistemas de alumbrado se han diseñado sin atender a la regulación o a la posibilidad de apagar circuitos en zonas que no están siendo usadas funcionando al 100% durante casi 20 horas diarias, independientemente de la ocupación o del funcionamiento de los servicios.

Estos proyectos analizan los sistemas de alumbrado por circuitos eléctricos implementando soluciones de control de circuitos o luminaria por luminaria, de forma que se optimice la gestión del alumbrado al funcionamiento del intercambiador.

Con la evolución tecnológica actual existen lámparas instaladas en Intercambiadores que para dar cumplimiento con las directivas EUP -2005/32/CE Directiva marco para el establecimiento de requisitos de diseño ecológico aplicables a los productos que utilizan energía (EUP).

Se plantea sustituir las luminarias y lámparas existentes, por lámparas más eficientes, más respetuosas con el medio ambiente y con menores costes en la explotación por la adaptación al entorno de esta tipología de edificios de condiciones de altas concentraciones de contaminantes por las emisiones de vehículos.

Las ventajas que, en términos de regulación y control, se consiguen con la entrada en juego de las luminarias LED de calidad y alta eficiencia se resumen en los siguientes puntos:

- Facilidad y mejora del control de datos y parámetros energéticos así como de las emisiones atmosféricas.
- Posibilidad de establecer objetivos cuantificados de reducción de consumo energético propios y del conjunto de la estación.
- Reducción de emisiones indirectas gracias a la reducción del consumo energético.
- Disminución de la factura energética de las estaciones.
- Prolongación de la vida útil de los equipos e instalaciones.
- Reducción de los costes de mantenimiento al alargar significativamente la vida útil de las lámparas.
- Reducción de emisiones indirectas gracias a la reducción del consumo energético.
- Consolidación del gestor de la infraestructura como empresa responsable en el uso de recursos energéticos.

Desde un punto de vista cuantitativo se puede estimar un ahorro energético de hasta un 20% cuando se toman medidas de control y gestión del alumbrado. Esto supondría un retorno de la inversión en unos 20 años.

En la Tabla 5.4, se consideran las mejoras en el control y gestión de la iluminación en los intercambiadores listados en la propia tabla y los ahorros energéticos que la adopción de la medida supone.

Tabla 5.4. Ahorro energético y de emisiones. Fuente: CTCM.

INTERCAMBIADOR	AHORRO ENERGÉTICO	AHORRO EMISIONES
	MWh /año	T CO ₂ /año
PLAZA DE CASTILLA	359	606
AVENIDA DE AMÉRICA	282	476
PLAZA ELÍPTICA	241	407
PRÍNCIPE PÍO	170	287
MONCLOA	276	466
TOTAL	1.889	3.191

5.3.5. Contadores digitales

La monitorización del consumo eléctrico en los distintos servicios permitirá realizar un control exhaustivo de los consumos individuales de los mismos, así como el consumo propio del resto del intercambiador, permitiendo una mejora en la distribución de los costes y facilitando la aplicación de medidas de reducción de consumo. En la Fig. 5.10 se expone la fotografía de un contador digital para el control del gasto eléctrico.



Figura 5.10. Control digital.

El objetivo de la medida es agrupar diferentes consumos en función del tipo de servicio al que alimentan y zona a la que asisten, obteniendo las lecturas de los diferentes consumos energéticos:

- **Alumbrado:** Consumo en alumbrado en las diferentes zonas (islas, rodadura, túneles, vestíbulos comerciales, zonas de servicio, dársenas de embarco y desembarco, zonas de regulación, escaleras de emergencia, etc.).
- **Ventilación:** Consumo de los diferentes equipos de extracción según zonas y usos (rodadura, aseos, regulación, túneles, etc.).
- **Fontanería:** Consumo de los sistemas de bombeo y de los sistemas de calentamiento de agua.
- **Paneles de información:** Consumo de las pantallas, control de puertas, pantallas de información sobre dársenas y otros elementos de información publicitaria.

- **Climatización:** Consumo de los equipos de producción de frío-calor y consumo de los equipos de distribución de aire climatizado, por zonas.

Se instalarán además sondas de medición de nivel lumínico y temperatura/humedad en diferentes zonas para mejor interpretación de los datos de consumo obtenidos. La instalación se completa sobre elementos pasivos y sobre otros sistemas o equipos.

Esta medida, aplicada al intercambiador en términos de remodelación, repercute positivamente en los balances ambiental y económico de la instalación e implica a la empresa gestora del conjunto de los recursos que componen el intercambiador.

Desde un punto de vista cuantitativo se puede estimar un ahorro energético de hasta un 20% cuando se toman medidas de cuantificación y gestión de los consumos energéticos. Esto supondría un retorno de la inversión en unos 9 años. Con la mejora de las instalaciones de control de los edificios de intercambiadores se lograrán:

- Mayor Facilidad y mejora del control de datos y parámetros energéticos, teniendo una consecuencia directa en un control de las emisiones a la atmósfera.
- Posibilidad de establecer objetivos cuantificados de reducción de consumo energético propios y del conjunto de la estación. Se persigue con esto establecer una explotación cada vez más eficiente y cada vez más ajustada a la demanda de los servicios ligados a la demanda de viajeros.
- Reducción de emisiones indirectas gracias a la reducción del consumo energético.
- Consolidación de la empresa gestora del conjunto de los recursos que ofrece el servicio como un organismo responsable en el uso de recursos energéticos en el sector del transporte público a nivel de las infraestructuras de intercambiadores.

Si se toman los datos de aplicación de esta medida de control del gasto en electricidad, que además integra los sistemas citados, es decir, facilita la gestión de los mismos y sus costes, se emite la Tabla 5.5 que aluden a ahorro energético.

Tabla 5.5. Ahorro energético por intercambiadores. Fuente: CTCM.

Intercambiador	AHORRO ENERGÉTICO MWh /año
Plaza Castilla	359
Avenida de América	282
Conde Casal	230
Plaza Legazpi	331
Plaza Elíptica	241
Príncipe Pío	170
Moncloa	276

La responsabilidad ambiental de la empresa queda apoyada sobre la Tabla 5.6 en el que recogen los datos de ahorro de emisiones.

Tabla 5.6. Ahorro de emisiones por intercambiadores. Fuente: CTCM.

Intercambiador	AHORRO EMISIONES Toneladas CO ₂ /año
Plaza Castilla	606
Avenida de América	476
Conde Casal	388
Plaza Legazpi	560
Plaza Elíptica	407
Príncipe Pío	287
Moncloa	466
TOTAL	3191

5.4. Casos prácticos

5.4.1. Intercambiadores de Moncloa y Plaza Elíptica

En Moncloa se han instalado interruptores o pulsadores temporizados, según el uso, en zonas iluminadas 24 h (cuartos técnicos, túnel del aljibe, pasillos, etc.).

En otras zonas se han dispuesto sensores de movimiento, para que se active el alumbrado automáticamente siempre, como escaleras de salidas de emergencia, pasillo de vestuarios del personal, etc.

En los dos casos anteriores, se han sustituido los tubos fluorescentes por tubos de tecnología LED, cuando ha sido necesario (lugares que se enciende y apaga mucho, etc.).

En cada una de las entradas y salidas de los túneles se han instalado interruptores cenitales, de manera que sólo se encienden esos focos cuando hay menos de una determinada luz solar. En cuanto a las sustituciones de luminarias y lámparas:

- Se han sustituido todos los *downlight* de las dársenas de carga por focos de LED.
- Se han sustituido los focos de gas de sodio del BUS-VAO por focos de tecnología LED.
- Se están sustituyendo los tubos fluorescentes de las aceras de las islas por tubos de tecnología LED. Ya se ha empezado por la isla 2.
- Se están probando luminarias para sustituir los actuales focos de dársena por luminarias de tecnología LED.

Además de los cambios comunes a los dos intercambiadores (pulsadores, sensores de movimiento, sustitución de fluorescentes por led, *downlight* de dársenas de carga, interruptores cenitales...), en Plaza Elíptica se han cumplido los compromisos en lo referente a:

- Sustitución de todas las balizas de túneles y zona de rodadura por balizas de LED.
- Conexión del alumbrado de las escaleras de las salidas de emergencia a la central de incendios, para su inmediato encendido ante cualquier alarma. Además, por seguridad, los circuitos tienen otros dos accionamientos manuales (a través del SGI desde el CGT y a través del servidor de *TREND*).
- Sustitución de focos de gas de sodio por focos de tecnología LED en las rampas de comunicación entre los niveles 1 y 2.

Se están probando diversos focos para sustituir la iluminación del túnel de Vía Lusitana. En el aparcamiento, se diseñaron cuatro fases para sustituir todos los tu-

bos fluorescentes por tubos de tecnología LED. Se han realizado 3 fases en la actualidad.

Se sustituyeron los focos halógenos de las entradas y salidas de los túneles por otros de más luminosidad, de tecnología LED y con interruptores cenitales.

El ahorro está resultando de alrededor del 50% (en el caso de los *downlight*, mucho menos, porque se requerían más de 600 lux y mejorar el rendimiento y el mantenimiento) en cada sustitución de luminaria. Además hay que tener en cuenta que hay luces que estaban todo el día encendidas y ahora sólo funcionan cuando se necesitan.

6.1. Introducción

El Metro de Madrid pretende ahorrar hasta un 70% en la factura eléctrica contando con la influencia directa de la sustitución de luminarias fluorescentes, VSAP y balizas por sus equivalentes en tecnologías LED. La ejecución de este programa de mejora en iluminación forma parte del Plan de Eficiencia Energética de Metro de Madrid.

La iluminación se enmarca en el capítulo "línea". Sobre este particular se determinó la necesidad de desarrollar programas orientados hacia la mejora de la eficiencia energética.

La iluminación de las estaciones, depósitos y oficinas del Metro de Madrid constituye una parte importante del consumo eléctrico. En 2012 había más de 330.000 tubos fluorescentes instalados, con un número de horas de funcionamiento superior a las 17.000.

La sustitución de las luminarias de partida por nuevas tecnologías de iluminación (LED, inducción y/o fluorescentes de alto rendimiento) que proporcionan ahorros superiores al 50% (sobre iluminación de bajo consumo) y que puede llegar al 90% (respecto a las tradicionales incandescentes) manteniendo la misma luminosidad, respuesta rápida, apagado o cambio en la emisión de luz.

En el Plan de Eficiencia Energética de Metro Madrid, se propone un modelo de *outsourcing* integral con una empresa de servicios energéticos (ESE), en ejecución de la Directiva UE 2006/32 (suministro, instalación, puesta en servicio y mantenimiento), siendo cubierto el coste con el ahorro generado. El gasto es fijo anualmente, siendo la diferencia entre el ahorro generado y el pago, la reducción de gasto anual. (Ver apartado Modelo de Contratación donde se detalla la modalidad de contratación que finalmente se ha llevado a cabo y que difiere de esta propuesta).

El alumbrado en el material móvil (Fig. 6.1) será sustituido asimismo por tecnologías LED, aunque en este caso en régimen de *renting*.



Figura 6.1. Iluminación del material móvil. Fuente: Metro de Madrid.

La iluminación en los recintos de viajeros del material móvil se realiza mediante tubos fluorescentes. La flota de coches destinados al servicio en 2012 era de más de 2.000 unidades, con un consumo eléctrico anual de 12,8 GWh. La sustitución de las luminarias de partida por otras con tecnología LED, que generen un ahorro de un 50% y una mayor vida útil disminuyendo las tareas de mantenimiento asociadas, el acopio de material y la consecuente reducción de mano de obra. El modelo de *renting* que se propuso cubriría el coste con los ahorros generados.

Un ejemplo concreto de actuación es el aplicado en el andén 1 de la parada de Velázquez en el Metro de Madrid (Fig. 6.2). Se ha ganado en homogeneidad de la iluminación en el andén, debido a la apertura del LED utilizado (170°) y además se han demostrado ahorros de un 68,5%, pasando de 10,8 A a 3,4 A de intensidad, con la sustitución de los 62 tubos de 58W sobre los que ha tenido lugar la actuación, por *Fluorbrite 150*.

Según la empresa que ejecutó la solución¹, la sustitución de todas las paradas por esta tecnología, supondría a Metro de Madrid ahorros cercanos a los 8 millones de Euros anuales. Además, se ahorrarían unas 100 mil toneladas de CO₂ de emisiones como consecuencia del ahorro en kWh.



Figura 6.2. Iluminación del andén y banda de seguridad. Fuente: Metro de Madrid.

Metro prevé también llevar a cabo una revisión e implantación de los sistemas de apagado nocturno programado de las luces de las estaciones, las escaleras mecánicas y las máquinas de venta para garantizar que después del cierre del servicio quedan apagadas, salvo en las zonas de mantenimiento y limpieza. Esta medida supondrá un ahorro superior a 1,5 millones de euros anuales.

El artículo 4 de la sección primera del capítulo II del Decreto 49/1987 de 8 de mayo, de la comunidad de Madrid por el que se aprueba el reglamento del ferro-

¹ Aton Energy Solutions.

carril metropolitano de Madrid, dice: “tanto los trenes como las instalaciones a las que tenga acceso el público: accesos exteriores, vestíbulos, escaleras, andenes y otros; deberán mantenerse en un estado tal que permitan su utilización en buenas condiciones de comodidad, iluminación, higiene, orden y seguridad”.

6.2. Datos energéticos

El reparto de gastos energéticos en el Metro de Madrid en el año 2012 responde a lo que aparece en la Fig. 6.3.

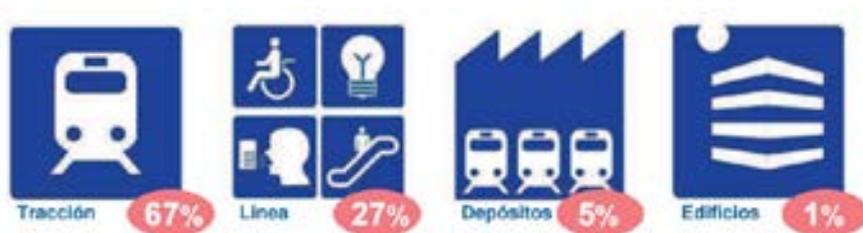


Figura 6.3. Gastos energéticos. Fuente: Metro de Madrid.

Los esfuerzos en la gestión energética de Metro de Madrid se centran en reducir el gasto de energía tanto de tracción como de Servicios Auxiliares (señales, ventilación, fuerza y alumbrado). Para ello se han puesto en marcha medidas de eficiencia que afectan no sólo al material móvil, sino también a las instalaciones y la infraestructura. Como medidas más destacadas se pueden mencionar las siguientes:

- Optimización del modelo de propulsión del material móvil e implantación de marchas económicas en la conducción automática.
- Optimización de la ventilación de los túneles.
- Optimización de la climatización del material móvil.
- Reducción de la tensión de salida en las subestaciones eléctricas.
- Apagado del alumbrado nocturno de las estaciones, apagado nocturno de las escaleras mecánicas, eliminación de imanes para facilitar la regeneración de energía de un tren a otro, desconexión de las subestaciones eléctricas en hora valle.

En el ámbito del *Benchmarking*, a lo largo de 2013 el Servicio de Planificación Estratégica continuó consolidando la presencia de Metro de Madrid en el grupo *CoMET* y potenciando todos los aspectos relativos a esta función, en particular el conocimiento sobre nuestro posicionamiento relativo frente a otras explotaciones. En este sentido, se ha participado en los siguientes estudios llevados a cabo por las comunidades de metros del mundo *CoMET* y *NOVA*:

- Mejora del tiempo de parada en estaciones.
- Comunicación con pasajeros.
- El factor humano en explotaciones UTO.
- Prevención de riesgos del personal subcontratado.
- Inspección de infraestructuras ferroviarias.
- Eficiencia en costes.
- Mantenimiento de material móvil.
- Formación del personal operativo.

Metro se ha mostrado, también, muy activo en la resolución de consultas recibidas desde otros metros del mundo a través del foro *CoMET/NOVA*. Del mismo modo, las cuestiones propuestas por nuestra empresa han logrado un alto índice de respuestas por parte de la comunidad internacional de metros.

Los datos energéticos se analizan desde la visión que concede el cumplimiento de los objetivos ambientales. El respeto por el medio ambiente forma parte de la Estrategia Corporativa de la Compañía constituyendo el "*Ahorro Energético*" una línea de actuación dentro de la línea estratégica "*Mejora de la Eficiencia Interna*". Metro de Madrid, como empresa comprometida con el Medio Ambiente, cuenta con un Sistema de Gestión Ambiental basado en la Norma UNE-EN ISO 14001, a través del cual asesora, sensibiliza y busca soluciones eficientes para prevenir, controlar y minimizar los impactos ambientales derivados de su actividad, contribuyendo a la protección del Medio Ambiente. En su compromiso con el medio ambiente ha llevado a cabo la implantación de diversas medidas orientadas a reducir el impacto de la compañía sobre el entorno en el que opera. Esta reducción se apoya en unas políticas de ahorro y eficiencia energética las cuales han convergido en el diseño y desarrollo de herramientas encaminadas a la gestión de la energía. Entre éstas, merecen mención especial el Plan de Ahorro Energético (PAE), el Plan de Gestión Sostenible del Agua y el Sistema de Gestión de residuos.

El Plan de ahorro energético se fija en la tecnología LED, e incluye estos otros puntos:

- Optimización del modelo de propulsión del material móvil.
- Implantación de marchas económicas en conducción automática.
- Optimización de la climatización en el material móvil.
- Eliminación de imanes de vía.
- Prototipos de iluminación led en material móvil.

Con objeto de validar los sistemas de iluminación del recinto de viajeros, se han realizado mediciones en coches tipo 8000 y 9000, mediante la utilización de tubos de tecnología LED. A lo largo del año 2013 se han realizado prototipos de iluminación LED en distintas unidades y coche cuyos resultados se están valorando actualmente.

6.3. Actuaciones en iluminación

Las lámparas o luminarias de partida se están sustituyendo, como ya se ha descrito, por sus equivalentes en tecnologías LED con objeto de contribuir a la máxima eficiencia energética en el Metro de Madrid. Diferenciándolas por áreas, las exigencias de la empresa para la iluminación se exponen a continuación. Los requerimientos se dividen en tres apartados claros: características físicas, lumínicas y eléctricas². Se añaden los niveles de temperatura del color y el CRI.

Los objetivos de la Fase I (60 estaciones y 1 depósito) en la mejora de la iluminación en el Metro de Madrid, puesto en marcha en septiembre de 2014, se exponen en la Fig. 6.4, en la que se recuerdan las ventajas de la sustitución de las luminarias de partida por tecnologías LED.

Metro de Madrid realiza la mejora de los sistemas de iluminación organizándolos por lotes. En el primero de ellos (Fig. 6.5) se incluyen 59 estaciones y 1 de sus depósitos. Se actúa sobre al menos una (Campo de Las Naciones de la Línea 8) de las estaciones de cada una de las 12 líneas, alcanzando incluso actuaciones sobre 8 estaciones de la misma línea como sucede con la 1 y la 12. Todo perteneciente a la actuación de la Fase II.

² Véase apartado siguiente "modelos de contratación".

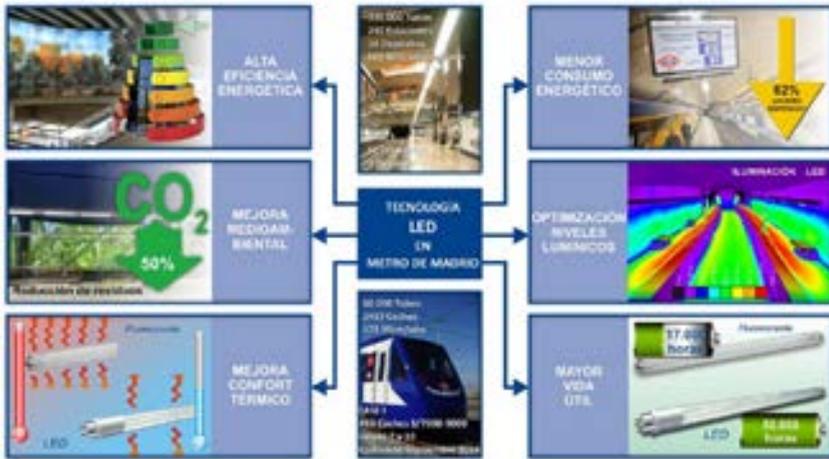


Figura 6.4. Fase 1 y lotes. Fuente: Metro de Madrid.



Figura 6.5. Lote 1. Fuente: Metro de Madrid.

Se han diseñado los lotes 2 y 3 respectivamente con las que se completarán hasta 181 estaciones, como se muestra en la Fig. 6.6, en la que se diferencian las actuaciones por estaciones y depósitos en sus diferentes líneas, y la primera fase de los tres lotes planificados.



Figura 6.6. Estaciones y depósitos en la Fase 1 y Lotes. Fuente: Metro de Madrid.

Una de las actuaciones de mayor impacto en las instalaciones del Metro de Madrid es la que se desarrolla a continuación. Ésta responde a la emisión de un Pliego de Condiciones Técnicas (correspondiente a la Fase I), según el cual la solución comprende las siguientes actuaciones:

- Sustitución unitaria de los elementos lumínicos actuales, basados en tecnología de Fluorescencia T8 por sus equivalencias en Tecnología LED con una reducción, en el consumo eléctrico actual, de mínimo del 50%.
- Los citados equipos poseen las siguientes características principales:
 - *Driver*/Fuente de Alimentación Externa con capacidad de Regulación de Intensidad.
 - Color de Emisión 4.000 K.
- Dotar a la instalación de un sistema de Regulación Sin Cables, basada en el protocolo de comunicación estandarizado ZIGBEE que permita a METROMADRID la regulación por grupos (módulos Gateway) de forma individualizada de los niveles de Iluminación deseados.

Descrita la solución se acude al diagrama general de la solución particular para el control. En este ámbito la instalación propuesta consta de los siguientes elementos:

- Tubos T8 Tecnología LED de *LG Electronics*.
- Driver/Fuente de alimentación regulable *LG Electronics*.
- *Dongle Zigbee* insertado en cada *driver* receptor de señal inalámbrica.
- *Gateway* de control con RTC (Reloj en Tiempo Real) que gestiona, de forma autónoma, un grupo de luminarias (hasta un número máximo de 40 unidades por grupo de control) a las que transmite las ordenes previamente programadas de regulación y encendido/apagado diario.
- A demanda del cliente (en zonas con iluminación natural) este sistema puede incorporar detección de nivel lumínico de los grupos seleccionados con la inclusión de sensores crepusculares LG.

6.3.1. Tubos LED

Tubo LED T8 G13 *LG electronics*. Se trata de tubos LED regulables con *driver* externo. La tabla 6.1 recoge los datos eléctricos y técnicos según su fabricante LG.

Tabla 6.1. Datos eléctricos y técnicos. Fuente: Metro de Madrid.

Modelo	T1640GE902E	T2040GE902E
Potencia	19 W (Driver Incluido)	24 W (Driver Incluido)
Medidas	1.200 mm	1.500 mm
Factor de potencia	> 0,9	> 0,9
Ángulo de apertura	140°	140°
Flujo luminoso	1.900 lm	2.400 lm
Eficiencia luminosa	> 100 lm/W	> 100 lm/W
Temperatura de Color	4.000 K	4.000 K
IRC	>80 Ra	>80 Ra
Duración	50.000 horas	50.000 horas
Dimable	0-10 V, ZigBee Dimming	0-10 V, ZigBee Dimming
Base	G13	G13

6.3.2. Driver regulable LED tube

Es el equipo encargado de adaptar la tensión eléctrica de la red a la necesaria para el funcionamiento de los tubos. Permite la regulación de flujo optimizando de esta forma los consumos de energía. Sus especificaciones técnicas y eléctricas aparecen en la Tabla 6.2, según su fabricante LG. El seleccionado es el modelo PITB-L301D Tube 44 LEDdriver.

Tabla 6.2. Especificaciones del driver regulable. Fuente: Metro de Madrid.

Output (W)	Output (Vdc)	Output (A)	Input (Vac)	Dim Method	PF	Efficiency (%)	(LxWxH mm)
44	26-39	0,57x2	100-240	0-10V, ZigBee	>0,9	Min. 83	280x40x27

6.3.3. Dongle Zigbee

Emisor-Receptor señal Zigbee, permite la comunicación inalámbrica entre el driver y el gateway utilizado para el control. Dispone de conexión Plug&Play a driver LED.

6.3.4. Sensor de presencia crepuscular

Este dispositivo aparece como opcional en la descripción de la solución editada por el Metro de Madrid. En la Fig. 6.7 se incluye un esquema que aclara su conexión con el resto de elementos.

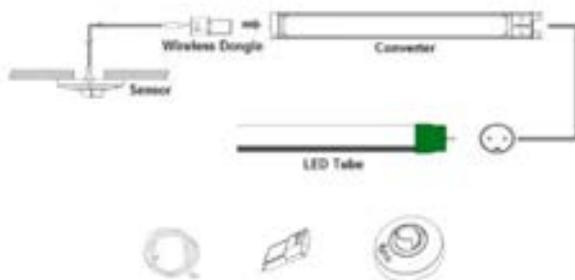


Figura 6.7. Sensor de presencia crepuscular. Fuente: Metro de Madrid.

El Documento Básico DB-HE-3 enumera los objetivos y aplicaciones relacionados con el ahorro energético. Dentro del sub-apartado HE-3 Control y regulación de iluminación se definen las soluciones a instalar en zonas de uso esporádico, así como soluciones para el óptimo aprovechamiento de la luz natural en zonas de actividad permanente. Este documento se basa en las necesidades de los usuarios y en la eficacia energética, exigiendo a los edificios disponer de instalaciones y sistemas de control que permitan ajustar la conexión de luminarias a la ocupación real de las estancias. Para zonas con determinadas condiciones de actividad, se proponen sistemas de regulación que optimicen el aprovechamiento de la luz natural exterior. De ahí que este sistema sea coadyuvante para el cumplimiento de los objetivos de eficiencia energética. El ahorro estimado por el empleo de detectores de movimiento puede llegar a un 15-20% adicional sobre el resto de los ahorros principales.

6.3.5. Instalación y programación del sistema

Se prevén los siguientes trabajos de instalación:

- Sustitución de los tubos fluorescentes instalados actualmente por tubos de tecnología LED.
- Sustitución de los balastos para fluorescente instalados actualmente por drivers adecuados a los tubos led. Estos drivers permiten la regulación de flujo. Los nuevos drivers se ubicarán (salvo imposibilidad física) en la misma ubicación que actualmente ocupan los balastos fluorescentes. Las alimentaciones existentes actualmente no sufrirán modificaciones.
- Instalación de *gateway* para control autónomo de regulación por grupos de luminarias (máx. 40 unidades). Los *gateways* se ubicarán con un criterio general de interdistancia de 30 metros entre ellos. Se prevé su instalación adosada a luminaria siempre que sea posible. Los *gateway* requieren una alimentación de 5 V (cc) a través de un adaptador conectado a 230 V (ca), esta alimentación se tomará del circuito de alumbrado correspondiente al igual que los nuevos drivers. Con respecto a la programación se dispondrá de un módulo driver USB (Fig. 6.8) de programación que debe ser conectado a un ordenador portátil (sistema Windows) el cual permite la programación de cada uno de los *gateway* sin cables. Este módulo contiene la herramienta de software de configuración del sistema que se auto-instala y permite la programación de los niveles de regulación según las necesidades establecidas.



Figura 6.8. Módulo driver USB. Fuente: Metro de Madrid

6.4. Modelos de contratación y experiencia de Metro de Madrid en este ámbito

En el BOE número 58, del lunes 9 de marzo de 2015, página 10.033, se publica el “Anuncio de Metro de Madrid, Sociedad Anónima, por el que se convoca la licitación, por procedimiento abierto, para la contratación de suministro e instalación de iluminación eficiente con tecnología LED en Metro de Madrid (Expediente 6011500041)”. Con la ejecución de las obras derivadas de este tipo de contrato, ofertado a concurso licitación pública en el BOE, se concede la igualdad de oportunidades a las posibles empresas suministradoras de sistemas de iluminación para el Metro de Madrid.

Las lámparas y luminarias LED en estaciones de Metro cumplirán las siguientes exigencias que se describen en la Tabla 6.3, en lo referido a sus especificaciones físicas.

Tabla 6.3. Especificaciones físicas de los tubos. Fuente: Metro de Madrid.

LONGITUDES de los tubos	1500mm.	1200mm.
CONEXIÓN	G13, con alimentación desde Fuente de alimentación en corriente continua	G13, con alimentación desde Fuente de alimentación en corriente continua
MATERIALES NO METÁLICOS	No propagador de la llama	
	0% contenido halógenos	
	Baja emisión de humos	
	Baja acidez de humos	
	Los materiales plásticos utilizados deberán tener características antiestáticas repelentes del polvo.	
CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS	La rigidez y el peso del producto no deben generar una flecha superior al 1 % de su longitud a lo largo de todo el ciclo de vida del producto.	
ÓPTICA	La óptica del producto debe ser tal que genere una orientación del flujo luminoso con un ángulo entre 120º y 180º vertical y hacia abajo. Debe garantizar, en cualquier caso, el valor de UGR especificado.	
TEMPERATURA DE TRABAJO	10 °C < T < 45 °C	
INCREMENTO DE TEMPERATURA AMBIENTE A 10 cm. DEL FOCO.	≤5 °C	

Para el caso de las especificaciones lumínicas, los requerimientos se exponen en la Tabla 6.4.

Tabla 6.4. Especificaciones lumínicas. Fuente: Metro de Madrid.

LONGITUDES de los tubos	1500	1200	mm.
FLUJO LUMINOSO	>2000	>1600	Lúmenes
RENDIMIENTO DE FLUJO LUMINOSO, A LO LARGO DE LA VIDA ÚTIL DEL PRODUCTO	L70		
EFICIENCIA LUMÍNICA	>90		Lm/W
TEMPERATURA DE COLOR	Según requisito incluido más adelante		°K
FLICKER	No se notarán parpadeos ni zumbidos ni efecto estroboscópico, y el tiempo de encendido será <0,5 s.		
IRC	Grupo 2(>80)		
GRADO DE DESLUMBRAMIENTO UGR	Según normativa		

Las especificaciones eléctricas se recogen en la Tabla 6.5.

Tabla 6.5. Especificaciones eléctricas. Fuente: Metro de Madrid.

LONGITUDES de los tubos	1500	1200	mm.
POTENCIA MAX	29	18	W
TENSIÓN	230	230	V
THD máxima en corriente con regulación	≤20	≤20	%
THD máxima en tensión con regulación	≤2	≤2	%
FACTOR DE POTENCIA	≥0,95	≥0,95	FP
AHORRO ENERGÉTICO FRENTE A T-8	≥50	≥50	%

La cuarta Tabla 6.6, de exigencias para licitar se refiere a la durabilidad de luminarias y lámparas.

Tabla 6.6. Durabilidad. Fuente: Metro de Madrid.

LONGITUDES de las Luminarias	1500	1200	mm.
VIDA ÚTIL	≥50000		h.

La temperatura de color de la luz emitida por las luminarias, en cada caso, se deberá adecuar a las especificadas en la siguiente tabla, según ubicación, con

una dispersión dentro de 5 pasos de la elipse de *McAdam*. Normas IEC 62717, IEC 62722. Se recoge en la Tabla 6.7.

Tabla 6.7. Temperatura del color y CRI. Fuente: Metro de Madrid.

Tipo de Instalación	°K		CRI
	Mínimo	Máximo	
Interior de estaciones	4.000	5.000	≥80
Exterior de estaciones	-	6.000	≥40
Depósitos General	4.500	6.000	≥40
Depósitos Fosos	4.500	5.000	≥80
Depósitos Otros	4.500	5.000	≥80

Para llevar a cabo el cambio de tecnología de iluminación, de la fluorescencia actual a la tecnología LED, han de tenerse en cuenta todas las modificaciones y/o adaptaciones necesarias para el buen desarrollo del cambio, respetando los diseños arquitectónicos actuales, las infraestructuras portantes de las luminarias existentes, la distribución eléctrica y, en general, los niveles de prestación lumínica actuales.

A continuación se indican los apartados fundamentales que deberán componer la oferta, así como las tareas incluidas en cada uno de ellas. Dichas ofertas deberán realizarse de manera independiente para cada uno de los lotes al que se presente.

Para licitar en las ofertas del Metro de Madrid se debe componer una Memoria que incluya, como mínimo, los siguientes apartados³:

- *EP: Toma de Requisitos y Estudio Preliminar:* El Licitador será el encargado de recoger los parámetros lumínicos iniciales de cada ubicación incluida en el alcance de este Pliego de Prescripciones Técnicas así como el listado de elementos actualmente instalados, en cada lote al que se presente oferta, incluyendo su estado actual.
- El Licitador realizará los estudios lumínicos, de todas las ubicaciones definidas en el alcance de este Pliego de Prescripciones Técnicas, que justifiquen técnicamente el diseño de la solución que se presentará en la oferta, para cada lote al que se presente oferta.

³ Extraído del Pliego de Condiciones Técnicas aportado por Metro de Madrid.

- *DS: Diseño de la Solución:* El Licitador presentará en su oferta el diseño de la solución final adaptada a cada ubicación, para cada lote al que se presente oferta.
- *IS, Instalación:* El Licitador realizará un estudio de cómo implementará la solución en las instalaciones incluidas en el alcance de este Pliego de Prescripciones Técnicas, para cada lote al que se presente oferta.
- *VV, Pruebas de Verificación y Validación:* Metro de Madrid realizará las pruebas necesarias para verificar que la solución presentada cumple con todos los requisitos de diseño especificados en este Pliego de Prescripciones Técnicas, validando la instalación. Esta validación se realizará para cada uno de los lotes de manera independiente de manera que se verifique la solución técnica presentada.
- *VS, Validación de la Solución:* Metro de Madrid validará la solución a implementar en cada ubicación incluida en el alcance de este Pliego de Prescripciones Técnicas.
- *MG, Mantenimiento y garantía:* Metro de Madrid será responsable del mantenimiento de las instalaciones incluidas en el alcance de este Pliego de Prescripciones Técnicas, limitándose el adjudicatario a cumplir con los términos de la garantía establecidos en este Pliego de Prescripciones Técnicas.

Se solicitan lo certificados de fabricación:

- Certificado ROHS.
- Certificado EMC.
- Certificados de fabricación de todos los elementos.

Todos los elementos irán acompañados, además, por sus etiquetas, que deben recoger todos los datos útiles sobre los mismos: técnicos, eléctricos, ambientales, de eficiencia energética, de seguridad y de origen, como mínimo.

7.1. Introducción. Datos generales de Calle 30

Madrid Calle 30, S.A. se constituyó en mayo de 2004 bajo la forma de sociedad anónima municipal. El objeto social y la actividad principal de la Sociedad fue la realización de obras de reforma y mejora en la vía de circunvalación M 30 y sus infraestructuras y espacios relacionados, así como la gestión, explotación y mantenimiento de la vía de circunvalación M 30 y sus infraestructuras y espacios relacionados.

Calle 30 es una vía de circunvalación, con varios carriles y exenta de semaforización (salvo un tramo al norte conocido como Avenida de la Ilustración) que rodea el centro de la ciudad de Madrid.

Discurre íntegramente por el municipio de Madrid, rodeando sus distritos centrales, y en su recorrido enlaza con las principales carreteras nacionales radiales, que nacen en Madrid, así como con otras autovías (A-42, M-607, M-11, M-500) y con numerosas calles interiores.

Tiene una forma semejante a la de un diamante, con tres sectores claramente diferenciados, que responden a su evolución histórica, a lo largo de este documento, se hará referencia a esta sectorización de manera que se relata a continuación:

- El sector este, o Avenida de la Paz, que discurre en sentido norte-sur desde el comienzo de la Carretera de Burgos (A-1) hasta el Nudo Sur, comienzo de la A-4. El trazado de este sector se realiza en superficie, con amplias vías de servicio que canalizan los enlaces de la autopista.
- El sector oeste, que sigue el curso del río Manzanares en sentido sur-norte desde el Nudo Sur, hasta el enlace de El Pardo. El trazado ha sido completamente soterrado desde el Nudo Sur hasta el enlace con la A-5 (km 19).
- El sector norte, o Avenida de la Ilustración, desde el enlace de El Pardo hasta el nudo de Manoteras (donde enlaza con la M-607, la A-1, la M-11

y el Paseo de la Castellana). En los sectores más próximos al enlace de El Pardo discurre, todavía con características de autopista, en trinchera, mientras que, en la zona más próxima al nudo de Manoteras, se transforma en una avenida con semáforos.

- Existe por otra parte, un enlace de conexión directa (*by-pass* sur) entre el sector este y el oeste que evita el paso por el Nudo Sur de los tráficos que quieran rodear el casco urbano sin abandonar la autopista. Dicho enlace es subterráneo en su totalidad y discurre por debajo de zonas del centro urbano.

Las cifras más significativas de la infraestructura incluidas en el ámbito de Madrid Calle 30, son sus 383 km de carril, sus casi 42 km de redes de túnel o sus más de 1.500.000 usuarios cada día.

7.2. Madrid Calle 30. Datos energéticos y Estrategia de Ahorro

En las instalaciones de los túneles de Madrid Calle 30 existe una red de alta tensión con 14 acometidas de dos compañías distribidoras que permite la interconexión de los distintos centros de transformación o cuartos de instalaciones.

De éstas 14 acometida, 11 de ellas se encuentran configuradas en un anillo, el cual es gestionado por una aplicación informática, centralizada en los Centros de Control, y que permite la gestión del anillo de una manera centralizada.

Esta red de alta tensión se configuró a una tensión de 15 kV y está dotada del equipamiento necesario que permite gestionar y controlar la disponibilidad de electricidad en cada punto de la instalación.

Los equipos que constituyen el sistema de alumbrado de los túneles de Madrid Calle 30 están compuestos por cuatro grandes grupos diferenciados por el servicio que prestan. Estos son:

- Iluminación Permanente.
- Iluminación de Refuerzo.
- Iluminación de Emergencia.

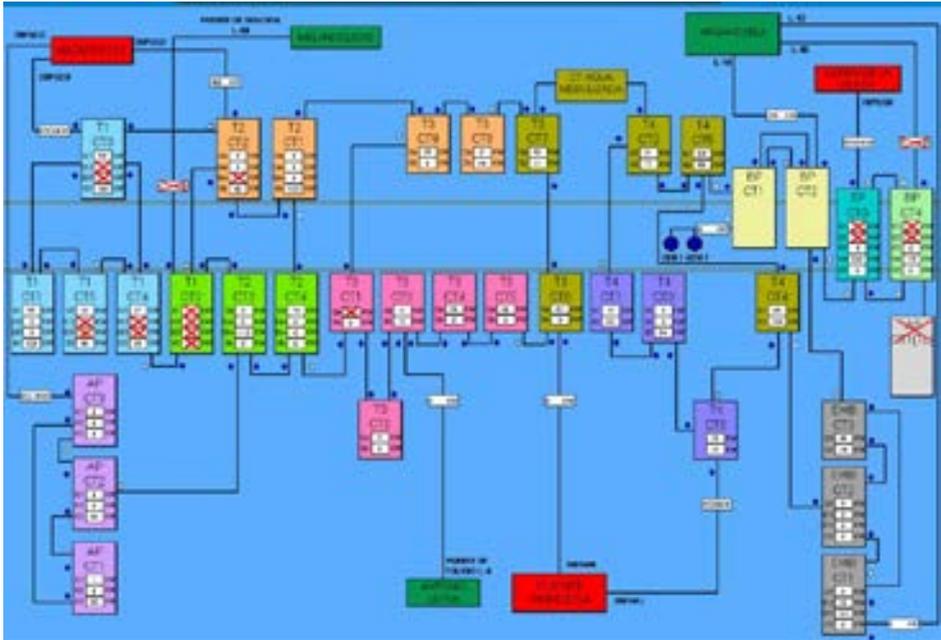


Figura 7.1. Esquema de infraestructura eléctrica. Fuente: Madrid Calle 30.

Desde el inicio de la explotación, Madrid Calle 30 puso todo su empeño en la optimización del consumo, realizando estudios con objetivos y premisas orientadas a ello.

En el caso del alumbrado permanente se estudiaron y realizaron pruebas de diferentes alternativas, con la tecnología existente en 2004, y tras comparar las alternativas, el resultado fue que la tecnología LED, ofrecía las mismas prestaciones luminicas, pero con prácticamente el doble de consumo y coste energético, además del mayor coste de inicial de instalación en obra.

7.2.1. Datos Energéticos. Consumo general e iluminación

Los consumos totales de los últimos años son similares, rondando por lo general los 40.000 MWh para las instalaciones de los túneles y las de alumbrado exterior.

Históricamente, el reparto de los consumos anuales las instalaciones de Madrid Calle 30 destinados a atender las necesidades de consumo de las instalaciones de los túneles, se reparten aproximadamente como se indica en la Tabla 7.1.

Tabla 7.1. Consumo anual. Fuente: Madrid Calle 30.

	Consumo anual (MWh)
Alumbrado exterior	8.000
Alumbrado de túnel	20.000
Resto de instalaciones	12.000

7.2.2. Planes de ahorro y actuaciones de Iluminación

✱ Integración del sistema DALI en iluminación de los túneles

Una de las premisas en el diseño inicial del trazado de los túneles de Madrid Calle 30 era la de construir la infraestructura más segura y que supusiera un referente mundial en materia de control de túneles, razón por la que se incorporaron tecnologías procedentes de otros campos con el fin de maximizar la seguridad y la comodidad de los usuarios de la vía.

Uno de los sistemas que más directamente afecta a los conductores y que más relacionado está con la seguridad y el confort es el sistema de alumbrado de los túneles, ya que es el sistema de alumbrado encargado de hacer imperceptibles las transiciones exterior/interior en las entradas y salidas a los túneles.

Por este motivo, en Madrid Calle 30, se tuvo desde el inicio la idea de facilitar la conducción de los usuarios de la vía siendo conscientes de que ello redundaría en una conducción más confortable y, por tanto, más segura.

El Sistema de Iluminación de túnel se diseñó para asegurar un confort y comodidad del usuario, de manera que la percepción de estar en un subterráneo fuese minimizada, obligando a tener una luminaria de tipo continuo, y con una luz lo más blanca posible, ya que se iba a construir el túnel urbano más largo del mundo en aquellos momentos, casi 12 kilómetros de recorrido entre la entrada por la Avenida de Portugal y la salida hacia la A-3.

Para la gestión del alumbrado permanente se decidió equipar a las luminarias con balastos electrónicos que posibilitarían un control más exhaustivo sobre el alumbrado, permitiendo de manera centralizada el variar la intensidad lumínica en la vía, de manera automática y/o manual.

Para conseguir este control, se implantó un protocolo de comunicaciones entre el sistema de alumbrado permanente y el Centro de Control, mediante el protocolo+ DALI (*Digital Addressable Lighting Interface*).

El protocolo DALI (*Digital Addressable Lighting Interface*) es un protocolo de control de alumbrado diseñado para controlar digitalmente balastos electrónicos y luminarias equipadas con este tipo de tecnología. Este sistema de regulación se implanta para una potencia total instalada de 2.400 kW repartidos en casi 40.000 luminarias de tecnología fluorescente.

Este protocolo de comunicaciones, por sus características, permite una elevada velocidad de transmisión de datos, el no emplear un cableado especial, poder agrupar las luminarias para su gestión y poder programar hasta 16 escenas de iluminación diferente.

Desde el inicio de la explotación, se establecieron una serie de escenarios en la programación del sistema de iluminación permanente, de manera que en condiciones de tráfico normales, las luminarias estarían funcionando a un 70% de su capacidad, en horario diurno, bajando este porcentaje al 50% en horario nocturno. Obteniendo considerables ahorros energéticos, con esto, se garantizaba que en cualquier situación, en cualquier punto de la vía se obtuviese un mínimo de 4 candelas por metro cuadrado de intensidad de iluminación, pudiendo, en situaciones de emergencia o trabajos de mantenimiento en la vía, disponer el alumbrado con una intensidad del 100%.

Con el paso del tiempo y la acumulación de datos, se llevó a cabo un estudio de las características de la iluminación permanente de los túneles, llegando a la conclusión, que durante las horas de funcionamiento nocturno (de 20.00 h a 07.00 h), se podía bajar el porcentaje de las luminarias hasta un 30%, situación que se llevó a cabo en mayo de 2008, este cambio supuso un nuevo ahorro en el consumo eléctrico del sistema de alumbrado de los túneles, cifrado en un 10% aproximadamente.

Considerando que la luminosidad de las zonas de los túneles próxima a las entradas y salidas es variable en el tiempo a lo largo del día se implanta un criterio de regulación astronómica que particulariza para cada instante el nivel de intensidad en las luminarias, esta última política de gestión de alumbrado coherente con la iluminancia del entorno de los túneles ha permitido un ahorro de consumo del 21% (3,73 MWh/año) respecto a la estrategia de gestión de anterior. Añadir que este cambio en el porcentaje de la iluminación en horario nocturno no ha disminuido la seguridad del usuario, ya que se mantiene unos niveles de luminosidad y uniformidad suficientes, que garantizan la seguridad de los usuarios.

* Estado actual (2015) de las instalaciones de iluminación y sus datos de consumo en iluminación.

Como se ha comentado anteriormente, los consumos anuales del total de las instalaciones de la Calle 30 rondan los 40.000 MWh, de los cuales unos 32.000 MWh van destinados a atender las necesidades de consumo de las instalaciones de los túneles.

En cuanto a la iluminación, los datos de consumo son los expresados en la Tabla 7.2.

Tabla 7.2. Consumo anual, estado actual. Fuente: Madrid Calle 30.

	Consumo anual (MWh)
Alumbrado exterior	8.000
Alumbrado en calzada de túnel	20.000
Otros alumbrados en túnel	1.300

7.3. Actuaciones de Iluminación en Madrid Calle 30

Madrid Calle 30 se encuentra inmerso en un proceso de mejora operativa con el fin de optimizar y minimizar el consumo energético y reducir la potencia consumida, la energía reactiva y reducir las emisiones de CO₂ favoreciendo las condiciones de eficiencia energética y el control operativo de sus instalaciones de alumbrado en la zona exterior de Madrid Calle 30.

La modernización del alumbrado de Madrid Calle 30 es un paso más en el proceso de modernización de las infraestructuras con el objetivo claro de estar en la vanguardia de los procesos de eficiencia energética y ahorro.

7.3.1. Histórico de actuaciones hasta la actualidad. Instalación actual

* Alumbrado Exterior

En relación con el alumbrado exterior que gestiona Madrid Calle 30, es una instalación que se hereda del ayuntamiento en el año 2005, y que está compuesto

por aproximadamente 2.500 luminarias, gestionadas desde 66 centros de mando, tanto unas como los otros, son instalaciones que en algún caso cuentan con más de 20 años de funcionamiento, por lo que se han llevado a cabo algunas experiencias, destinadas a la futura renovación de la totalidad de la instalación. Las principales con:

- Reguladores de flujo para centros de mando de alumbrado exterior, con el objeto de mejorar la eficiencia en la gestión del envejecido alumbrado exterior asignado a Madrid Calle 30, en 2008, se realizó la instalación de un prototipo de Centro de Mando con Regulador de Flujo que opera estabilizando y regulando el voltaje de salida, según un horario programado, en los circuitos de alumbrado. En aquellas instalaciones que cuentan con balastos electromagnéticos, el consumo es proporcional a la tensión de entrada, con lo que la reducción de dicho valor afecta tanto al consumo como al flujo lumínico, y a los niveles de iluminancia en suelo, el ahorro medido en el consumo eléctrico de éste centro de mando fue de aproximadamente un 20%.

* Definición del centro de mando “ideal” para gestión de alumbrado exterior.

De igual modo que con los reguladores de flujo, y desde 2011, se estudian y analizan otras alternativas de gestión en el alumbrado exterior. Con éste estudio se han definido unas especificaciones innovadoras y de alta eficiencia que se han incorporado al proyecto de renovación que en estos momentos se encuentra en redacción.

Entre otras mejoras, se han estudiado diversas tecnologías de telegestión por ser esta la solución más completa, y que como se ha comentado, se ha incorporado al proyecto de renovación en redacción.

* Instalaciones de detectores de presencia en las galerías del by-pass

En el proyecto de soterramiento de Madrid Calle 30 se construyeron 2 calzadas para servicios de emergencias situadas en el tramo de *by-pass*. Estas galerías, al parte de un sistema del sistema de evacuación en situaciones de emergencia,

disponen de una instalación de alumbrado que se encuentra en funcionamiento las 24 horas al día.

A fin de gestionar este funcionamiento de una manera más eficiente en el año 2009 se implantó en un tramo una prueba piloto con un doble sistema de detección y regulación de modo que en ausencia de movimientos en la calzada el alumbrado funcionase a una intensidad del 10% de sus prestaciones totales, el resultado, desde un punto de vista económico, no fue aceptable, puesto que, si bien los consumos se redujeron considerablemente, la inversión inicial para la implantación, por el elevado número de sensores a instalar en las galerías, suponía un elevado coste, lo que daba un periodo de retorno demasiado largo, por encima de los 4 años.

* **Instalación de luminarias led en báculo de exterior**

Ante la continua mejora en la oferta del alumbrado LED y a fin de tener un *feedback* actualizado del comportamiento de la misma en su uso para alumbrado en viarios se han realizado pruebas de soluciones de diferentes fabricantes en varias secciones de tipo vial.

* **Prueba con luminaria continua de LED en túneles**

Dado el avance de la tecnología led se contacta con fabricantes de luminarias en tecnología LED para que procedan al diseño y desarrollo de un producto que pueda sustituir con dicha tecnología las luminarias de alumbrado fluorescente de los túneles de Madrid Calle 30.

En el año 2011 se realiza una instalación piloto de tira continua en ambos hastiales en un tramo de 45 m dentro de un túnel de 300 m.

* **Colocación de tubos “fluorescentes” de LED en los túneles**

En un intento de implantación de la nueva tecnología led regulable por *DALI* en las ya existentes luminarias de alumbrado fluorescente de los túneles de MADRID CALLE 30 se realiza en el año 2011 una instalación piloto con 69 luminarias.

* Cambio a tecnología LED en la iluminación permanente de las galerías del *by-pass*

Como conclusión de la prueba ya comentada en el alumbrado de la galería de emergencia se realiza esta prueba, para conseguir ahorros no mediante la regulación, o reducción del horario efectivo de funcionamiento, sino a través de la reducción de potencia.

En el año 2012 se procede a la implantación de 58 luminarias de doble tubo led.

* Nuevo sistema de gestión del alumbrado de refuerzo en la entrada a los túneles por el Nudo Sur

Con el fin de mejorar la funcionalidad de los elementos de iluminación de refuerzo en las entradas a los túneles de Madrid Calle 30, se implanta en el año 2010 en el acceso desde el Nudo Sur una instalación piloto de 370 balastos electrónicos regulables para los proyectores de halogenuro metálico ubicado en dicha zona. Estos elementos serán controlados a través de un sistema de centralización remoto.

* Implantación de Tecnología LED

- Introducción sobre la apuesta por la tecnología LED de calle M30 lo largo de estos años.
- Tecnologías utilizadas e instalaciones afectadas.
- Pruebas realizadas y resultados obtenidos.
- Conclusiones y apuesta actual (desarrollado en capítulo 4).

* Instalación de luminarias LED en báculo de exterior

Como se ha comentado anteriormente, se han realizado diversas pruebas para investigar el posible uso de luminarias tipo led para el alumbrado exterior gestionado por Madrid Calle 30.

A fin de disponer de un conocimiento en la evolución de las prestaciones de las luminarias leds para báculos de al menos 12 metros, y desde el año 2010, se

ha establecido un punto de luz en las proximidades del Estadio Vicente Calderón sobre el que se han instalado diversas luminarias.

En primer lugar se realizó una medida de la iluminancia con las luminarias de vapor de sodio que estaban inicialmente instaladas. Se tratan de luminarias marca IEP modelo PR40, con lámpara de vapor de sodio de 400 W. Con estas condiciones se han tomado varias medidas de iluminancia en distintos escenarios, con todas las variantes posibles. La toma de medidas se ha realizado de acuerdo a la siguiente malla (Fig. 7.2).



Figura 7.2. Malla sobre la M30. Fuente: Madrid Calle 30.

Posteriormente se procedió a la instalación de las luminarias con tecnología LED de la marca LEDNOVA y modelo LEDURBAN con unas potencias de 240 W y 180 W, en una primera prueba se ha procedido a la instalación con orientación perpendicular al tráfico, según se indica en Fig. 7.3.

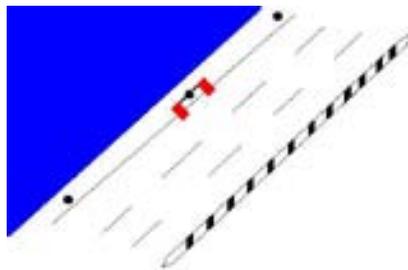


Figura 7.3. Orientación. Fuente: Madrid Calle 30.

De dichas pruebas se dedujo que la tecnología LED en aquel momento no parecía ser una alternativa real al VSAP. El uso para el alumbrado con dicha tecnología con unas potencias que justificasen un aceptable retorno de inversión no proporcionaba unas prestaciones semejantes a las del alumbrado convencional.

Posteriormente y debido el incremento en la oferta y las mejoras en la tecnología LED desde aquella prueba hasta febrero de 2012 se realiza la misma prueba con otras 2 luminarias de la marca LUXES.

En la Tabla 7.3 se muestran los valores tomados con las 3 tecnologías:

Tabla 7.3. Uniformidad por tecnologías. Fuente: Madrid Calle 30.

TECNOLOGÍA		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	iluminancia media	uniformidad media	uniformidad extrema
VSAP	LUMINARIA ENCENDIDA (400W)	4,3	10	38	6,3	4,6	23	25	76	36	26	24,83	17,32%	5,63%
LEDNOVA (LED) (2010)	LUMINARIA ENCENDIDA (240W)	0,9	1,7	9	0,6	0,7	1	2,3	21	3,2	1,3	4,12	14,56%	2,93%
LUXENS (LED) (2012)	LUMINARIA ENCENDIDA (240W)	8,9	4,3	6,6	7,6	12	30	22	31	17	31	17,07	25,19%	13,83%

Nota: para una clasificación ME3a, según el RD1890/2008, los niveles de iluminancia/uniformidad son 15 lux y 0,4 (equivalente a CE3), en luminancia, 1 Cd/m², 0,4 uniformidad global y 0,7 uniformidad longitudinal.

De dichos ensayos se desprende que en el año 2012 la tecnología LED presentaba una mejora en las prestaciones de una manera significativa. No obstante queda pendiente conseguir unas potencias de LED superiores a los 240 W pues para remplazar el VSAP instalado en los báculos de los viales actualmente se utilizan potencias de 400 o 600 W y de estas pruebas se desprende que la iluminancia media aún no alcanza los valores del VSAP.

Hasta el año 2012 y para las alturas de los puntos de luz existentes en el viario de Madrid Calle 30 la tecnología no consigue prestaciones equivalentes a la de VSAP convencional. Bien es cierto que la prueba se ha ido realizando a lo largo del tiempo es palpable la mejora en la tecnología led en este periodo.

* Prueba con luminaria continua de led en túneles

La instalación piloto, 60 luminarias con tecnología LED del fabricante *LIGHTLED*, ubicadas a ambos lados de un tramo de 45 m de túnel, sirve de referencia para la consideración de la tecnología LED para la renovación del alumbrado permanente de túnel.

Observando las gráficas de consumo entre la luminaria del proyecto Madrid Calle 30 (fluorescente) y la luminaria *LIGHTLED* se desprende que el consumo se reduce en un 40%.

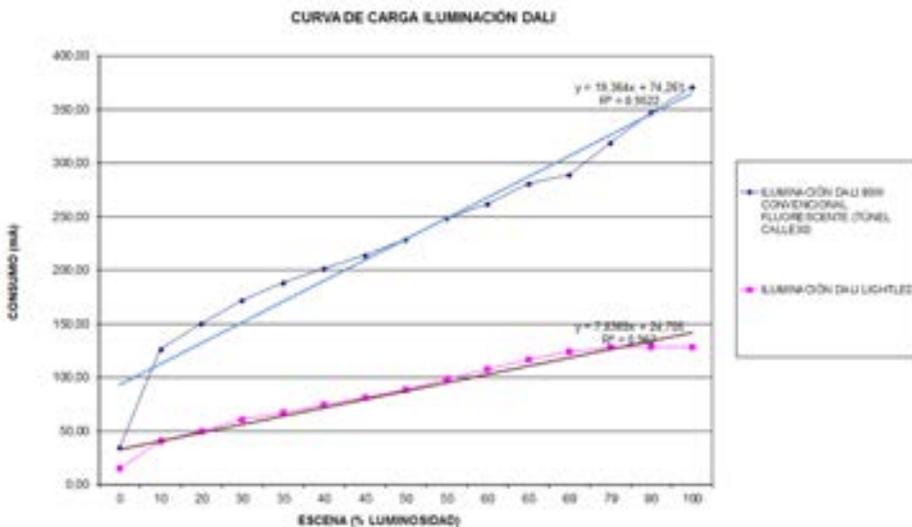


Figura 7.4. Curva de carga iluminación DALI. Fuente: Madrid Calle 30.

* Colocación de tubos “fluorescentes” de LED en los túneles

Dada la evolución ya contrastada de la iluminación led ofertada en el mercado y debido a la reducción de consumo que esta tecnología aporta frente al alumbrado fluorescente convencional se plantea una instalación LED en el interior de los túneles de Madrid Calle 30.

Dicha instalación debe permitir una intercambiabilidad sencilla con la instalación original fluorescente de alumbrado y asimismo se requiere que esta electróni-

ca LED permita una regulación de intensidad mediante el protocolo *DALI* exigible en los túneles de Madrid Calle 30.

La zona de ensayos estará sometida a mediciones en prestaciones luminicas y en consumo.

En el año 2012, fecha de la prueba, pocos proveedores disponen de tubos led que permitan regulación *DALI*, la utilizada en el alumbrado convencional de los túneles de Madrid Calle 30. Para el ensayo se escoge a la empresa *ETRALUX*.

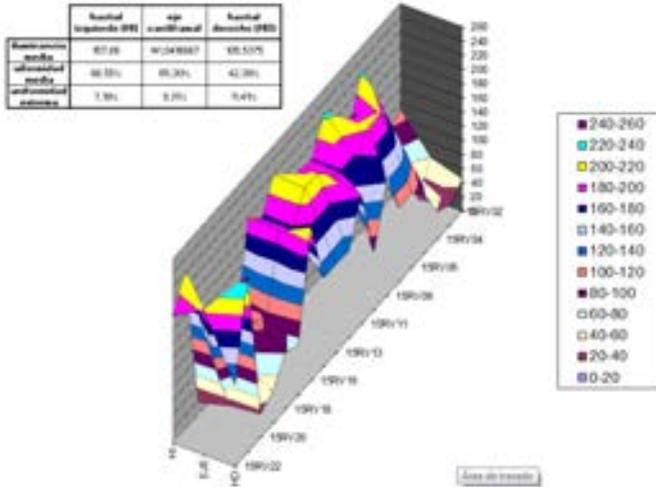
Dentro del trazado de los túneles, la zona de ensayo se decide que sea relativamente aislada del resto de la zona soterrada a fin de que permita un mejor análisis no perturbado por zonas adyacentes. Así se determina la sustitución de las lámparas del alumbrado en el ramal 15RV (acceso desde Gta. Marqués de Vadillo a la calzada interior (NC)) en un tramos de 200 m.

El ramal 15RV posee una distribución de luminarias discontinua y únicamente sobre el hastial izquierdo.

Se procede a reemplazar 69 lámparas fluorescentes convencionales de 80W y sus balastos por otras tantas lámparas de LED *ETRALUX* de 35 W¹. Se realizan mediciones e iluminancia (lux) en 19 puntos sobre hastial izquierdo, eje del carril y hastial derecho del ramal, obteniéndose para ambas tecnologías las mediciones que se muestran en la Fig. 7.5.

¹ Generalmente la potencia de un equipo LED incluye las pérdidas en driver.

ILUMINANCIA (lux) CON INSTALACIÓN CONVENCIONAL (FLUO-80W) HASTIAL IZQUIERDO AL 100% DALI



ILUMINANCIA (lux) ZONA LEDS (HASTIAL IZQUIERDO) AL 100% DALI

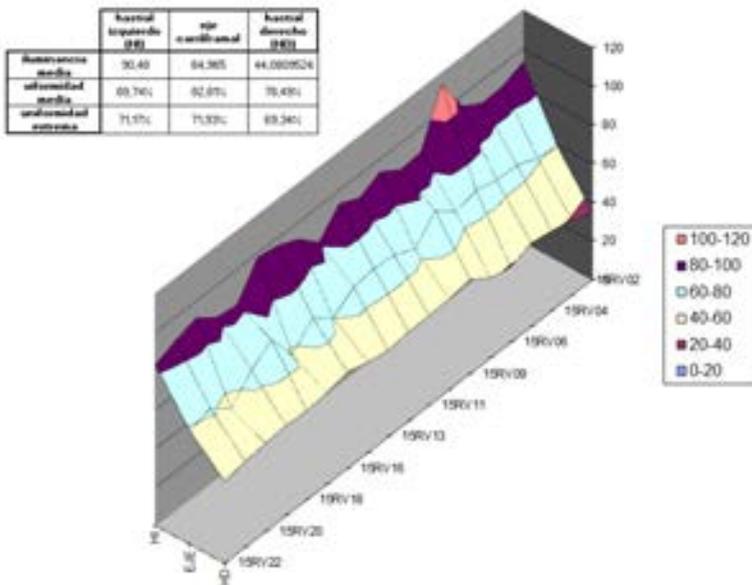


Figura 7.5. Comparación LED-convencional. DALI. Fuente: Madrid Calle 30.

Si bien los valores de uniformidad son mayores en la tecnología led la iluminancia media es de un 58% inferior respecto a la fluorescencia.

Asimismo se miden los consumos de ambas instalaciones según se indica en la Fig. 7.6.



Tecnología	Consumo medio diario en periodo (kWh)
Fluorescencia	93
LED	39

Figura 7.6. Consumos medios. Fuente: Madrid Calle 30.

Resultando que, la reducción de consumo es del mismo orden que la reducción de la potencia instalada, un 57%.

Dado que la potencia del tubo LED (35 W) es muy inferior a la del tubo fluorescente original (80 W) y con los datos anteriores podría concluirse que estas lámparas LED sólo se podrían considerar como un reemplazo para lámparas de potencias menores de fluorescencia (49 W) sin disminuir las prestaciones dadas al usuario.

La principal conclusión, ha sido que la combinación de tecnologías (proyector para fluorescencia con tubo LED) no consigue los objetivos pedidos al alumbrado permanente de Madrid Calle 30.

* Cambio a tecnología led en la iluminación permanente de las galerías del By-pass

Con el fin de mejorar la eficiencia energética en la instalación del alumbrado permanente asociado a la Galería de Servicio del By-pass se ha llevado a cabo un cambio en la tecnología utilizada.

Dada la evolución ya contrastada de la iluminación LED ofertada en el mercado y debido a la reducción de consumo que esta tecnología aporta frente al alumbrado fluorescente convencional se ha planteado la sustitución directa del alumbrado en la doble galería de servicio de *By-pass* Sur de la Calle 30 por tubos dotados de diodos emisores de luz (LED).

El alumbrado motivo de proyecto actualmente no posee regulación de consumo alguna y funciona de manera ininterrumpida se consideró justificado plantear una nueva tecnología que, prestando al menos un mismo nivel de servicio, redujese los consumos energéticos de manera apreciable.

Dentro de la distribución de las galerías de emergencia del *Bypass*, se eligió una zona gestionada por un único cuadro eléctrico, de manera que pudiese ser controlado el consumo de una manera fácil y fiable.

Los objetivos a cumplir son:

- Reducir al máximo los costes de energía eléctrica para la iluminación sin modificar la infraestructura original.
- Gran eficiencia (misma luminosidad que la actual), bajo consumo, en su caso reducción de en torno al 50% en cuanto a energía consumida y emisiones de CO₂ producidas por su consumo, contribuyendo positivamente al medioambiente.
- Permitir una futura expansión del sistema al resto de túneles de Madrid Calle 30.

Para la implantación de la solución adoptada, fue necesario realizar los siguientes trabajos:

- Sustitución de equipos y electrónicas.
- Recableado interno de la luminaria.
- Verificación de la independencia de circuitos e instalación de contadores por cada proveedor.
- Mediciones y seguimiento de la iluminación obtenida.

Las modificaciones realizadas sobre los equipos existentes, no deben afectar a las protecciones, a la funcionalidad para la que fue diseñada, a la IP característica del equipo ni a cualquier otro concepto que pueda conllevar la pérdida de homologación de la luminaria instalada.

Con el fin de tener los datos necesarios para conocer la evolución de la inversión realizada, así como su amortización, se han realizado mediciones de consumo previa a la instalación de los 116 tubos con tecnología led, de manera que de una forma continua se recogen los datos de consumo de forma semanal para ver la evolución que tiene los tubos instalados, y comprobar de manera directa la evolución del periodo de retorno de los equipos, comprobando asimismo, el estado de la instalación general de cableado y demás.

Tras realizar el seguimiento de los consumos, se constata que el retorno de inversión está próximo a los 3 años.

El consumo es significativamente inferior y las prestaciones lumínicas son adecuadas a la instalación, no suponiendo una diferencia apreciable en la iluminación de la infraestructura.

En la Fig 7.7 se muestra el cuadro de control, donde se aprecia la evolución del consumo y la amortización de la inversión realizada.

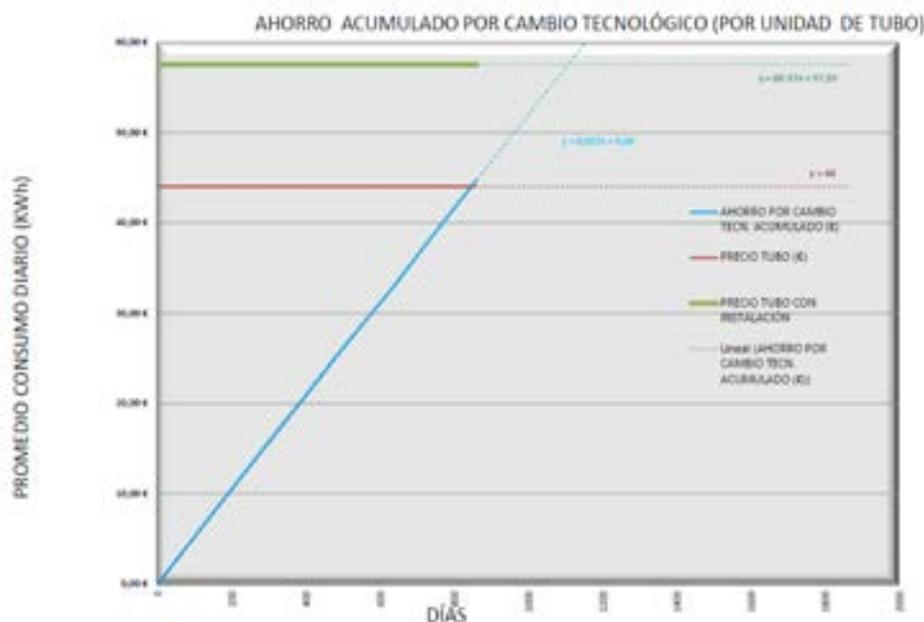


Figura 7.7. Ahorro acumulado por el cambio. Fuente: Madrid Calle 30.

* Sistemas de regulación y control y Telegestión

a) Alumbrado Exterior

En el año 2008 se realiza el estudio de una solución para mejorar el funcionamiento de los Centros de Mando que gestionan el alumbrado exterior, consistente en la colocación junto a los centros de mando un Regulador de Flujo, con el fin de estabilizar las corrientes gestionadas por los Centros de Mando, de manera que se optimice el consumo en los mismos.

Estos, funcionan controlando el voltaje a la salida del centro de mando, especialmente en los arranques, y posteriormente en la alimentación mantenida de las líneas, es decir, reduce el voltaje hasta el nivel mínimo que garantiza la suficiente potencia en el punto más desfavorable de la línea, es decir, el último punto instalado en la misma.

Asimismo esta regulación posibilita la detección de caídas de líneas así como de bombillas fundidas, gracias a que el equipo posee un puerto de comunicaciones.

Tras el análisis de los datos aportados por el equipo instalado, y analizando los consumos registrados antes y después de la instalación del equipo, se llegó a la conclusión de que su instalación de este equipo suponía un ahorro en el consumo eléctrico en la instalación asociada de un 24,96%.

Tras esta fase experimental, se debía decidir la conveniencia o no de extender esta solución al resto de Centros de Mando de Madrid Calle 30, desechando en principio la idea, debido a que en la mayoría de los casos supondría una elevada inversión en nuevas obras de instalación, y de nuevos equipos, debido a la antigüedad de las instalaciones, las cuales deberían ser renovadas íntegramente a medio plazo, por lo que la inversión en los nuevos reguladores de flujo, no estaría amortizada en un plazo prudencial.

b) Instalaciones de detectores de presencia en las galerías del By-pass

La galería del by-pass se divide en dos, calzada interior (NG) y calzada exterior (XG). El alumbrado está formado por luminarias *Phillips* modelo *Pacific*. En calzada interior, la disposición de las luminarias es transversal al tráfico, contando la instalación con aproximadamente 390 luminarias con una separación media de 10 m

entre luminarias una potencia unitaria de 2x58 W, sin considerar balasto, hace un total de 45,24 kW. En calzada exterior la disposición de las luminarias es longitudinal al tráfico, contando la instalación con aproximadamente 400 luminarias con una separación media de 10 m entre luminarias una potencia unitaria de 2x58 W hace un total de 46,4 kW, con lo cual, la potencia total instalada es de 91,64 kW, sin ningún sistema de control asociado.

La galería de emergencia del *By-pass* es una zona con necesidad de alumbrado ocasional, principalmente por paso de personal para tareas de mantenimiento y en menor medida por emergencia para Bomberos, Policía, Samur, etc. Por esta condición, se plantea la posibilidad de incorporar sistema de gestión o control del alumbrado.

Entre las propuestas de regulación, se entiende que la más adecuada se basa en la instalación estratégica de sensores de presencia. Esto confiere un carácter autónomo a la instalación y facilita su funcionamiento ante la presencia de personal no familiarizado con el túnel (Samur, Policía, etc.).

Se establecen las siguientes premisas para definir las características de la instalación piloto:

- Se debe buscar un sistema que mantenga un grado mínimo aceptable de iluminación en toda situación.
- Se deben ubicar los detectores en las zonas donde sean capaces de detectar el máximo número de movimientos del personal de en la galería. Se deben evitar las zonas de instalación susceptibles de quedar ocultas por vehículos parados.

En lo referente a la primera premisa, se plantean las alternativas descritas en la tabla 7.4.

Tabla 7.4. Propuestas. Fuente: Madrid Calle 30.

PROPUESTA	MODIFICACIÓN NECESARIA	VENTAJA	DESVENTAJA
Apagado de 2 fases	Tendido de cable de control entre detectores y cuadros de alumbrado	66% ahorro en reposo. Modificación sencilla	Alumbrado discontinuo en reposo. En caso de fallo de la fase permanente, no existe redundancia.

Tabla 7.4. Propuestas. Fuente: Madrid Calle 30. (Continuación).

PROPUESTA	MODIFICACIÓN NECESARIA	VENTAJA	DESVENTAJA
Apagado de 1 fase	Tendido de cable de control entre detectores y cuadros de alumbrado	33% ahorro en reposo Modificación sencilla	Alumbrado discontinuo en reposo. Poco ahorro
Balastro regulable	Tendido de cable de control entre detectores y sistema de control. Cambio de equipos	90% ahorro en reposo. Alumbrado homogéneo en reposo. Se mantienen redundancias	Mayor trabajo de instalación. Necesario pasarela de control

De las tres opciones planteadas, se entiende que la tercera opción es más ventajosa. Siempre que el sistema de control que gestione los balastros en función de las presencias detectadas no suponga un coste elevado o una complejidad técnica que haga el sistema menos fiable.

Estos balastros de doble nivel, varían el flujo luminoso desde el 10% al 100% de forma instantánea cuando se detecta movimiento y realiza una bajada progresiva tras un tiempo determinado hasta llegar de nuevo al 10% de iluminación.

Para poder cuantificar el ahorro se realiza prueba piloto en un tramo de galería, asociando el control de una decena de luminarias a un detector de presencia instalado en una dovela.

Se instala contador para control del consumo de dicho alumbrado y tras tomar las lecturas, se pudo comprobar que el ahorro de energía eléctrica que se conseguía llegaba hasta el 65,60%.

Como se ha comentado anteriormente, se considera deseable cierto grado de iluminación en las condiciones desfavorables. Con la regulación al 10% se realizan medidas aproximadas de la iluminación en los puntos más desfavorables, no bajando en ningún caso de 10 lux.

A modo de conclusión, y tras el análisis realizado, se entiende que, técnicamente, la instalación de sistemas autónomos de regulación de doble nivel pun-

to a punto asociados a detectores de presencia, ofrece un ahorro estimado del 65% de la energía actualmente consumida en las galerías principales, y lo realiza cubriendo las premisas en cuanto a seguridad, fiabilidad y mantenibilidad de la instalación.

La prueba, desde el punto de vista del consumo, puede considerarse, pero la solución no se extendió al resto de las galerías, por un lado por el riesgo de un posible fallo en la regulación o detección en un caso real de emergencia, y por otro, porque la mejora en la instalación implica elevados costes en los equipos de regulación y de supervisión. Esto hace que el retorno de inversión sea superior a los 4 años.

c) Nuevo sistema de gestión del alumbrado de refuerzo en la entrada a los túneles por el Nudo Sur

En la instalación original, la iluminación de refuerzo en las bocas de los túneles tiene una configuración de acuerdo con la curva CIE por escenarios escalonados en función del impacto lumínico exterior a la entrada. Esta configuración se hace a través de tres zonas de transición. La tecnología instalada limita la adaptación a la curva citada con una discretización de tres escalones. Desde el punto de vista de eficacia lumínica y de consumo eléctrico no es óptima, aunque era la solución técnico-económica que se podía utilizar en su momento.

Actualmente con la aparición en el mercado de balastos electrónicos programables, esta adaptación a la curva CIE se puede hacer con discretizaciones de hasta 16-18 escalones, lo que permite que el derroche o contaminación lumínica disminuya considerablemente, así como el consumo eléctrico. Gracias a esta adaptación, por el uso de elementos electrónicos, se reducen considerablemente las pérdidas frente a los antiguos balastos electromagnéticos.

Se ha elegido la entrada a los túneles situada en el Pk 13NL20, dado que es una configuración completa y permitiría poder extender, en una fase posterior, los resultados al resto de bocas de los túneles.

Estos equipos sustituyen a los inicialmente instalados de tipo electromagnético aportando, además del ahorro generado por la menor pérdida energética en el propio equipo, la posibilidad de una regulación punto a punto de las lámparas afectadas.

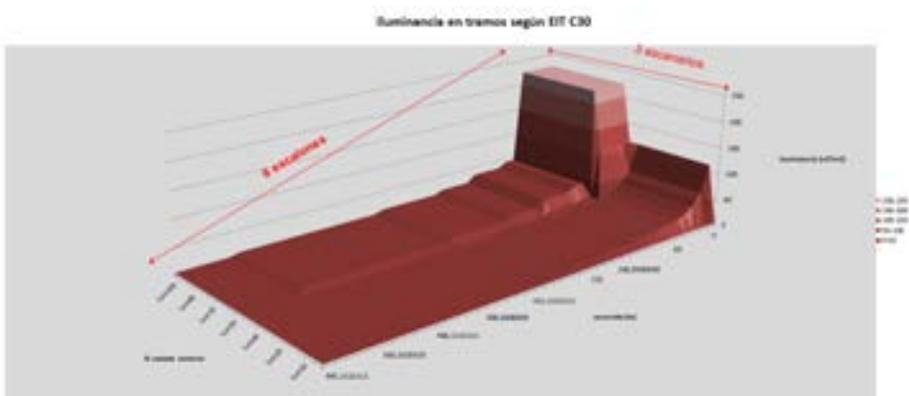
En definitiva los Objetivos que se plantearon con este proyecto fueron:

- Reducir al máximo los costes de energía eléctrica para la iluminación sin grandes inversiones en infraestructura original.
- Prolongar la vida útil de las lámparas.
- Ser más eficiente en el mantenimiento de las instalaciones de alumbrado.
- Permitir una adecuación suave de la iluminación del túnel respecto con la iluminancia exterior.
- Contribuir positivamente al medioambiente.
- Estabilizar la potencia de la instalación.
- Permitir una futura expansión del sistema al resto de túneles de Madrid Calle 30.

Se reemplazaron los balastos originales por un total de 370 equipos regulables en 16 niveles (protocolo MADLI) con una potencia total instalada de 146,8 kW.

La luminosidad exterior de referencia es tomada de manera continua por el luminancímetro ubicado en el acceso al túnel. Dicho valor es recogido en un cliente-servidor ubicado en el Centro de Control de Túneles de Madrid Calle 30 el cual dispone de un aplicativo que permite establecer los niveles de luminosidad exterior a los que se desea los diferentes porcentajes de intensidad luminosa.

En la Fig. 7.8 se representan las proximidades a la Curva CIE en la instalación objeto de estudio:



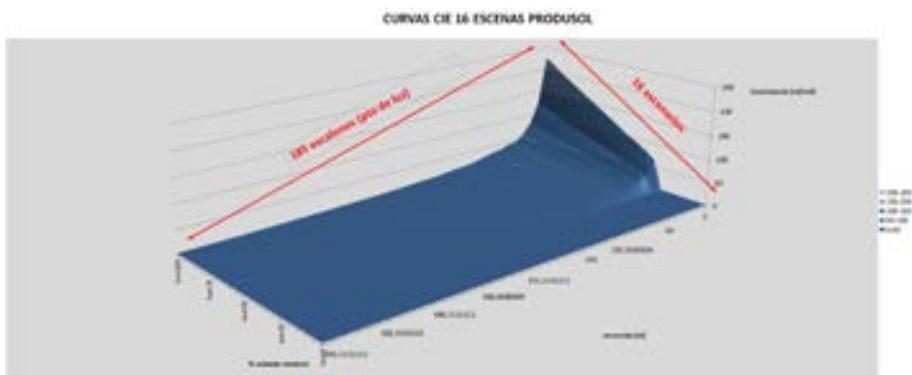


Figura 7.8. Aproximaciones a la curva CIE. Fuente: Madrid Calle 30.

De dichas gráficas se desprende que el ahorro teórico que se podría conseguir con esta nueva instalación llegaba a casi el 20%.

Si bien teóricamente el sistema presenta evidentes ahorros, por lo que se está estudiando la implantación del sistema, depurado y mejorado, en el resto de bocas de entrada de los túneles de Madrid Calle 30.

d) Iluminación de emergencia.

En este tipo de instalación no hay prueba alguna al respecto. Dado que necesita una elevada inversión inicial, y que por su poco uso (luminarias apagadas en condiciones regulares de la explotación) tiene un elevado plazo del retorno de inversión, se considera que plantear la tecnología led para este tipo de instalación de alumbrado sólo sería adecuado en la ejecución de una obra nueva.

En todos los casos se desarrolla una ficha-plantilla como la que se muestra, completando los campos como se indica en la Tabla 8.1.

Tabla 8.1. Ficha. Fuente: propia.

CLAVES	DESCRIPCIÓN
Título	Nombre del proyecto
Lugar	Topónimo u otro identificativo
T.M.(P)	Término Municipal (Provincia)
Fecha	Día/Mes/Año
Organización	Empresa u organismo responsable
Comentarios	Aclaraciones necesarias

En una descripción más detallada, atendiendo a los procesos que han llevado de un cuadro a otro, se dispone un desarrollo, para cada caso, de los siguientes puntos:

- Introducción.
- Características de la instalación. Cuadro de partida.
- Solución adoptada.
- Beneficios y resultados obtenidos.
- Cuadro de llegada. Conclusiones.

Se han desarrollado los siguientes casos reales y prácticos:

- Proyecto de mejora de la iluminación en el túnel del Altet. Elche.
- Mejora de la iluminación a la entrada del túnel de la M40. Madrid.
- Mejora de la iluminación del paso inferior de la Calle Gran Vía. Sabadell.

- Reforma lumínica en el túnel San Isidro-Praga de la M30. Madrid.
- Otros casos:
 - Mejora de la iluminación en el túnel del Bruc. Barcelona.
 - Línea 5 Metro Barcelona.

8.1. Caso 1: iluminación del túnel del Altet (Alicante)

8.1.1. Introducción

La iluminación general del túnel con lámparas de sodio, proporcionaba una luz baja según la nueva normativa y con un gasto energético alto, sin tener oportunidad a regular la intensidad dependiendo del tránsito de vehículos de forma opcional y con dificultades de mantenimiento para la reposición de lámparas cada dos años.

8.1.2. Características de la instalación

CLAVES	DESCRIPCIÓN
Título	ILUMINACIÓN DEL TÚNEL DEL ALTET
Lugar	Elche
T.M.(P)	Elche (Alicante)
Fecha	2011
Organización	Saludes. (Fuente: Saludes Lighting)
Comentarios	Caso de sustitución de VSAP por LED en iluminación del túnel y guiado

Situación inicial de la instalación:

- Iluminación de lámparas de sodio, degradación por los contaminantes, iluminación amarilla de poca reproducción cromática, consumo energético alto y dificultades de mantenimiento.

Datos técnicos:

- Luminarias con ip65 de 400 W y con un consumo total de 480 W por unidad.

Se muestran en este apartado los resultados de las mediciones efectuadas, con las siguientes aclaraciones:

- Las medidas efectuadas en el estado inicial, se realizaron midiendo la iluminancia en 9 puntos de la línea central de cada uno de los dos carriles y de la Vía de Servicio. En cada una de estas líneas centrales, las mediciones se realizaron bajo cada una de las dos luminarias y en el punto medio entre las mismas.
- Las medidas efectuadas en el estado reformado se llevaron a cabo utilizando una trama de medida de 10 valores en sentido transversal y 3 valores en sentido longitudinal, según marca la normativa.

Los valores luminotécnicos mínimos admisibles según la normativa vigente y para las características de este túnel son los siguientes:

- Luminancia Media $\geq 3,9$ cd/m².
- Uniformidad Global $\geq 0,4$.
- Uniformidad Longitudinal $\geq 0,6$.

Tabla 8.2. Mediciones de iluminancia.

Mediciones de Iluminancia en la Calzada				
Posición				
		X= 0,967m	X= 2,901m	X= 4,835m
Lado Derecho	Y= 8,930m	26,50 Lx	26,30 Lx	26,80 Lx
	Y= 7,990m	36,60 Lx	37,00 Lx	34,20 Lx
	Y= 7,050m	45,00 Lx	45,70 Lx	43,30 Lx
	Y= 6,110m	50,00 Lx	52,50 Lx	48,90 Lx
	Y= 5,170m	58,70 Lx	67,00 Lx	61,00 Lx
	Y= 4,230m	71,50 Lx	75,00 Lx	71,00 Lx
	Y= 3,290m	85,70 Lx	88,00 Lx	85,00 Lx
	Y= 2,350m	102,00 Lx	100,00 Lx	101,00 Lx
	Y= 1,410m	112,00 Lx	106,00 Lx	112,00 Lx
Lado Izquierdo	Y= 0,470m	100,60 Lx	108,50 Lx	110,00 Lx

Tabla 8.2. Mediciones de iluminancia. (Continuación).

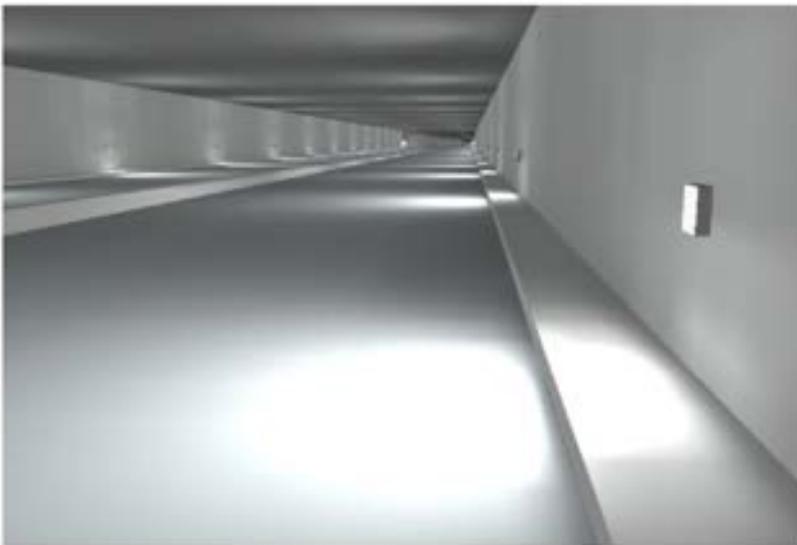
6,50 Lx	3,50 Lx	0,50 Lx	3,50 Lx	6,50 Lx
43,71 Lx	30,92 Lx	18,13 Lx	30,92 Lx	43,71 Lx
80,92 Lx	58,34 Lx	35,75 Lx	58,34 Lx	80,92 Lx
116,47 Lx	78,74 Lx	41,00 Lx	78,74 Lx	116,47 Lx
151,31 Lx	96,16 Lx	41,00 Lx	96,16 Lx	151,31 Lx

Una alternativa de cierta competencia que se propuso fue la iluminación con tecnologías de inducción. Se descartó, no por su durabilidad, sino por la degradación mayor que sufren las lámparas, menos eficiencia y por su mayor impacto ambiental.

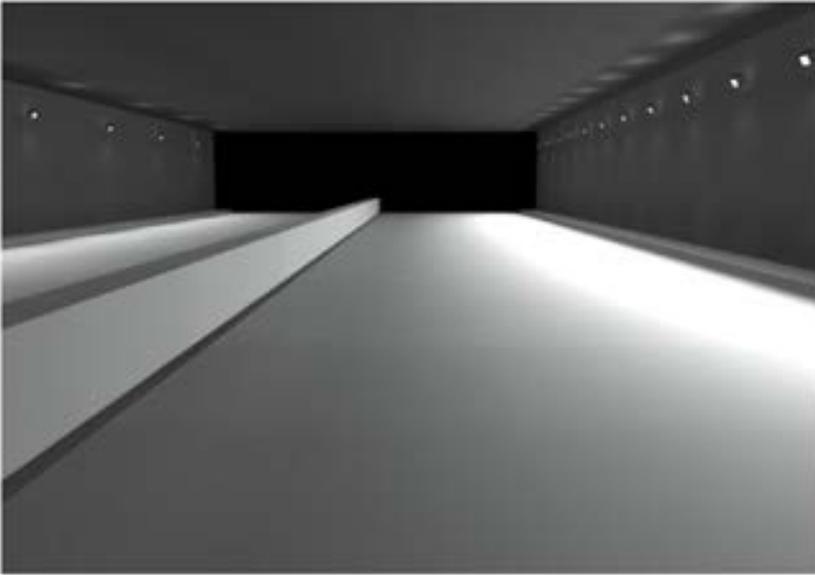
La otra propuesta barajada fue la sustitución de la totalidad del alumbrado interior por iluminación LED y en guiado, para mejorar la visualización de la curva: LED con emergencia autónoma posible.

En la figura 8.1 se muestran las simulaciones de la situación propuesta (*Ray Trace 3*) en la zona interior y exterior a dos distancias diferentes de la salida, todas en el sentido de la circulación.

Túnel de El Altet / Previsualización Ray-Trace 3



Escena exterior 1 / Vista Simulada



Escena exterior 1 / Vista Simulada

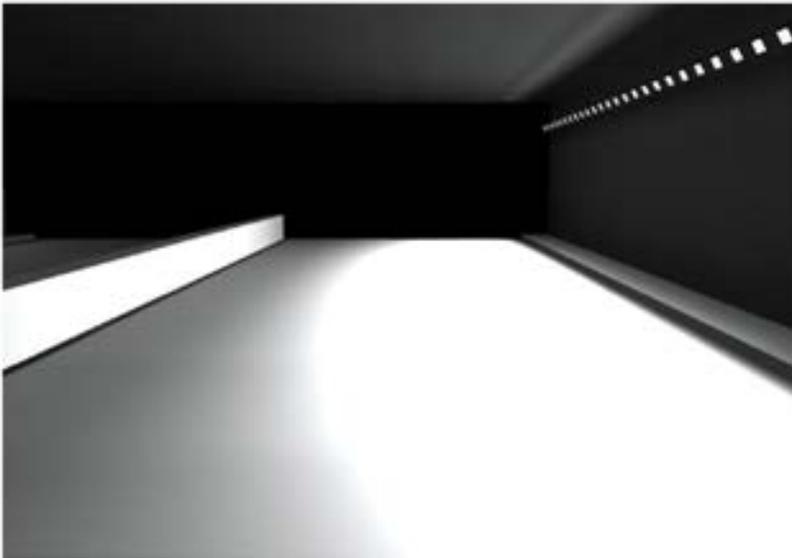


Figura 8.1. Simulación por ordenador.

La Fig. 8.2 muestra una fotografía de la situación real en el interior del túnel con aproximación a la zona de salida, en curva, donde se aprecia la penetración de la luz diurna en el túnel del Altet.



Figura 8.2. Interior del túnel.

8.1.3. Solución adoptada

La solución final adoptada fue la sustitución de la totalidad del alumbrado central por iluminación LED Modelo ARIADNA 150 W de *Saludes Lighting* y en guiado, para mejorar la visualización de la curva Modelo *TESEO LED* con emergencia autónoma posible.

La iluminación con tecnologías de inducción se estimó por su durabilidad, pero se descartó por la degradación mayor que sufren las lámparas, menos eficiencia y por su mayor impacto ambiental.

El producto es fundamental: la construcción de una luminaria estanca, con una disipación óptima (por el grado tan alto de contaminación), los LED *Nichia* de última generación, la fuente protegida y la óptica utilizada hacen del Modelo *Ariadna*, una luminaria eficaz y de futuro, un seguro para una instalación de altos requerimientos y siempre con garantías por encima de los 5 años.

En la fotografía de la izquierda en la Fig. 8.3 se aprecia una luminaria LED de las que se emplearon en 2011 en el proyecto de rehabilitación y mejora del túnel del Altet. Junto a esta imagen de detalle se ha dispuesto una general de la zona interior del túnel (en curva) en la que se aprecian tanto el efecto de la iluminación permanente como el del guiado visual.



Figura 8.3. Solución adoptada.

8.1.4. Luminarias seleccionadas

* LED Modelo ARIADNA 150 W

Este tipo de foco LED está especialmente diseñado para su operación en túneles, industrias, almacenes, peajes y estaciones de servicio. Reúne cualidades de alto rango para la operación en vías enterradas con altas prestaciones tanto en iluminación lateral como cenital. Su distribución luminosa tipo se recoge en la Fig. 8.4.

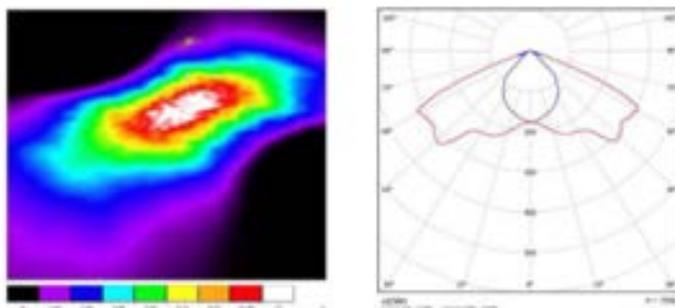


Figura 8.4. Distribución luminosa.

Se comercializa en seis modelos de potencia en una horquilla que abarca desde los 65 W hasta los 150 W de potencia nominal, con consumos de 67 Wh a 144 Wh, en sus modelos extremos. Sus pesos en servicio van de los casi 8 kg hasta más de 12 kg. Según su fabricante, el producto responde a la Fig. 8.5 adjunta.

Código	MOD00162-03	MOD00130-03	MOD00131-03	MOD00132-03	MOD00138-03	MOD00133-03
Potencia nominal	65W	75W	100W	110W	125W	150W
Rango de tensión	85 - 264 VAC					
Rango de frecuencia	47 - 63 Hz					
Fabricante LED	Luxeon Rebel / CREE					
Rendimiento luminoso, nominal	Hasta 100 Lm/W					
Cantidad de LEDs	48	54	72	84	96	108
Consumo energético	67Wh	74Wh	98Wh	113Wh	127Wh	144Wh
Flujo Luminoso Típico	>3250Lm	>4550Lm	>6068Lm	>6254Lm	>7500Lm	>10000Lm
Distribución luminosa	Tipo II					
U_{max}	(altura 8m) $\geq 23,40\text{Lx}$	(altura 5m) $\geq 26\text{Lx}$	(altura 8m) $\geq 12\text{Lx}$	(altura 8m) $\geq 13\text{Lx}$	(altura 8m) $\geq 51,44\text{Lx}$	(altura 8m) $\geq 20\text{Lx}$
U_{min}	(altura 8m) $\geq 23,40\text{Lx}$	(altura 8m) $\geq 18\text{Lx}$	(altura 10m) $\geq 8,48\text{Lx}$	(altura 10m) $\geq 9,08\text{Lx}$	(altura 8m) $\geq 28,94\text{Lx}$	(altura 10m) $\geq 13\text{Lx}$
U_{c}	(Ø7'10m) (altura 8m) $\geq 9,52\text{Lx}$	(Ø7'20m) (altura 7m) $\geq 3,62\text{Lx}$	(Ø7'20m) (altura 8m) $\geq 4,51\text{Lx}$	(Ø7'20m) (altura 8m) $\geq 4,70\text{Lx}$	(Ø7'20m) (altura 8m) $\geq 7,09\text{Lx}$	(Ø7'20m) (altura 8m) $\geq 6,78\text{Lx}$
U_{a}	(altura 5,5m) $\geq 0,40$	(altura 5,5m) $\geq 0,50$				
U_{b}	(altura 5,5m) $\geq 0,60$	(altura 5,5m) $\geq 0,60$	(altura 5,5m) $\geq 0,60$	(altura 5,5m) $\geq 0,60$	(altura 5,5m) $\geq 0,60$	(altura 5,5m) $\geq 0,60$
Temperatura color	4700 °K ó 6000 °K					
CRI	$R_a > 70$					
Factor de potencia y distorsión armónica total	$PF > 0,9$ - THD < 20%					
Temperatura de operación	-30°C a +50°C					
Humedad de operación	10% - 90%					
Temperatura de almacenamiento	-40°C a +80°C					
Tiempo de vida	L80: $\geq 50.000\text{h}$ - B50: $\geq 100.000\text{h}$					
Materiales	Aluminio / vidrio de seguridad					
Dimensiones en mm (L x A x P)	366x294,6x207	366x294,6x207	483x277x210	483x277x210	483x277x210	483x277x210
Peso	7,7±0,2 kg	8±0,2 kg	10±0,2 kg	10±0,2 kg	11±0,2 kg	12±0,2 kg
Grado de protección ambiental	Óptica: IP66 - Fuente alimentación: IP65					
Tipo de protección eléctrica	Clase I					

Figura 8.5. Ficha técnica de lámparas.

* LED Modelo TESEO

Este modelo se comercializa en dos potencias (36 y 60 W), con consumos energéticos de 40 Wh y 68 Wh respectivamente. Se trata de LED tecnología *Nichia* que son capaces de servir por encima de los 2.650 y 4.500 lúmenes. La distribución luminosa típica es la que se recoge en la Fig. 8.6, donde se aprecia claramente su carácter direccional.

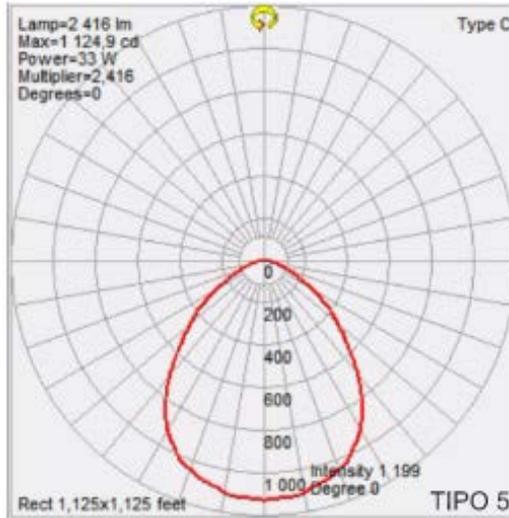


Figura 8.6. Distribución luminosa.

Según su fabricante la luminaria, que pesa seis kilogramos, responde a la ficha técnica que aparece en la Fig. 8.7 y está específicamente recomendada para: aparcamientos y garajes, estaciones de peaje, de autobús, centros comerciales, estaciones de servicio, aeropuertos y otros servicios y zonas comunes.

Las mejoras directas que se han descrito son:

- Mayor Luminancia media → 4,83 cd/m² frente a 4,08 cd/m².
- Mayor Luminancia mínima → 1,84 cd/m² frente a 1,27 cd/m².
- Mejor Uniformidad Global → 0,4 frente a 0,3.
- Mejor Uniformidad Longitudinal → 0,9 frente a 0,2.

Códigos	MOD00140-00	MOD00141-00
Potencia nominal	36W	60W
Rango de tensión	100VAC - 240VAC	
Rango de Frecuencia	47 - 63Hz	
Rendimiento luminoso, nominal	Del LED: ≥ 100Lm/W - De la luminaria: ≥ 66 Lm/W	
Cantidad de LEDs	36	60
Tipo de LED	Nichia, testados según IESNA LM-80	
Consumo energético	420Wh	680Wh
Flujo luminoso típico	~2.600Lm	~4.500Lm
Distribución luminosa	IESNA Tipo 5	
Temperatura color	5.500°K	
CRI	Ra > 70	
Factor de potencia	PF > 0,90	
Distorsión armónica total	THD < 20%	
Temperatura operación	-20°C a + 50°C	
Temperatura almacenamiento	-40°C a + 65°C	
Humedad de operación	10% a 90% (RH)	
Tiempo de vida	L80: 1 50.000h - B10: 1 100.000h	
Materiales	Cuerpo aluminio inyectado / Ópticas LEDs Policarbonato	
Dimensiones en mm (L x A x P)	416x116x142	
Peso	6Kg	
Grado de protección ambiental	Óptica: IP67 / Fuente alimentación: IP65	
Tipo de protección eléctrica	Clase II	

Figura 8.7. Ficha técnica.

8.1.5. Beneficios y resultados obtenidos

Los resultados obtenidos se exponen en la Tabla 8.3, en la que se han categorizado lumínicamente cada uno de los tramos derivados de la zonificación de la infraestructura.

Tabla 8.3. Luminancia en cada zona de simulación y tramo de túnel.

Tabla de luminancias en cada Zona de Simulación, y cada tramo del Túnel (*)									
Zona de Simulación	Zona 1	Zona 2	Zona 3	Zona 4-1	Zona 4-2	Zona 5-1	Zona 5-2	Zona 6-1	Zona 6-2
Tramo del Túnel (N-S)	0m a 28m	28m a 56m	56m a 124m	124 a 206m	206m a 243m	243m a 325m	325m a 393m	393m a 448m	448m a 485m
Entrada Norte	Umbral 1	Umbral 2	Transición, 1x a 4x	Transición, 5x a 9x	Transición, 10 a 11x	Transición, 12x a 16x	Transición, 17x a 20x	Salida 1	Salida 2
Longitud	28m	28m	68m	82m	37m	82m	68m	28m	28m
Luminancia	87,5 Cd/m ²	35 Cd/m ²	39,2 Cd/m ²	5,6 Cd/m ²	5,6 Cd/m ²	3 Cd/m ²	3 Cd/m ²	35 Cd/m ²	35 Cd/m ²
Entrada Sur	Salida 2	Salida 1	Transición, 17x a 20x	Transición, 12x a 16x	Transición, 10x a 11x	Transición, 5x a 9x	Transición, 1x a 4x	Umbral 2	Umbral 1
Longitud	28m	28m	68m	82	37m	82m	68m	28m	28m
Luminancia	15 Cd/m ²	15 Cd/m ²	3 Cd/m ²	3 Cd/m ²	5,6 Cd/m ²	5,6 Cd/m ²	19,2 Cd/m ²	35 Cd/m ²	87,5 Cd/m ²
Tramo del Túnel (S-N)	365m a 448m	393m a 393m	325m a 393m	243m 325m	206m a 243m	124 a 206m	56m a 124m	28m a 56m	0m a 28m
Zona de Simulación	Zona 1	Zona 2	Zona 3	Zona 4-1	Zona 4-2	Zona 5-1	Zona 5-2	Zona 6-1	Zona 6-2

(*) Señalar que las zonas de simulación 4 y 5 engloban tramos del Túnel con diferentes luminancias en el ámbito Sur Norte del túnel

La Tabla 8.4 permite la comparación entre los datos luminotécnicos de partida y los recogidos después de la ejecución de las mejoras.

Tabla 8.4. Luminancia.

LUMINANCIA - Resultados Luminotécnicos en Estado Inicial y de Reforma		
	Estado Inicial	Estado Reformado
Luminancia Media (L_m)	4,08 Cd/m ²	4,83 Cd/m ²
Luminancia Mínima (L_{min})	1,27 Cd/m ²	1,84 Cd/m ²
Luminancia Máxima (L_{max})	8,15 Cd/m ²	7,84 Cd/m ²
Uniformidad Global ($U_m = L_{min}/L_m$)	0,3	0,4
Uniformidad Longitudinal ($U_l = LC_{min}/LC_{max}$)	0,2	0,9
Uniformidad General ($U_g = L_{min}/L_{max}$)	0,2	0,2

8.1.6. Impacto energético

Los ahorros energéticos alcanzados por aplicación de la alternativa LED se han recogido en la Tabla 8.5.

Tabla 8.5. Características generales del proyecto.

Características generales del proyecto		
Nombre del proyecto	Túnel del Altet, Alicante, Ministerio de Fomento	
Tipo de luminarias a comparar	Vial Túnel (pendiente 24 H)	
Tipo de proyecto a realizar	Proyecto de sustitución luminarias actuales	
Horizonte de análisis	8 Años	
Luminarias comparadas	Luminarias LED Traffic Futura	Luminarias convencionales
Consumo energético medio	148 W	400 W
% consumo en modo de control de brillo (ajustable en horas nocturnas)	80%	30%
% de las horas nocturnas en que se aplica el control de brillo	0%	100%
Consumo extra por el balastro (aplicable solo a luminarias convencionales)	0%	30%
Periodo exposición luminaria (vial operativa media asomada)	10 Años	15 Años
Periodo exposición luminaria en luminarias convencionales (vial operativa)	0 Años	2 Años
Luminarias contempladas en el proyecto (para comparativa consumo)	180 Unids.	180 Unids.
Luminarias a comparar inicialmente en el proyecto (para comparativa inversión)	180 Unids.	0 Unids.
Coefficiente apertura por fallo anticipado productos electrónicos	0,50%	0,00%
inflación anual estimada (solo aplicable a coste consumo energético)	3,50%	0,00%
Coste unitario medio compra luminaria	850,00 €	365,00 €
Coste unitario compra lámpara	0,00 €	18,00 €
Coste unitario instalación luminaria	38,00 €	0,00 €
Coste unitario instalación lámpara	0,00 €	27,00 €
Coste kWh diurno	0,13890 €/kWh	
Coste kWh nocturno	0,13890 €/kWh	

El ahorro energético se valora en comparación con la situación de partida en la que el túnel del Altet contaba con tecnología VSAP en todo su desarrollo. El resultado es la Tabla 8.6.

Tabla 8.6. Ahorro energético.

Ahorro energético del proyecto de instalación de luminarias LED						
Año	Luminaria LED FuturaECOLum Ariadna 150 W		Vapor de sodio alta presión		Ahorro consumo energético acumulado luminaria LED sobre luminaria convencional	
	Consumo anual	Consumo acumulado	Consumo anual	Consumo acumulado	MW	%
1	148 MWh	148 MWh	492 MWh	492 MWh	344 MWh	70,00%
2	148 MWh	295 MWh	492 MWh	984 MWh	689 MWh	70,00%
3	148 MWh	443 MWh	492 MWh	1.476 MWh	1.033 MWh	70,00%
4	148 MWh	590 MWh	492 MWh	1.968 MWh	1.377 MWh	70,00%
5	148 MWh	738 MWh	492 MWh	2.460 MWh	1.722 MWh	70,00%
6	148 MWh	886 MWh	492 MWh	2.952 MWh	2.066 MWh	70,00%
7	148 MWh	1.033 MWh	492 MWh	3.444 MWh	2.411 MWh	70,00%
8	148 MWh	1.181 MWh	492 MWh	3.936 MWh	2.755 MWh	70,00%

Se recurre a un gráfico evolutivo del ahorro energético para el proyecto en los próximos años. En la Fig. 8.8 se aprecia de qué manera afecta la longevidad del proyecto al ahorro energético del mismo y, con ello, a su rentabilidad económica.



Figura 8.8. Ficha técnica.

8.1.7. Impacto económico

En términos económicos los ahorros derivados de la instalación de luminarias LED tanto para la iluminación general como para el guiado se exponen en la Tabla 8.7 que mide el retorno de la inversión.

Tabla 8.7. Retorno de la inversión.

Retorno de la inversión del proyecto de instalación de luminarias LED								
Año	Luminarias LED Traffic Future			Luminarias convencionales			Ahorro acumulado costes luminaria LED sobre luminaria convencional	
	Coste consumo	Coste compra	180W coste	Coste consumo	Coste compra	180W coste	Euros	%
1	20.500 €	164.257 €	184.757 €	68.333 €	8.300 €	76.633 €	-126.534 €	-142%
2	41.738 €	165.074 €	206.792 €	139.070 €	8.300 €	147.370 €	-55.833 €	-42%
3	62.678 €	165.892 €	228.569 €	212.258 €	16.200 €	228.458 €	-1.133 €	2%
4	86.406 €	166.708 €	253.115 €	288.072 €	16.200 €	304.272 €	51.206 €	17%
5	109.812 €	167.526 €	277.437 €	366.436 €	24.300 €	390.736 €	113.299 €	29%
6	134.779 €	168.343 €	302.422 €	447.595 €	24.300 €	471.895 €	169.473 €	36%
7	159.479 €	169.160 €	328.639 €	531.588 €	32.400 €	563.988 €	235.353 €	42%
8	185.565 €	169.978 €	355.543 €	618.533 €	32.400 €	650.933 €	295.390 €	49%

Se elabora un gráfico de evolución de costes para el proyecto comparando la alternativa de luminarias convencionales con la adoptada, basada en tecnologías LED, (Fig. 8.9.).



Figura 8.9. Comparativa de costes.

8.1.8. Conclusiones

Los resultados lumínicos obtenidos en la zona del túnel iluminada con luminarias de LED mejoran sustancialmente a los previos con luminarias de Sodio de Alta Presión, cumpliendo la zona del túnel modificada con la normativa vigente.

Se puede apreciar claramente como todos los valores de iluminancia obtenidos con las luminarias LED de 150 W son superiores a los obtenidos con las luminarias de Sodio de Alta Presión de 400 W.

Con la instalación de las luminarias LED se ha mejorado notablemente la iluminación del tramo central del túnel, tanto en su valor medio como en la uniformidad de la iluminación.

De los resultados obtenidos para las luminarias LED se desprende que estas están algo desviadas de la inclinación ideal en este caso, que son 40° con respecto a la Vertical en lugar de los 30° actuales. Con la inclinación de 40° se mejorarían todavía más los resultados lumínicos de las luminarias LED.

La iluminación de túneles con luminarias LED es posible y rentable económicamente, eso sí, siempre que se lleve a cabo con las luminarias adecuadas y tras un cálculo lumínico riguroso y de acuerdo con las condiciones particulares de cada túnel.

La utilización en túneles de las luminarias LED modelo *Ariadna de SALUDES LIGHTING* permite satisfacer los requisitos lumínicos de éstos, reducir su consumo energético y reducir los costes de mantenimiento originados por la sustitución de lámparas de Sodio cada cierto tiempo.

La Fig. 8.10 muestra una comparativa de estados antes y después de la rehabilitación lumínica del túnel del Altet.



Figura 8.10. Estado anterior y actual.

8.1.9. Agradecimientos

Al Ministerio de Fomento y a la Dirección General de Carreteras por seguir apostando por *Saludes Lighting* para la implantación de iluminación LED específica, balizamiento, emergencia para túneles y viales.

8.2. Caso 2: iluminación entrada al túnel de la M40

CLAVES	DESCRIPCIÓN
Título	Iluminación LED en la entrada del túnel de la M-40
Lugar	Madrid
T.M.(P)	Madrid (Comunidad de Madrid)
Fecha	Octubre 2014
Organización	SACOPA S.A.U - IGNIALIGHT y RUMPAL (Fuente: IGNIALIGHT)
Comentarios	Sustitución VASP por LED

8.2.1. Introducción

La instalación se encuentra en una de los principales anillos viarios de salida de la capital, la M40 en Madrid. El principal reto para el equipo técnico era cumplir con los exigentes requerimientos lumínicos asociados al alumbrado de entrada en los túneles.

El objetivo principal de la iluminación de túneles es de dar seguridad y visibilidad en los usuarios de la vía, especialmente durante el día, cuando el contraste entre el nivel de luz interior y exterior del túnel es mayor. La propia iluminación de los vehículos no es suficiente para evitar el efecto de entrada en un agujero negro y es necesario el empleo de un alumbrado artificial de nivel lumínico muy alto para suavizar el paso entre iluminación exterior e interior. La lenta capacidad de adaptación del ojo humano a los cambios de luz requiere de un tipo de iluminación distinta en función si se trata de la zona de acceso (umbral), zona de transición o tramo interior del túnel. El nivel de iluminación debe ser mayor cuando más cerca nos encontramos de la entrada del túnel.

8.2.2. Características de la instalación

Instalación inaugurada a principios de los años 90, con una iluminación realizada con proyectores de Vapor de Sodio de Alta Presión. El tramo que nos ocupa es

una entrada del túnel de un solo sentido de circulación con 4 carriles. La entrada del túnel está iluminada con proyectores de VSAP tanto para el alumbrado permanente como para el alumbrado de refuerzo.

En la Fig. 8.11 se expone la situación previa a la actuación: luminarias VSAP en toda la longitud del túnel.

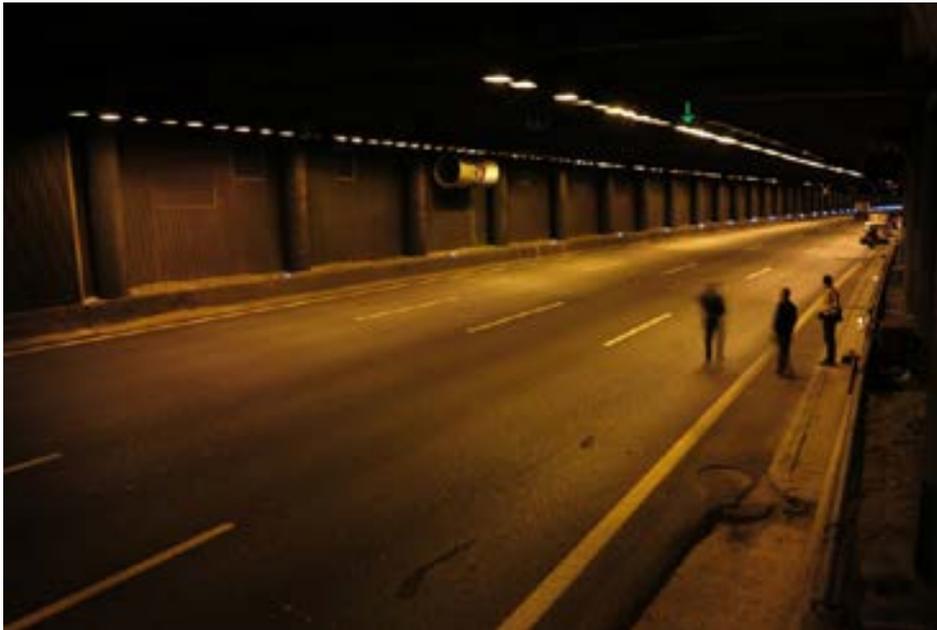


Figura 8.11. Iluminación VSAP.

La propuesta presentada por *Ignialight* para la actualización del alumbrado de la zona de entrada del túnel es realizar un cambio de luminarias de tecnología VSAP a tecnología LED con las luminarias XLED y TLED. Proyectores desarrollados para cubrir unas necesidades de iluminación muy exigentes, por su elevado flujo lumínico, su alta eficiencia y un óptimo nivel de protección IP65.

Las luminarias XLED se comercializan en tres potencias (35-50-70 W), con un peso de 7 kg y con una vida útil que puede alcanzar las 50.000 horas en buenas condiciones de servicio y mantenimiento. En la Fig. 8.12 aparece una imagen de un proyector acompañada de su ficha técnica.



Figura 8.12. Luminaria XLED.

Las luminarias TLED trabajan a potencias mucho más altas, comercializándose en tres modelos de 110-185 y 300 W respectivamente. Su peso es de 15 kilogramos y puede montarse hasta una altura de 16 metros. Se muestra (Fig. 8.13) una imagen de un proyector y la ficha técnica del producto.



Figura 8.13. Luminaria TLED.

8.2.3. Solución adoptada

Para la selección de la solución correcta se procede a la realización de una simulación lumínica mediante software de simulación para comprobar los niveles lumínicos que se van a conseguir en la instalación real del producto. *Ignialight* trabaja con varios Software de simulación, como *Dialux* o *Litestar Tunnel Plus*, con el cual se puede asegurar el resultado lumínico, así como el cumplimiento de los niveles que marca la norma.

La propuesta presentada por *Ignialight* consta de proyectores XLED y TLED. Ambos productos diseñados para cumplir con las rigurosas especificaciones asociadas al alumbrado de túneles y poder competir con luminarias de VSAP de hasta 400W, mediante tecnología LED.

Para el *alumbrado permanente* se requería entre un 3,8 y 4 cd/m². Para conseguir este nivel se propone la instalación del proyector X-LED de 75 W instalado cada 8 metros. Esto implica la eliminación de 1 de cada 2 proyectores actuales VSAP 70 W, que hasta la fecha estaban instalados cada 4 m.

Esto se consigue gracias a la mejora en eficiencia lumínica de las luminarias y al patrón fotométrico que permite aumentar la apertura del haz de luz para conseguir un buen nivel de uniformidad con la mitad de proyectores.

Para el alumbrado diurno: el requerimiento de alumbrado permanente es de 210 cd/m². El proyector propuesto para la sustitución es el proyector TLED de 300 W. Obsérvese que debido a la cantidad y calidad del tráfico, así como a la velocidad de diseño de la autovía a su paso por el túnel estudiado, la instalación es muy exigente desde el punto de vista de su luminancia media, tanto como de sus uniformidades.

La instalación de las luminarias se realizó durante el mes de octubre. El plazo de ejecución del cambio de luminarias de tecnología VSAP a tecnología LED se realizó en apenas un par de semanas. El diseño mecánico de las luminarias TLED permite una fácil instalación así como modificar la orientación de las mismas de la forma sencilla y rápida.

En la Fig. 8.14 se exponen dos fotografías del estado del túnel después de la ejecución de las mejoras en iluminación.



Figura 8.14. Túnel después de la ejecución de las mejoras.

8.2.4. Beneficios y resultados obtenidos

El nuevo sistema de iluminación LED en la entrada del túnel ha supuesto una reducción de consumo de energía y de luminarias. Un incremento de confort para los usuarios del túnel por la luz blanca del LED, 4.000 K, además de la posibilidad

de regulación dinámica de cada uno de los proyectores en función del nivel de luz ambiental del exterior del túnel.

La luz blanca genera una iluminación clara y uniforme consiguiendo una buena dispersión de la luz sin deslumbramiento. La luz de los proyectores XLED y TLED proporciona una luz sin reflejos ni parpadeos aportando así una mejora de la visibilidad para los usuarios.

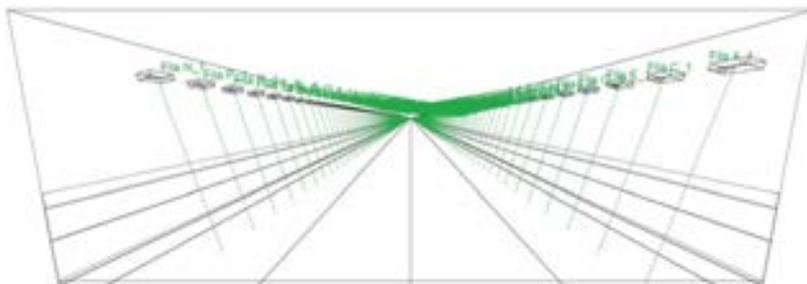
La mejora en términos de Índice de Reproducción Cromática (IRC) de la iluminación LED comparando con tecnología VSAP, permite una mejor percepción visual en el interior del túnel.

La vida útil de las luminarias es de L80-50.000 h. *Iginialight* ofrece una garantía de 5 años en toda su gama de luminarias para aplicaciones de túnel, alumbrado público y alumbrado industrial.

* Ahorros energéticos alcanzados

La tecnología LED aporta importantes ahorros económicos, en cuanto a mantenimiento y reposicionamiento de las luminarias, un punto muy destacable en una instalación de túnel de carretera. Otra mejora importante para esta instalación es la reducción del número de luminarias de alumbrado permanente a la mitad, conseguido gracias a la fotometría de las luminarias XLED que permite obtener un nivel de uniformidad e iluminación suficientes con la mitad de las luminarias hasta el momento instaladas.

La simulación previa a la ejecución de las mejoras, contando con la distribución concreta de luminarias en el túnel de la M40 produjo las imágenes que se aprecian en la Fig. 8.15.



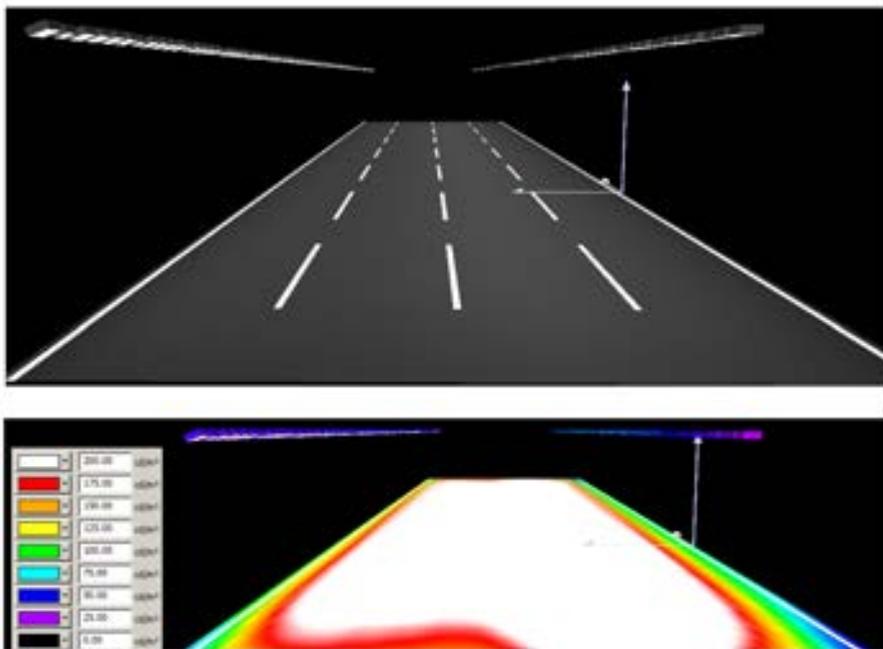


Figura 8.15. Simulación informática.

8.2.5. Conclusiones

Los resultados obtenidos han confirmado que la tecnología LED de *Ignialight* permite cumplir los exigentes requerimientos lumínicos que van asociados al alumbrado de las entradas de los túneles.

La decisión de mejorar la iluminación ha aportado altos niveles de eficiencia energética en el túnel además de un importante incremento de confort para los usuarios del túnel por la luz blanca del LED, 4.000 K.

8.2.6. Agradecimientos

A Ferrovial, concesionaria del mantenimiento del tramo de túnel, por todo la colaboración por la instalación de los proyectores y a LCA por el soporte técnico.

8.3. Caso 3: Paso inferior en calle Gran Vía. Sabadell

CLAVES	DESCRIPCIÓN
Título	Paso inferior en calle Gran Vía
Lugar	C/ Gran Vía
T.M.(P)	Sabadell (Barcelona)
Fecha	2013
Organización	SCHREDER-SOCELEC (Fuente: Schreder Socelec)
Comentarios	Sustitución de VSAP por LED

8.3.1. Introducción

La ciudad de Sabadell, en las afueras de Barcelona, siempre ha seguido el crecimiento económico y el progreso social con la innovación. Con su estrategia "Sabadell, *Smart City*", las autoridades locales tienen como objetivo transformar la gestión urbana y ser ambientalmente y económicamente ejemplar mediante el aprovechamiento de los avances tecnológicos innovadores. La ciudad fue finalista en el 2013 del Premio *Smart City* con sus iniciativas con visión de futuro.

Como parte de esta estrategia, la ciudad de Sabadell eligió *Schröder* para sustituir más de 7.500 luminarias con lámparas LED, que actualmente representan el 29% de la estructura general del alumbrado público. Las luminarias LED están equipadas con sistemas de control para mejorar la calidad de la iluminación en el espacio público, mientras que reduce los costos energéticos, de mantenimiento y la reducción de CO₂ de emisiones.

La ciudad abrió un nuevo camino utilizando una ESE (*Energy Services Company*) para financiar la iluminación, el equipo técnico del ayuntamiento y luego probó una serie de luminarias en un laboratorio independiente para asegurar que el nuevo esquema de iluminación proporcionaría los niveles de luz adecuados con un alto rendimiento en términos de ahorro de energía, tiempo de vida, la fiabilidad y el rendimiento fotométrico. El consejo fue particularmente atento a las luminarias que también eliminarían la alta iluminación, por lo que también la reducción de la contaminación lumínica de la ciudad. Las luminarias de *Schröder* han cumplido ampliamente con todos los requisitos técnicos de

LED, que proporciona los mejores resultados fotométricos con el mínimo consumo de energía.

La instalación led del paso inferior en la calle Gran Vía es parte del proyecto de sustitución de luminarias para la mejora de la eficiencia energética del municipio.

8.3.2. Características de la instalación

La instalación contaba con puntos de luz con exceso de potencia y tecnología de fuente luminosa obsoleta. Cuadros Eléctricos, cableado y puntos de luz antiguos y se hacía necesario un cambio para mejorar la calidad del alumbrado, proporcionando niveles acordes al REEAE, conseguir Ahorros Energéticos. Y adecuar instalaciones a REBT.

El paso inferior estaba iluminado por 80 proyectores con lámpara de 150 W de Vapor de Sodio Alta Presión con un consumo total de 13,68 W.

Se comprobó que habían sufrido una depreciación de la emisión luminosa de la luminaria debido a depósitos de suciedad y envejecimiento de los materiales y componentes. Esta acumulación de suciedad y demás factores da como resultado un cambio en la distribución fotométrica que emana de la luminaria y una pérdida en emisión luminosa sobre la calzada.

8.3.3. Solución adoptada

La solución adoptada consistió en la sustitución de los 80 aparatos existentes por 80 proyectores *NEOS-2* de *SOCELEC-SCHREDER* con 48 LED a 500 mA y un consumo de 78 W por aparato.

Los criterios de iluminación fundamentales de este proyecto que tenían que cumplirse era marcar un objetivo de reducción del consumo energético (y por lo tanto de ahorro en la factura eléctrica), mejora del confort visual y nivel de iluminación.

Al llevarse a cabo una sustitución aparato por aparato hubo que respetar las alturas e inter-distancias de la instalación existente y ajustar los niveles de iluminación a los niveles estimados para alumbrado diurno, 15 cd/m², y nocturno, 5 cd/m².

8.3.4. Luminarias empleadas

El aparato Neos 2 LED, es un proyector diseñado para aplicaciones de alumbrado funcional, consiguiendo la fotometría óptima gracias a un exclusivo sistema de lentes.

La armadura está formada por dos piezas, el cuerpo y el marco, de aleación de aluminio inyectado a presión. Ambas partes cierran una sobre otra mediante un sistema de dos charnelas situadas en la parte posterior del proyector, asegurando la perfecta hermeticidad (IP 66) con un cierre rápido de aleación de aluminio del mismo tipo que la armadura que está situado en la parte frontal y que permite la apertura del aparato sin utilizar herramientas.

Dentro de la armadura se encuentran situados tanto el bloque óptico (equipado con hasta 48 LED) como los auxiliares electrónicos. El acceso a tales elementos se realiza pues, abriendo las dos piezas y haciéndolas girar para presentarlas una al lado de la otra.

El sistema de orientación y fijación se compone de una rueda de fundición de aluminio la cual encaja sobre el cuerpo y nos permite regular la inclinación del aparato ayudados por las marcas guía de la rueda.

En la Fig. 8.16 se expone la ficha de la luminaria y una fotografía representativa.

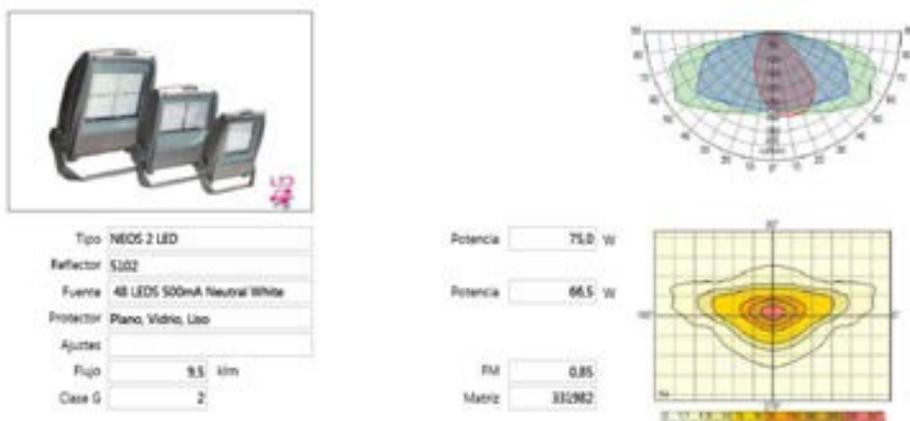


Figura 8.16. Esquemas lumínicos.

* Cuerpo de la luminaria

Es la parte superior del proyector. Está diseñado en aleación de aluminio tipo L-2521 según Norma UNE 38.203 y está protegido con una capa de pintura en polvo de poliéster de espesor mínimo 60 micras.

En el cuerpo se fija la pieza porta-auxiliares que a su vez es el soporte del bloque óptico, quedando accesibles una vez abierto el proyector. Esta placa es de aluminio de 2.5 mm de espesor.

Situado perimetralmente al cuerpo se encuentran las canaladuras de fijación de la junta de cierre que encaja perfectamente sobre el marco, asegurando una hermeticidad del proyector IP 66.¹

En la zona de charnelas hay previsto un tope para impedir el giro descontrolado de los ejes.

* Marco

Del mismo material que el cuerpo del proyector, también está protegido con una capa de pintura en polvo de poliéster de espesor mínimo 60 micras.

En el marco se fija el cierre de vidrio, sellado mediante silicona y asegurado con grapas de fijación de acero laminado pre-galvanizado².

* Bloque óptico y auxiliares electrónicos

El bloque óptico está formado por 32-48 LED (*NEOS 2 LED*) o 64LED (*NEOS 3*) de alto flujo luminoso, equipados con un sistema de lentes desarrollado para esta aplicación.

El proyector está equipado con un driver de elevado rendimiento, programable que permite ajustar la corriente a las necesidades de cada aplicación, y que admite diferentes posibilidades de regulación. Adicionalmente, dispone de un sistema de protección contra sobretensiones de hasta 10 kV.

¹ Según Norma UNE 60.598.

² Según Norma UNE 36.130.

* Cierre y juntas de estanqueidad

El cierre es un protector de vidrio sodo-cálcico transparente, con una resistencia a los impactos IK 08 según Norma UNE 50.102. Dependiendo del reflector que se utilice, el vidrio se diseña con partes serigrafiadas con el fin de evitar que se vea desde el exterior los auxiliares.

Existe una junta de estanqueidad entre el cuerpo y el marco, alojada en un canal previsto a este efecto. Está protegida de las zonas que liberan más calor para que sus propiedades se mantengan intactas durante la vida del aparato.

La junta es a base de silicona, de elevada resistencia a las radiaciones ultravioletas de las lámparas, a los gases y vapores.

* Fijación

Se efectúa mediante una horquilla de acero³, fijada a los laterales del cuerpo del proyector sobre un sistema de orientación adecuado.

8.3.5. Beneficios y resultados obtenidos

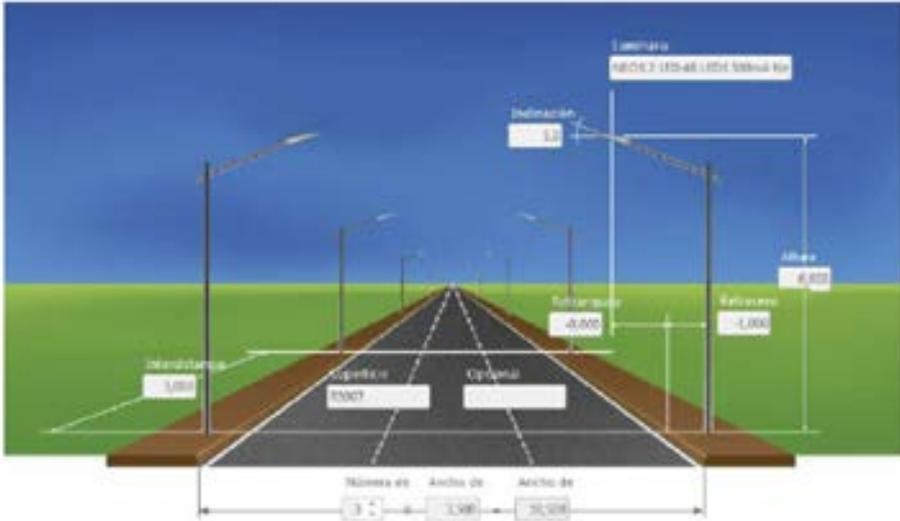
Los 80 aparatos existentes con lámpara de 150 W de Vapor de Sodio Alta Presión con 171 W de consumo unitario y 13,68 kW de consumo total, se sustituyeron por 80 proyectores NEOS-2 de SCHREDER-SOCELEC con 48 leds alimentados a 500 mA y 78 W de consumo, con un consumo total de 6,24 kW.

Con lo que se consiguió una reducción de consumo de 7,44 kW siendo esto un ahorro del 45%.

Las ventajas de las luminarias LED respecto a las convencionales en cuanto al mantenimiento, su vida se estima entre 3 y 5 veces superior a la de otros sistemas y por tanto no necesita un mantenimiento con tanta frecuencia como con los otros tipos de luminaria, ahorrando recursos y costes.

³ Según Norma UNE 36011.

Sirvan para mostrar (Fig. 8.17) los resultados fotométricos las simulaciones mostradas en horario solar diurno y nocturno respectivamente, en la calle Gran Vía de Sabadell, en concreto en el tramo que incluye el paso inferior estudiado.



• Carretera (LU)

Luminancia

Med	18,51 cd/m ²	H ₀	
Min	10,83 cd/m ²	H ₀	
U ₀	65,09 %	H ₀	

Luminancia

LI 1	99,82 %	H ₀	
LI 2	98,95 %	H ₀	
LI 3	99,82 %	H ₀	

• Carretera (IL-HS)

Dominancia

Med	253,1 lux	H ₀	
Min	208,6 lux	H ₀	
U ₀	82,4 %	H ₀	

• Values

T ₁	5,7	H ₀	
----------------	-----	----------------	--



• Carretera (LU)

Luminancia

Med	5,50 cd/m ²	$\frac{L_{LU}}{L_{LU}}$	
Min	3,62 cd/m ²	$\frac{L_{LU}}{L_{LU}}$	
Uo	65,09 %	$\frac{L_{LU}}{L_{LU}}$	

Luminancia

L1 1	99,82 %	$\frac{L_{LU}}{L_{LU}}$	
L1 2	98,95 %	$\frac{L_{LU}}{L_{LU}}$	
L1 3	99,82 %	$\frac{L_{LU}}{L_{LU}}$	

• Carretera (IL-HS)

Luminancia

Med	84,4 lux	$\frac{L_{LU}}{L_{LU}}$	
Min	69,5 lux	$\frac{L_{LU}}{L_{LU}}$	
Uo	82,4 %	$\frac{L_{LU}}{L_{LU}}$	

• Valores

Uo	6,0	$\frac{L_{LU}}{L_{LU}}$	
----	-----	-------------------------	--

Figura 8.17. Resultado fotométrico de la simulación.

8.3.6. Conclusiones

En base a los resultados obtenidos, se puede asegurar que se han cumplido los objetivos de ahorro energético y por tanto económico, y de mejora en la iluminación y el confort visual dentro del túnel.

La ilustración (Fig. 8.18) deja ver dos perspectivas diferentes de la boca de entrada del paso inferior de la calle Gran Vía de Sabadell una vez ejecutadas las mejoras en el sistema de iluminación.

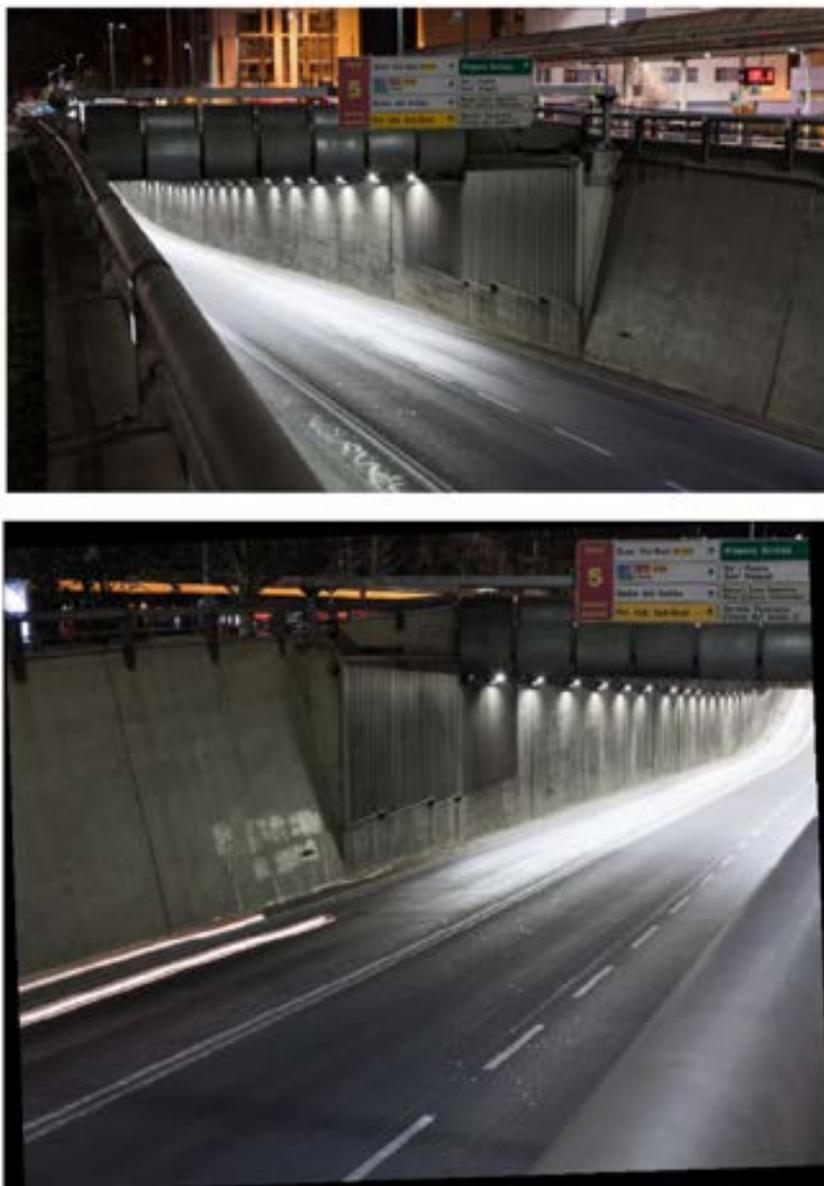


Figura 8.18. Acceso al paso.

8.4. Caso 4: alumbrado del túnel San Isidro-Praga de la M30

CLAVES	DESCRIPCIÓN
Título	Iluminación LED en túneles de la M30
Lugar	Madrid
T.M.(P)	Madrid (Madrid)
Fecha	2007
Organización	SCHREDER-SOCELEC (Fuente: Schreder Socelec)
Comentarios	Sustitución VASP por LED

8.4.1. Introducción

El Sistema de Iluminación del túnel se diseña para cumplir una serie de objetivos, y partiendo de una serie de premisas, las cuales consisten en dotarlo de homogeneidad y hacerlo cómodo y seguro para el conductor que por él transita.

Las premisas de inicio que se cumplirán en todo el túnel son las siguientes:

- Luz de color blanco en el interior de todo el túnel.
- Línea continua de luminarias de fluorescencia para el alumbrado permanente.
- Posibilidad de ejercer un control y regulación sobre las luminarias permanentes desde el Centro de Control.

Estas premisas de inicio tienen por objetivos:

- Limitar el deslumbramiento, de modo que el valor del incremento umbral debe ser inferior al 15% para todas las zonas y niveles, a excepción de la zona de salida.
- Acabar con el molesto efecto *Flicker* ó parpadeo, de modo que recorriendo el túnel un automóvil a la velocidad de diseño no se produzcan impactos luminosos a frecuencias inferiores a 2,5 Hz y superiores a 15 Hz.

Por ello, una iluminación cenital y continua, hará el efecto *Flicker* nulo, además de hacer el deslumbramiento prácticamente despreciable.

- Evitar al conductor la sensación de claustrofobia, debido a que puede permanecer mucho tiempo en el interior del túnel, para lo que se colocará luz blanca.
- Evitar el efecto "muro" al convertir las paredes en elementos bien iluminados y claramente visibles.
- Es muy importante que sea fácilmente accesible sin herramientas, para el cambio de lámpara y mantenimiento, por lo que deberán ser de acceso frontal, lo que además permitirá una continuidad en la línea de luminarias, además se exigirá un índice de estanqueidad IP alto para mantener la fotometría a lo largo del tiempo y su limpieza a chorro, por lo que un IP66 será adecuado.

A la entrada del túnel, en la denominada zona de umbral, el alumbrado durante el día debe dimensionarse de forma que se asegure una visión suficiente de eventuales obstáculos sobre la calzada, pero con unos valores de luminancia inferiores a los naturales. Después de esta primera reducción, en la calificada zona de transición, la instalación debe concebirse para paliar el efecto de adaptación (paso de un nivel de iluminación muy elevado a un nivel más bajo), habituando progresivamente el ojo a los valores de iluminación considerablemente inferiores en la denominada zona interior del túnel, mediante la disminución paulatina de los niveles de iluminación hasta los valores constantes de dicha zona interior del túnel.

8.4.2. Características de la instalación

Madrid es una capital con más de tres millones de habitantes y cada día transitan por ella miles de vehículos. Hasta ahora, la autovía de circunvalación M30 era la que se encargaba de absorber todo el tráfico de la ciudad. Debido al crecimiento urbano, la M30 se ha visto desbordada y es incapaz de hacer frente a los cientos de desplazamientos que diariamente se producen. La contaminación, el ruido, el alto índice de siniestralidad, los atascos, etc., hacían de la M30 un viario colapsado e incómodo para los ciudadanos.

Surge así la mayor obra de ingeniería civil de los últimos años en Europa, la remodelación de la M30. Ha supuesto la transformación de toda la red de carreteras del centro de la ciudad y la recuperación de una extensión de superficie de un millón de metros cuadrados.

El objetivo de una acción de esta envergadura era revitalizar el Centro de Madrid, recuperar el río Manzanares, mejorar la circulación, fomentar la comunicación entre barrios, facilitar el acceso de los ciudadanos a nuevas áreas lúdicas y deportivas y resaltar los espacios verdes y paisajísticos de la ciudad.

Una parte muy importante de los trabajos que se han llevado a cabo ha sido la construcción de túneles para descongestionar la circulación y al mismo tiempo para disminuir de una manera radical el índice de accidentalidad, ya que la seguridad del viario era uno de los principales problemas.

En total, entre los diferentes tramos del túnel suman una longitud superior a los 48 km, lo que hace de esta obra el túnel urbano más largo de Europa.

Socotec ha colaborado en su iluminación con una meta muy clara, conseguir los mejores resultados y ofrecer seguridad y confort al usuario, para ello puso a profesionales altamente cualificados y los últimos avances tecnológicos al servicio de la obra.

El alumbrado base del túnel se ha realizado con luminarias FV1 que incorporan una fuente de luz de fluorescencia de última generación tipo T5, de más de 24.000 horas de vida y de una temperatura de color que dota al túnel de una luz blanca.

En la mayor parte de los túneles se ha realizado la instalación en disposición de doble línea continua opuesta a una altura de 4,50 m, lo cual ha garantizado una excelente uniformidad.

Las potencias instaladas han dependido de la sección del túnel, colocándose en secciones pequeñas y medianas 49 W, y en secciones grandes potencias de 80 W.

La luminaria posee una óptica asimétrica, ya que la instalación se realizó en los hastiales del túnel, y el nivel debía ser uniforme tanto cerca de las paredes del túnel como en el centro de los carriles, además se utilizó un aluminio de alta pureza y de un coeficiente de reflexión próximo al 92%.

Otra característica importante es la estanqueidad de la luminaria, ya que debe mantener sus prestaciones fotométricas a lo largo del tiempo, y para ello se le dotó de un IP65.

El nivel requerido por la propiedad para este túnel se estimó en base a una velocidad de 60 km/h, y un volumen de tráfico por carril y hora máximo, con lo que se llegó a la conclusión de que el nivel de alumbrado en la zona interior del túnel debía de ser de 4,5 cd/m².

Un avance muy innovador en el túnel es que el sistema de control y tele-gestión de la instalación de alumbrado base está centralizado, utilizando como protocolo de comunicación el sistema DALI (*Digital Adressable Lighting Interface*). Cada luminaria se controla de manera digital, independiente y regulable de 3 a 100%.

Con este protocolo que permite una tele-gestión digital tan precisa, se marcó otra premisa, y era que, no se debía pasar del 80% del flujo de la lámpara en el cumplimiento del nivel marcado de 4 cd/m², para así tener un 20% mínimo restante que podía ponerse en funcionamiento en caso de emergencia en el interior del túnel, ya que lo que primó en el diseño lumínico del túnel fue la seguridad y el confort visual para el usuario.

8.4.3. Solución adoptada

Los niveles de luminancia que se deben dar a lo largo del tronco del túnel han sido calculados para una velocidad máxima en su interior de 80 km/h.

Sin embargo los accesos a éste tronco, se considera una velocidad de 60 km/h.

Esta diferenciación de dimensionamiento, nos hace tener dos curvas CIE, ya que la distancia de parada, está directamente relacionada con ella, así pues, se obtiene una curva a 80 km/h, que nos dará el alumbrado base para todo el túnel, incluidos los accesos al tronco y los refuerzos a la entrada de éste, y otra curva para los accesos más lentos, dimensionada a 60 km/h, para determinar solamente los refuerzos de dichos accesos.

De este modo el alumbrado base para todo el túnel será el más restrictivo de ambas situaciones (4 cd/m²).

Tramo Umbral	
Longitud	100 m desde la boca
Luminancia	L=225 cd/m ²
Tramo de Transición I	
Longitud	50 m desde el fin del tramo anterior
Luminancia	L=90 cd/m ²
Tramo de Transición II	
Longitud	150 m desde el fin del tramo anterior
Luminancia	L=35 cd/m ²

Tramo de Transición III	
Longitud	100 m desde el fin del tramo anterior
Luminancia	$L=14 \text{ cd/m}^2$
Tramo de Transición IV	
Longitud	320 m desde el fin del tramo anterior
Luminancia	$L=8 \text{ cd/m}^2$
Tramo Interior y Alumbrado Nocturno	
Longitud	Todo el túnel
Luminancia	$L=4 \text{ cd/m}^2$
Tramo de Salida	
Longitud	100 m
Luminancia	$L=20 \text{ cd/m}^2$

Figura 8.19. Estudio por tramos.

En la zona de salida, aunque en las recomendaciones se aconseja una luminancia exterior (L_{ex}) igual a la luminancia nocturna, por lo que no sería necesario introducir ningún refuerzo, debido a que algunas salidas pueden ser muy conflictivas por estar en ciudad, y por la longitud del túnel, se instalan equipos para dar una luminancia 5 veces la interior, es decir, $L_{\text{ex}} = 20 \text{ cd/m}^2$, considerando la zona de salida igual a la distancia de seguridad es decir 100 m.

En la Fig. 8.20 se expone la zonificación del túnel.

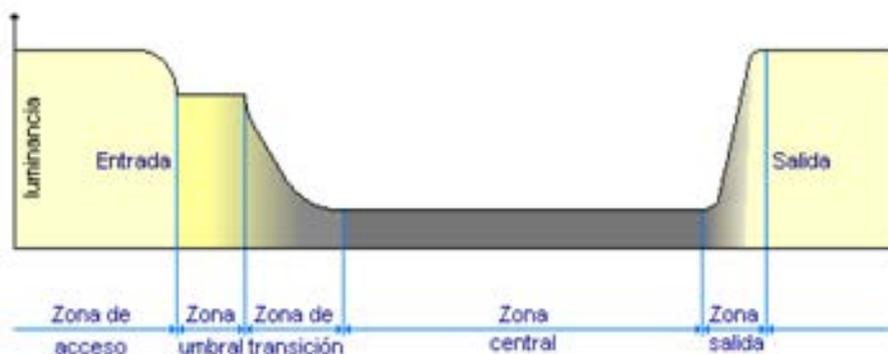


Figura 8.20. Zonificación del túnel.

La Tabla 8.8 relaciona las zonas y tramos del túnel con las velocidades de diseño y distancias de seguridad.

Tabla 8.8. DS según velocidad.

	Velocidad	Distancia de seguridad
Tronco del túnel y accesos principales	80 km/h	100 m
Accesos al túnel	60 km/h	60 m

En la siguiente gráfica (Fig 8.21) se muestran los criterios de iluminancia en cada tramo del túnel para una velocidad de circulación de 80 km/h, con las distancias de cada uno de los tramos.

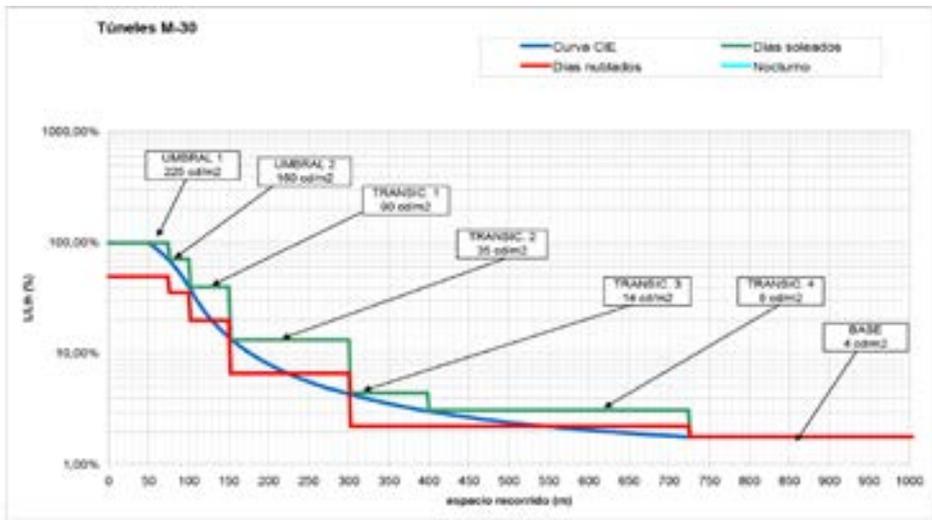


Figura 8.21. Criterios de luminancia (80 km/h).

En la siguiente gráfica se muestran los criterios de iluminancia en cada tramo del túnel para una velocidad de circulación de 60 km/h, con las distancias de cada uno de los tramos.

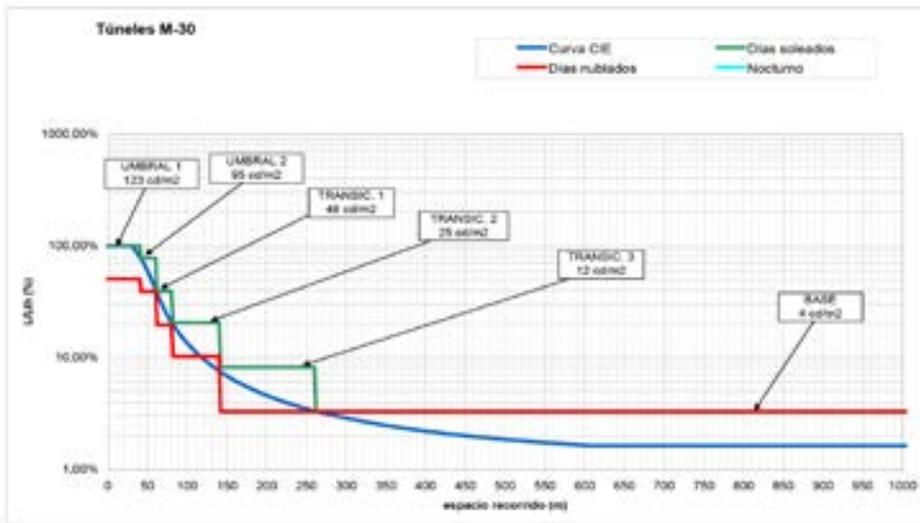


Figura 8.22. Criterios de luminancia (60 km/h).

8.4.4. Iluminación permanente o nocturna

Este tipo de luminaria se colocará en el túnel en la zona lateral del mismo, en los hastiales, a una altura de 4,5 m fijados al muro y por encima de ellos irá la bandeja de soporte rígido, sobre la que se realizará el tendido de cables y se colocarán otros elementos, como los conectores, por ejemplo. Esta iluminación será una línea continua de fluorescencia de luz blanca a lo largo de todo el túnel que garantiza una iluminancia de 4 cd/m².

En los tramos del túnel de hasta 3 carriles se empleará una luminaria de 49 W y a partir de 4 se emplearán lámparas de 80 W, pero en ambos casos las especificaciones de los equipos serán iguales, con la salvedad, por supuesto de la lámpara.

En la Tabla 8.9 se recogen dichas especificaciones.

Tabla 8.9. Especificaciones técnicas.

Luminaria	
Lámparas de Fluorescencia recomendadas	De fluorescencia de alta emisión (Tecnología T5) de 49 W 80 W, en función del número de carriles.
Altura de instalación	Lateral a 4,5 m
Eficiencia lumínica	87,76
Porcentaje de flujo necesario	Función del número de carriles, de un 60 a un 90%.
Carcasa	
Aleación Tipo	L-3431, según norma ASTM
Resistencia a Tracción	2,7 kg/dm ²
Coeficiente de dilatación	23x10
Módulo elástico	6.700 kg/mm ²
Tamaño	1570 mm x 210 mm x 110 mm
Fijación al túnel	Montado sobre bandeja de soporte rígido a una altura de 4,5 m.
Grado de Protección	IP 65
Bloque óptico	
Unión con la armadura	Bloque independiente de la armadura
Material	Aluminio de 99, 8% de pureza, del tipo A8 brillante, abrillantado y oxidado anódicamente con una capa de 5 micras de espesor.
Tipo de Cierre	SECURIT de 5 mm
Otras Características	Estanco al chorro de agua y permite el cambio del protector El aparato es de clase I, según UNE 20314. El aparato cumple con la norma UNE 20324 de hermeticidad, con la denominación IP 65.
Accesibilidad al bloque óptico	Mediante la apertura frontal del cierre de vidrio y sin herramientas.

Control	
Sistema DALI	Con balasto electrónico DALI de alta frecuencia y regulable que permita su control.

La instalación de estas luminarias se hará a una altura comprendida de 4,5 metros, con tiras continuas en los hastiales, de aparatos de fluorescencia con lámpara T5 de 49 W, cuyo número de tiras y porcentaje de utilización del flujo variará en función del número de carriles de la siguiente forma:

- Para 1 carril, con 1 línea continua de aparatos fijados en el hastial derecho, con un tubo fluorescente T5 de 49 W (4.300 lm) al 60% de su flujo total.
- Para 2 carriles, con disposición bilateral (en los 2 hastiales) continua lineal con fijación a pared, con tubo fluorescente T5 de 49 W (4.300 lm) al 50% de su flujo total.
- Para 3 carriles, con disposición bilateral (en los 2 hastiales) continua lineal y fijación a pared, con tubo fluorescente T5 de 49 W (4.300 lm) al 75% de su flujo total.
- A partir de 4 carriles se instalarán lámparas de 80 W, en vez de los de 49 W, de modo que se den los niveles mínimos de 4 candelas en todos los carriles y a través de la regulación con el sistema DALI no se les exija un funcionamiento al 100% de su flujo, lo que aumente su vida útil, como se detalla a continuación:
 - Para 4 carriles, con disposición bilateral (en los 2 hastiales) continua lineal con fijación a pared con tubo fluorescente T5 de 80 W (6.150 lm) al 65% de su flujo total.
 - Para 5 carriles, con disposición bilateral (en los 2 hastiales) continua lineal con fijación a pared, con tubo fluorescente T5 de 80 W (4.300 lm) al 75% de su flujo total.

En el croquis de la Fig. 8.23 se muestra un esquema de la luminaria descrita anteriormente para la iluminación de Permanente o Nocturna. Donde la longitud L es 1.570 mm, siendo la luminaria idéntica para las lámparas de 49 W y las de 58 W, que sólo difieren en la potencia de dichas lámparas.

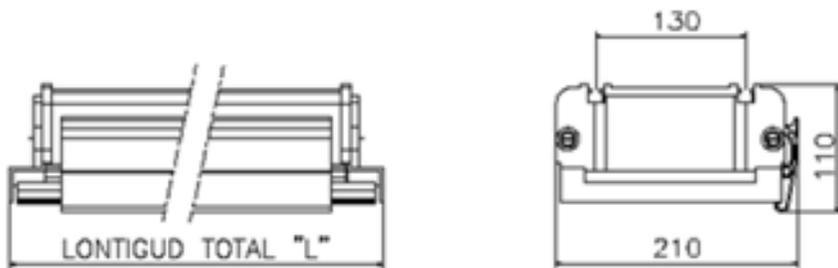


Figura 8.23. Esquema de la luminaria.

Un caso especial dentro de la iluminación nocturna o permanente supone el tramo de galería de servicio que se encuentra en el tramo del *By-pass sur*; para ésta y el resto de galerías transitables se dispondrá de un sistema de iluminación permanente de fluorescencia de luz blanca colocándose cenitalmente una línea de luminarias dobles de 2x55 W separadas entre sí 10 m, que cumplirán las siguientes especificaciones (Tabla 8.10).

Tabla 8.10. Especificaciones técnicas 2.

Luminaria	
Lámparas de Fluorescencia	De fluorescencia de 2x55 W compacta
Tiempo de vida	10.000 h
Peso de la luminaria	5 kg
Altura de instalación	Cenital
Carcasa	
Aleación Tipo	L-3431, según norma ASTM
Resistencia a Tracción	2,7 kg/dm ²
Coefficiente de dilatación	23x10
Módulo elástico	6.700 kg/mm ²
Tamaño	1.280 mm x 210 mm x 110 mm
Fijación al túnel	Montado sobre bandeja de soporte rígido a una altura de 4,5 m
Grado de Protección	IP 65

Bloque óptico	
Unión con la armadura	Bloque independiente de la armadura
Material	Aluminio de 99,8% de pureza, del tipo A8 brillante, abrillantado y oxidado anódicamente con una capa de 5 micras de espesor
Tipo de Cierre	SECURIT de 5 mm
Accesibilidad al bloque óptico	Mediante la apertura frontal del cierre de vidrio y sin herramientas
Otras Características	Estanco al chorro de agua y permite el cambio del protector El aparato es de clase I, según UNE 20314. Cumple con la norma UNE 20324 de hermeticidad

8.4.5. Iluminación de refuerzo

Este tipo de luminaria se colocará en el túnel en los hastiales del túnel, por encima de la iluminación permanente, siempre que esto sea posible, pero a diferencia de la iluminación permanente, no tendrá que ser regulada a través de ningún tipo de sistema o protocolo.

La lámpara utilizada, será de halogenuros metálicos, cuyas potencias variarán dependiendo de la zona del túnel que se trate, ya sea umbrales o transiciones, y tronco o accesos al túnel, ya que aquí sí marcaremos diferencia:

- Accesos al tronco principal, los refuerzos a la entrada de éste y entradas más rápidas, como pueden ser la conexión de la calle Embajadores con la M-40 o el acceso por la avenida de Portugal, dimensionados para 80 km/h,
- Accesos secundarios dimensionados para 60 km/h, que serán tramos de entrada al túnel más lentos.

En cualquier caso ambos refuerzos deberán cumplir las siguientes especificaciones, que sólo diferirán en el tipo de luminaria, de 400 W en un caso y de 250 W en el otro (Tabla 8.11).

Tabla 8.11. Especificaciones técnicas 3.

Luminaria	
Lámparas requeridas	<p>Lámpara de halogenuros metálicos de 400 W en las zonas umbral 1 y 2, transición 1 y 2 de los accesos principales, dimensionados para 80 km/h</p> <p>Lámpara de halogenuros metálicos de 250 W en las zonas de transición 3 y 4 de los accesos principales, dimensionados para 80 km/h</p> <p>Lámpara de halogenuros metálicos de 400 W en las zonas umbral 1 y 2, transición 1 y 2 de los accesos principales, dimensionados para 60 km/h</p> <p>Lámpara de halogenuros metálicos de 250 W en las zonas de transición 3 de los accesos principales, dimensionados para 60 km/h</p>
Altura de instalación	En el hastial a 4,5 - 5 m de altura, por encima de la iluminación permanente
Carcasa	
Aleación Tipo	Aluminio inyectado a presión AS12 (L-2521, según UNE 38269), con un contenido en silicio superior al 10%
Tamaño	555 mm x 438 mm x 200 mm
Fijación al túnel	Mediante una horquilla de acero inoxidable, montada en la parte inferior del cuerpo, sobre un sistema de orientación adecuado
Grado de Protección	IP 65
Bloque óptico	
Unión con la armadura	Bloque independiente de la armadura
Material	El material de los reflectores es aluminio de 99,8% de pureza, del tipo A8
Tipo de Cierre	Protector de vidrio "SECURIT", de 5 mm de espesor
Accesibilidad al bloque óptico	El cierre se realiza por medio de unos resortes elásticos, accionables fácilmente a mano

En el croquis siguiente (Fig. 8.24) se muestra un esquema de la luminaria descrita anteriormente para la Iluminación de Refuerzo.

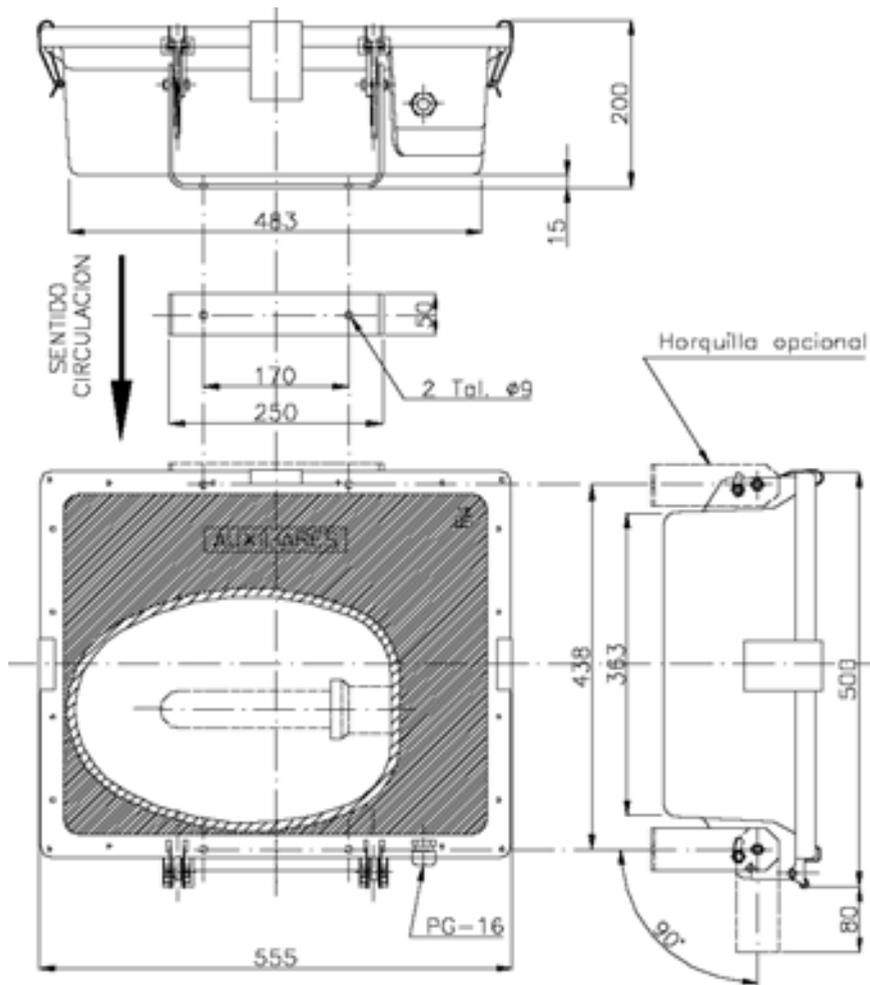


Figura 8.24. Luminaria para refuerzo.

8.4.6. Descripción de las luminarias empleadas

Las luminarias se describen en grupos según su aplicación en las operaciones de mejora de la iluminación en los túneles de la M30.

- Para el alumbrado base se selecciona una luminaria tipo FV-1 dispuesta en tira continua, como la que se muestra en la Fig. 8.25 (izaq).
- Para el alumbrado de refuerzo se considera la entrada, en el proyecto de mejora de la iluminación en el túnel, de proyector AF-4 dispuesto en bilateral oposición. Se muestra en la Fig. 8.25 (drch).



Figura 8.25. Luminaria y foco.

8.4.7. Alumbrado base

El aparato FV ha sido estudiado para su aplicación en una amplia gama de alumbrado, ya que reúne unas características óptimas, tanto técnicas como fotométricas.

Su alto grado de hermeticidad y estanqueidad, así como sus grandes posibilidades de orientación y distribución fotométrica, permiten su utilización en instalaciones tales como túneles y pasos subterráneos.

Este aparato está previsto para la utilización de lámparas de fluorescencia convencionales de hasta 58 W, de fluorescencia compacta de hasta 2x55 W de potencia y fluorescencia de alta emisión (Tecnología T5) de hasta 80 W.

La armadura está formada por un cuerpo de sección transversal reducida, fabricado en aluminio extruido y dotado de una serie de acanaladuras que per-

miten la localización del bloque óptico, del protector y sus juntas de hermeticidad, de la placa porta auxiliares eléctricos y de los tornillos que aseguran, tanto las tapas laterales como el sistema de sustentación del aparato. El acabado es a base de pintura en polvo y polimerización a 200 °C.

Dos tapas laterales, de aleación de aluminio inyectada a presión, sujetas al cuerpo por medio de tornillos, cierran la armadura, confiriéndole una gran estanqueidad. El acceso al bloque óptico y a los auxiliares, se realiza fácilmente, mediante la apertura frontal del cierre de vidrio y sin herramientas.

* Cuerpo

El perfil del cuerpo es de aleación tipo L-3431, según UNE 6063 según Norma ASTM (USA).

Características del perfil:

- Resistencia a tracción: 2,7 kg/dm²
- Coeficiente de dilatación: 23x10
- Modulo elástico: 6.700 kg/mm²

Dada la ausencia de Cobre en la aleación, es un material muy resistente a la corrosión.

* Bloque óptico

El conjunto óptico, formado por un reflector, constituye un bloque independiente de la armadura y puede extraerse fácilmente, haciéndolo deslizar sobre las acanaladuras previstas al efecto.

El reflector, de diferente forma en función de las lámparas, es de aluminio de 99.8% de pureza, del tipo A8 brillante, abrillantado y oxidado anódicamente con una capa de 5 micras de espesor, y con un sellado de dicha capa que soporta los ensayos marcados en las normas UNE 38016 y 38017.

* Cierre

El cierre es un protector de vidrio tipo " de 5 mm de espesor, con las características propias del vidrio templado, de muy alta resistencia térmica y al impacto mecánico, al tiempo que posee una muy elevada transmitancia.

El vidrio se sujeta al perfil por medio de un marco portante y por interposición de una junta silicónica, lo que le hace estanco al chorro de agua, y permite el cambio del protector, en caso necesario.

* Compartimento para sistemas auxiliares y material de las juntas

El aparato permite la incorporación de los auxiliares propios de la lámpara o lámparas en un espacio totalmente independiente del que contiene el sistema óptico, y montados sobre una placa extraíble, estos auxiliares, serán electrónicos, y compatibles con el protocolo *DALI*.

Las juntas son a base de caucho silicónico, de elevada resistencia a las radiaciones ultravioletas de las lámparas y a los gases y vapores. Asimismo, poseen una elevada resistencia a las sollicitaciones térmicas, hasta los 130 °C.

* Fijación

Se efectúa mediante un sistema de soporte-orientación articulado, formado por dos piezas de material, convenientemente tratado contra la corrosión. Dos ranuras en la parte posterior del aparato, permiten el deslizamiento y anclaje de las cabezas de bulones de M8, con lo cual no hay comunicación alguna entre el interior y exterior del aparato.

* Otras consideraciones

- El portalámparas es de porcelana de alta calidad, resistente a las corrientes de fuga.
- El aparato es de clase I, según UNE 20314.
- El aparato cumple con la norma UNE 20324 de hermeticidad, con la denominación IP 65.

- En lo referente a Seguridad, como envolvente de material eléctrico de baja tensión, cumplirá con UNE 20314 como aparato de clase I, con opción a ser clase II.

8.4.8. Iluminación de refuerzo

Se determina la aplicación del proyector *AF-4* dispuesto en bilateral oposición. El aparato *AF-4* es una luminaria especialmente diseñada para la iluminación de túneles, con lámparas de descarga, en particular de vapor de sodio alta presión, que presenta unos rendimientos fotométricos muy elevados en términos de distribución de luminancias y unas elevadas características de hermeticidad y de facilidad de mantenimiento.

Este aparato puede ser utilizado en dos variantes:

- Con lámpara de vapor de sodio alta presión, de hasta 400 W y equipo incorporado.
- Con lámpara de halogenuros metálicos de hasta 400 W y equipo incorporado.

La luminaria propiamente dicha está formada por dos piezas, una parte principal, denominada cuerpo, de aleación de aluminio inyectado a presión, que contiene el bloque óptico, y que aloja los auxiliares eléctricos así como el sistema de fijación y orientación del proyector, y otra parte, denominada soporte de vidrio, que contiene el cierre de vidrio, así como los elementos de articulación y cierre de esta pieza sobre el cuerpo. El soporte de vidrio está fabricado a partir del mismo material que el cuerpo. El acabado es a base de pintura en polvo polimerizada a 200 °C.

Ambas partes cierran una sobre otra mediante un sistema de charnelas y en la parte opuesta, unos cierres elásticos, que pueden accionarse sin necesidad de herramientas.

El acceso al bloque óptico y auxiliares eléctricos, se realiza pues, abriendo el soporte de vidrio, que bascula sobre las charnelas existentes entre el soporte y el cuerpo.

* **Cuerpo**

Las dos piezas, tanto superior como inferior, están fabricadas de aleación de aluminio inyectado a presión AS12⁴, con un contenido en si superior al 10%.

En la zona de charnelas, hay previsto un tope para impedir que los ejes se salgan. El cierre se realiza por medio de unos resortes elásticos, accionables fácilmente a mano y de material aluminio extruido y anodizado.

* **Bloque óptico**

El conjunto óptico forma un bloque independientemente de la armadura que puede extraerse fácilmente. Pueden utilizarse varios reflectores, según la distribución que se desee. El material de los reflectores es aluminio de 99,8% de pureza, del tipo A8, abrigantado y oxidado anódicamente con una capa de 5 micras de espesor.

* **Cierre y juntas de hermeticidad**

El cierre es un protector de vidrio *SECURIT*, de 5 mm de espesor, con unas excelentes propiedades de resistencia térmica y mecánica.

El vidrio se sujeta al soporte, por medio de unas clemas en aluminio AG3 previstas a tal efecto, y en el cuerpo, hay dispuesta en un alojamiento especial una junta de silicona de sección transversal con labio para hacer el recinto interior estanco al chorro de agua, al tiempo que permite el cambio del protector, en caso necesario.

Existe una junta de hermeticidad entre la parte superior y la inferior del aparato, alojada en un canal previsto a este efecto.

La junta está compuesta de caucho silicónico, de elevada resistencia a las radiaciones ultravioletas de las lámparas y a los gases y vapores.

⁴ L-2521, según UNE 38269.

* Fijación

Se efectúa mediante una horquilla de acero inoxidable, montada en la parte inferior del cuerpo, sobre un sistema de orientación adecuado, con lo que no hay comunicación entre el interior y el exterior del aparato.

A petición, pueden suministrarse fijaciones adaptables al tipo de sujeción que se desee.

* Otras consideraciones

- El portalámparas es homologado, según IEC.
- El cableado se hace con cable de silicona, recubierto con fibra de vidrio, con una resistencia térmica de hasta 200 °C.
- El aparato cumple con la Norma UNE-EN 60598, con un grado de protección IP 65.

* Beneficios y resultados obtenidos

Con el fin de poder tener control absoluto sobre la totalidad de las luminarias del túnel, se emplea un sistema de tele-gestión *DALI*.

Desde el Centro de Control se va a poder gobernar de una forma flexible y dinámica cada uno de los controladores locales (hasta un total de 40 balastos electrónicos) para poder establecer una iluminación determinada por tramos dentro de los túneles.

El Sistema del Centro de Control o la ERU (estación remota universal) también gobernará los controladores de planta, de los que a su vez colgarán hasta 64 controladores locales, para poder establecer una iluminación determinada en secciones completas dentro de los túneles, además estos controladores de planta estarán en comunicación a través de un *BUS LON* con los controladores de la Unidad de Entradas, que recogen información de los luminancímetros de la iluminación del túnel.

En la Base de Datos del Centro de Control se darán de alta todos los controladores locales y todas las centrales de zona para que su gestión sea dinámica y flexible, a la vez que cómoda para el usuario de la aplicación de gestión.

La integración con el Centro de Control debe ser de una forma totalmente transparente a través de herramientas *SDK* para plataformas *Windows* y conexión por *TCP/IP*. El software del Centro de Control deberá disponer de la conexión *API* para *Windows* con los comandos básicos siguientes:

Activación de niveles de iluminación a través del controlador local, es decir, envío de comandos al controlador local para gobernar un tramo.

Activación de niveles de iluminación a través de central de zona, es decir, envío de comandos a la central de zona para gobernar una sección.

Recepción de alarmas del estado de los balastos desde el controlador local.

Al igual que se realiza para Centro de Control una integración con *API* (*Windows*), para la ERU debe existir una *API* para Sistema Operativo *Linux* que realice las mismas funciones que hace el *API* de *Windows*. Así de esta forma es independiente conectar la central de zona al Centro de Control directamente o la ERU en el cuarto técnico.

Los resultados fotométricos se exponen en las tablas servidas por el software. Con el fin de no sobrecargar la publicación se han extraído dos ejemplos relativos a la iluminación base y a la zona de transición 3 respectivamente, aunque se disponen fichas y estudios análogos para:

La iluminación base (véase Fig. 8.26)

- La zona umbral 1.
- La zona umbral 2.
- La zona de transición 1.
- La zona de transición 2.
- La zona de transición 3 (véase Fig. 8.27).

Se evaluaron los resultados luminotécnicos de la iluminación base para el túnel que une San Isidro y Praga, en la circunvalación M30 de Madrid.



Fuji: 60% de Flujo T3 de 40 W

Proyecto: Base de 1 carril (M-30 SAN ISIDRO-PRAGA)

Fichero: ... \1 cambioase_tcarri.grf

Información general

Detalles de las mallas

* Malla principal (1)

General

Tipo: Activado: Máscaras: Color:

Geometría

Posición de

X: Y: Z:

Tamaño

NP X: Interdistancia: Tamaño X:

NP Y: Interdistancia: Tamaño Y:

Cálculo

Luminancia: Faceta:

Luminancia:

Posición del

Mov: 4X: 4Y: 4Z:

Superficie de la

Tabla R: Go:

* Centro del carril 1 (2)

General

Tipo: Activado: Máscaras: Color:

Geometría

Posición de

X: Y: Z:

Tamaño

NP X: Interdistancia: Tamaño X:

Cálculo

Luminancia:

Posición del

Mov: 4X: 4Y: 4Z:

Superficie de la

Tabla R: Go:

Resumen

Resumen sobre las mallas

Tipo de medio: Aritmético (A) o Ponderado (P)

Malla principal (1)	Min	Máx	Med (A)	Min/Máx	Min/Med
Luminancia (lux)	92.5	129.5	112.5	70.9	81.5
Luminancia (cd/m²)	3.47	5.07	4.54	2.85	3.4

Figura 8.26. Iluminación base.

El estudio luminotécnico de la zona de transición 3 del túnel incluido en el tramo de la M30 que une San Isidro con Praga, arroja los resultados que se muestran en la Fig. 8.28.

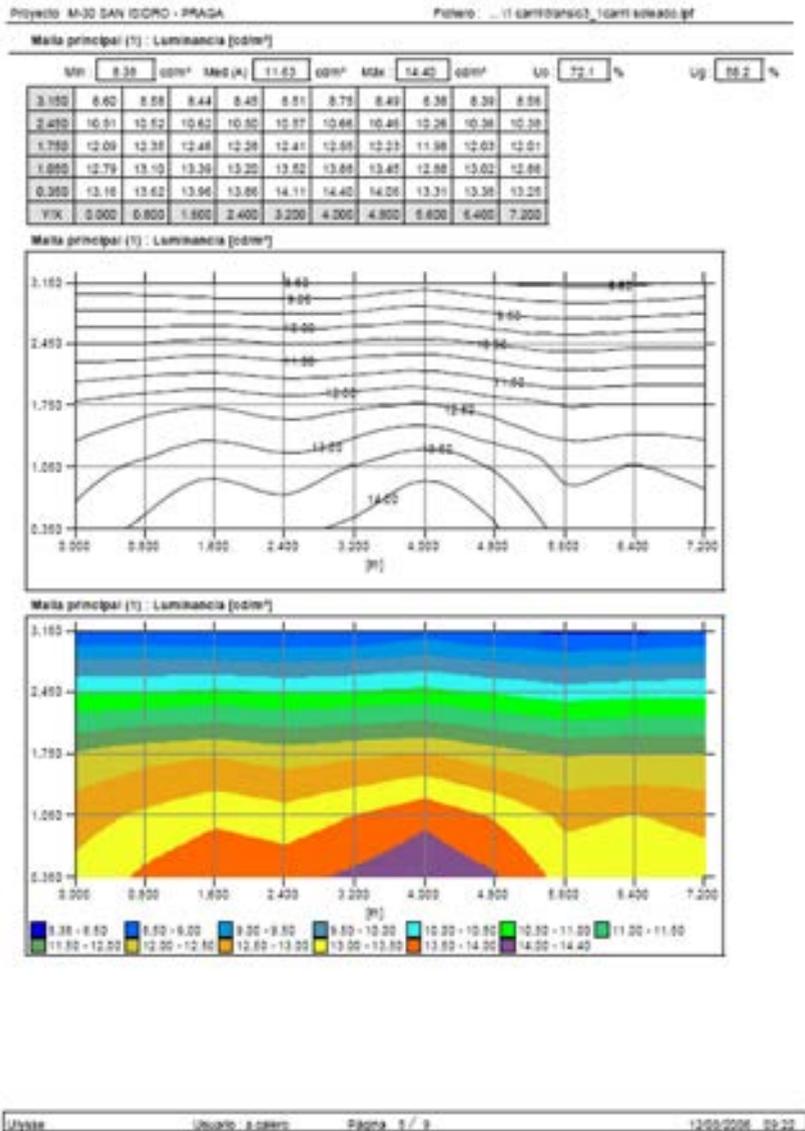


Figura 8.28. Iluminación zona de transición 3, (II).

8.5. Caso 5: instalación de emergencia en el Intercambiador de Avenida América

CLAVES	DESCRIPCIÓN
Título	Instalación de Emergencia en el Intercambiador de Avenida América
Lugar	Avenida de América, 9
T.M.(P)	Madrid
Fecha	Segundo semestre de 2013 y año 2014
Organización	ElectroZemper (Fuente: Zemper)

8.5.1. Introducción

De acuerdo con el plan de construcción de intercambiadores de transporte público, se procedió a la remodelación y ampliación del de la Avenida de América. El intercambiador existente, ya no cumplía con los requisitos necesarios en una instalación por la que pasan a diario miles de viajeros. Es por esto por lo que se procedió a las obras para su mejora.

8.5.2. Características de la instalación

La iluminación de emergencia no era la adecuada para los requisitos exigidos tanto por el reglamento de baja tensión como por el código técnico de edificación, debido a la antigüedad de los aparatos instalados.

8.5.3. Solución adoptada

Se han instalado emergencias con tecnología LED en la zona de los túneles, y con sistema de control de auto-test centralizado. La emergencias *Arian LAE-3375DP+*, con 6 LED de 1 W. y 375 lm. Controladas por microprocesador y posibilidad de conexión a una central de control TPT-8250+ PC. En la Fig. 8.29 aparecen algunas de las especificaciones técnicas del producto (croquis acotado y diagrama fotométrico) según su fabricante/distribuidor.

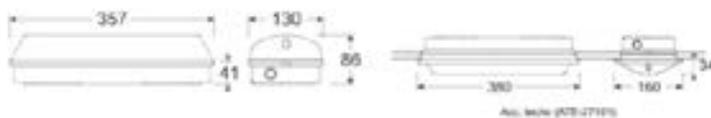


Figura 8.29. Dimensiones de la luminaria.

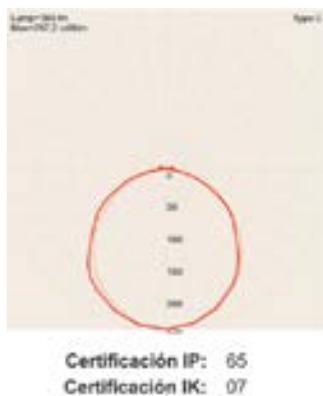


Figura 8.30. Distribución luminosa.

En las dársenas (Fig. 8.31) se han instalado luminarias y emergencias Atex por ser zona clasificada. Modelo *Arian FSPC-1602-C* de 460 lm. IP-65, y luminarias *Kepler* de 2x58-IP-68 preparadas para limpieza con chorros de agua a alta presión. Orientables 360°.



Figura 8.31. Dársenas.

Los modelos de simulación arrojan distribuciones de colores falsos, para el análisis de la distribución lumínica, que se muestran en la Fig. 8.32.

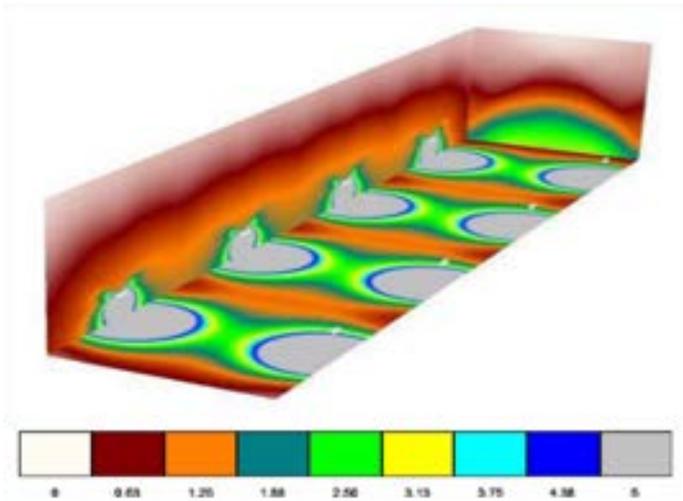


Figura 8.32. Simulación.

La Fig. 8.32 muestra el estudio de isólinas derivado del estudio de simulación por software. Se corresponde en concreto, según la zonificación considerada, con la denominada “acera 1” del túnel, cuya imagen puede apreciarse en la fotografía de la Fig. 8.33. La iluminancia se ha medido siempre en dirección ortogonal.

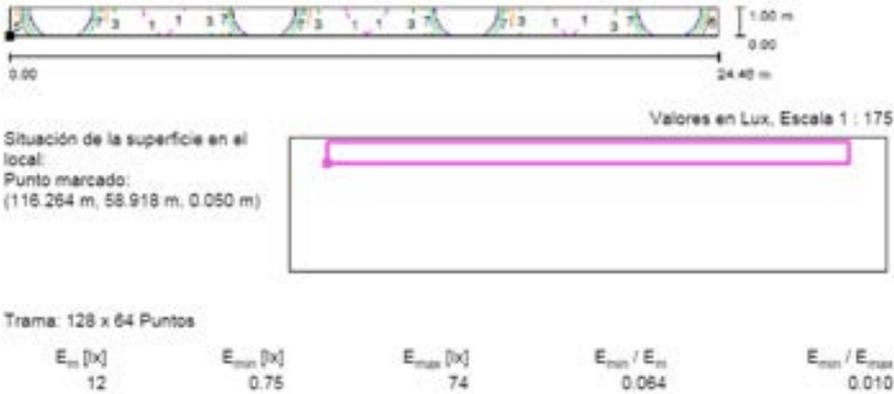


Figura 8.33. Luminancias ortogonales.



Figura 8.34. Túnel.

8.5.4. Beneficios y resultados obtenidos

En base a los equipos instalados, se puede asegurar que se ha conseguido el objetivo de un gran ahorro energético, así como una iluminación mucho más eficiente tanto en la convencional como en la de emergencia, además de un control completo sobre estas últimas.

8.5.5. Conclusiones

El nuevo intercambiador ha quedado listo para afrontar la tarea de servir de punto de conexión a casi 200.000 viajeros diarios que utilizan sus instalaciones.

La imagen de la Fig. 8.35 muestra el estado actual de la zona de escalera después de la actuación.



Figura 8.35. Escaleras.

8.6. Caso 6: Nuevo Alumbrado en los túneles de Somosierra

CLAVES	DESCRIPCIÓN
Título	Nuevo alumbrado en los túneles de Somosierra
Lugar	Somosierra
T.M.(P)	Somosierra (Madrid)
Fecha	
Organización	Philips (Fuente: Philips Ibérica)
Comentarios	Recurso empleado <i>LEDGINE 2.0</i>

8.6.1. Introducción

La gestión energética, especialmente la de la iluminación, presentaba problemas importantes de ineficiencia, llegando a registrar consumos de más de 700.000 kWh al año (lo que daba un ratio resultante de 40,32 kWh/m² y año).

Tras el incidente ocasionado por un camión que se incendió en la boca sur del túnel sentido Burgos, quedaron inutilizados los circuitos del túnel además de un gran número de luminarias, por lo que se decidió proceder a la actualización de la iluminación con la premisa de conseguir una instalación basada en los criterios de eficiencia más avanzados.

8.6.2. Características de la instalación

Debemos tener en cuenta que los túneles de Somosierra presentan un tráfico muy estacional con un tráfico medio de 21.200 vehículos/día (para el conjunto de ambos) y una punta diaria de 37.751 vehículos/día en el mes de julio. La máxima intensidad horaria registrada es de 4.174 vehículos/hora a las 11:00 h horas, aunque el tráfico punta normalmente se sitúa entre las 18:00 h y las 19:00 h. Esto obliga a proyectar una instalación muy flexible, con una capacidad de regulación elevada, para ajustar lo máximo posible los niveles lumínicos a los tráficos circulantes y conseguir así el máximo nivel de eficiencia.

8.6.3. Solución adoptada

Por este motivo se ha decidido combinar la tecnología *Tune* LED con proyectores de sodio, todo ello regulado mediante controles inteligentes, creando así una solución integral de bajo coste de inversión para el cliente y que cumpla las exigencias de la normativa internacional CIE 88 de 2004.

La nueva instalación (figura 8.36) está constituida por 192 proyectores del tipo *TunLED* de LEDs, 179 proyectores del tipo HNF de VSAP de 400 W y 42 de VSAP de 250 W. La potencia instalada en iluminación para ambos túneles es de 120 KW lo que va a permitir reducir la potencia con tratada a valores muy inferiores a los anteriores. Con las nuevas instalaciones y su sistema de regulación el consumo previsto es de 330.000 kWh al año lo que supone un ahorro superior al 50% sobre el consumo actual y un ratio de 19 kWh/m² y año.

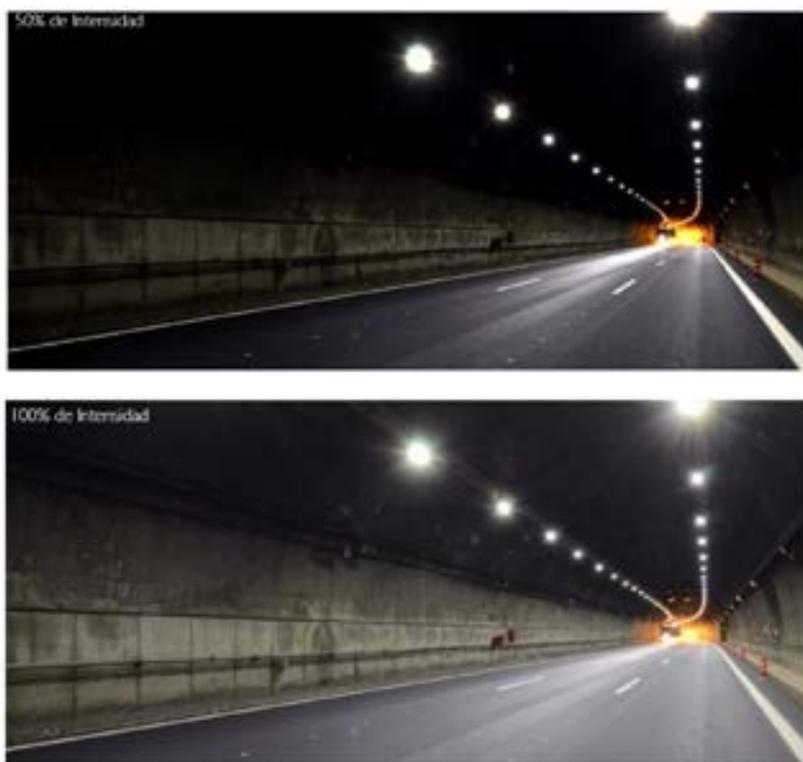


Figura 8.36. Nueva instalación.

8.6.4. Resultados y beneficios obtenidos

Las principales ventajas del proyecto derivan de la utilización del uso de la tecnología LED, ya que nos proporciona ahorros energéticos muy importantes en una instalación que funciona las 24 horas al día. Además, al disponer de un sistema de control inteligente, es posible regular los niveles de iluminación adaptándolos a las condiciones del tráfico, lo cual aumenta todavía más los niveles de eficiencia energética.

Es importante destacar el uso de luz blanca con rendimiento en color elevado, ya que contribuye a aumentar la percepción espacial de los conductores dentro del túnel, lo cual, ayuda a prevenir accidentes de tráfico.

Por otro lado, la incorporación de luminarias *TunLED* facilita estas labores de mantenimiento ya que eliminamos la reposición de lámparas, limitándose tan solo estas labores a la limpieza superficial de las luminarias.

En la Fig. 8.37 se aprecia la diferencia entre la boca de entrada y la boca de salida del túnel de Somosierra.



Figura 8.37. Diferencia entre bocas de entrada y salida.

8.6.5. Agradecimientos

Manuel Albea Ortiz de la Tabla, Rocío Fernández de Torres, María Luisa Rodríguez Cano y Miguel Ángel Álvarez Villanueva (Philips); D. Vicente Vilanova Martínez-Falero (Ingeniero).

8.7. Caso 7: Ciudad financiera del Santander.

CLAVES	DESCRIPCIÓN
Título	Ciudad financiera del Santander
Lugar	Boadilla del Monte
T.M.(P)	Boadilla del Monte (Madrid)
Fecha	2004
Organización	Philips (Fuente: Philips Ibérica)
Comentarios	

8.7.1. Introducción

La Ciudad Grupo Santander (CGS), construida en la localidad madrileña de Boadilla del Monte, en España, entró en funcionamiento en 2004. Es una de las mejores sedes corporativas del Mundo y uno de los proyectos más ambiciosos e innovadores emprendidos por una empresa española, tanto en dimensiones como por sus exigencias operativas. Esta ciudad empresarial ocupa una superficie de 250 ha y cuenta con nueve edificios de oficinas, todos dotados con los mayores adelantos en comunicaciones internas, equipamientos para el puesto de trabajo y ahorro de energía. También tiene dos centros de proceso de datos, un centro de formación, una residencia hostelera para empleados, escuela infantil, grandes instalaciones deportivas y comerciales, y una amplia gama de opciones de restauración.

La ubicación de los servicios centrales en un mismo complejo supone una mayor eficiencia de la organización por la vía de un aumento en la productividad y un considerable ahorro de costes. La estructura de planta elegida en los edificios que albergarán las oficinas, así como el diseño de las instalaciones, facilita la comunicación e interacción entre todos los departamentos que se congregan en la Ciudad Grupo Santander. Antes de su existencia, los servicios centrales del Grupo se distribuían por 25 edificios distintos en Madrid, de modo que el abaratamiento de los costes de mantenimiento y la reducción del tiempo empleado en desplazamientos entre centros de trabajo, han sido muy importantes. En cuanto a las instalaciones de iluminación, que fueron diseñadas por la ingeniería TYPSA, hay que destacar que incorporaron desde su inicio luminarias dotadas de balastos electrónicos y sistema de comunicación *DALI*, para el control punto a punto de la instalación, obteniéndose desde entonces grandes beneficios derivados de los ahorros por regulación y control y el acceso a todos los datos de consumos e incidencias que han facilitado en gran medida la gestión energética y de mantenimiento de las instalaciones. Además en el año 2009 se comenzó con la incorporación de luminarias LED en algunas de las instalaciones de alumbrado exterior, de guiado e iluminación de embellecimiento, que han posicionado al Grupo Santander como una de las empresas más preocupadas por la eficiencia energética y medioambiental. Todavía hoy, las medidas de eficiencia energéticas aplicadas en la fase inicial del proyecto, siguen vigentes, con resultados realmente satisfactorios.

La Ciudad Grupo Santander cuenta con varios edificios intercomunicados entre sí por una red de superficie y otra subterránea. La comunicación subterránea facilita el acceso del personal del banco a los distintos destinos y está formada por dos viales de dos carriles en cada sentido y separados por una mediana. Estas vías de fabricación en falso túnel dan acceso a los aparcamientos subterráneos de

cada edificio, estando iluminadas originalmente con proyectores de halogenuros metálicos de alta presión de 250W de potencia en disposición pareada en ambos hastiales.

El reto fue propuesto por el responsable técnico de la CGS Miguel Gómez Acebes, quien instó a los técnicos de PHILIPS a realizar una mejora en eficiencia energética en dicha instalación, con la condición de no modificar la instalación eléctrica existente, en buen estado y reduciendo así costes de mano de obra y materiales.

8.7.2. Solución

La solución propuesta por los técnicos de PHILIPS atendiendo a dicho reto, consistió en sustituir los antiguos proyectores con lámparas de halogenuros metálicos y vidas medias de 8.000 horas, por proyectores de tecnología LED y vida media de 50.000 horas, arrojando los resultados siguientes:

- Número de puntos de luz sustituidos: 120.
- Luminaria instalada: Proyector CLEARFLOOD BVP650 ECO14000/NW PSU OFR1.
- La vida media de las fuentes de luz pasa de 8.000 a 50.000 horas.
- El índice de reproducción cromática (RA) ha pasado de 60 a 70.
- La temperatura de color pasa de 5.600 K a 4.000 K.
- El encendido pasa a ser instantáneo, incluso en reencendido en caliente.
- El tipo de control pasa de circuitos a control DALI.
- La potencia por punto de luz ha pasado de 278 W a 126 W. Pasando la eficacia lumínica de 55,85 lm/W a 101,1 lm/W.
- La iluminancia media pasa a ser de 61 lux con una uniformidad media del 75%.
- La luminancia obtenida es de 2,61 cd/m² y una uniformidad general del 90%.
- El ahorro anual en consumo energético ha sido de 159.782 kWh.

- Suponiendo un ahorro anual del 54,68% con respecto a la instalación antigua.

Con estos resultados, se espera un retorno de la inversión de 2,4 años según los datos y mediciones facilitados por los técnicos la CGS.

En la Fig. 8.38 se expone el resultado de la simulación lumínica diferenciada en longitudes de onda (colores).



Figura 8.38. Cámaras térmicas.

8.7.3. Conclusión

Una vez más se demuestra la alta eficacia de la utilización de proyectores de LED en aplicaciones de túneles y pasos inferiores, dónde las horas de utilización son elevadas. La posibilidad de control y regulación en las horas de menos uso, da una gran ventaja a la tecnología LED, imposible de conseguir con tecnologías pasadas.

8.7.4. Agradecimientos

Gonzalo García Juarranz Francisco y Javier Martínez Alfonso Sáiz (Philips); Juan Manuel Herrera (responsable instalaciones INABENSA); Miguel Gómez Acebes (responsable instalaciones Banco Santander).

8.8. Otros casos: Reforma del túnel de Bruc. (Fuente: Philips Ibérica)

8.8.1. Introducción

El túnel del Bruc, está situado en el PK 565 de la A-2 en la provincia de Barcelona, consta de dos tubos unidireccionales de tres carriles, con una longitud total de 1.941 m, anchura media de 11,50 m. siendo su IMD de 78.000 vehículos/día.

El alumbrado de refuerzo de bocas, está realizado mediante proyectores con equipo de SAP de doble óptica. Utilizando igual tipo de luminaria, para el alumbrado permanente del T2 (sentido Lleida) y equipos fluorescentes con distribución en continuo en el T1 (sentido Barcelona).

Las medidas de ahorro implementadas en el conjunto de la instalación se han basado en dos actuaciones conjuntas:

- Implantación un nuevo alumbrado permanente.
- Modernización de los sistemas de gestión, supervisión y control.

Alumbrado permanente.

La decisión tomada fue la instalación de Implantación en los dos tubos del túnel (T1+T2), de luminarias LED modelo Tunlite (4.000 K) de PHILIPS, para alumbrado interior permanente, con regulación del flujo luminoso mediante bus 1-10 V. gestionado por GTC para adaptación de los niveles lumínicos a las densidades del tráfico y condiciones de seguridad.

A continuación (Fig. 8.39), se describen los resultados de los ensayos realizados y que justifican los ahorros de energía y los resultados lumínicos para cada una de las posiciones de regulación previstas.



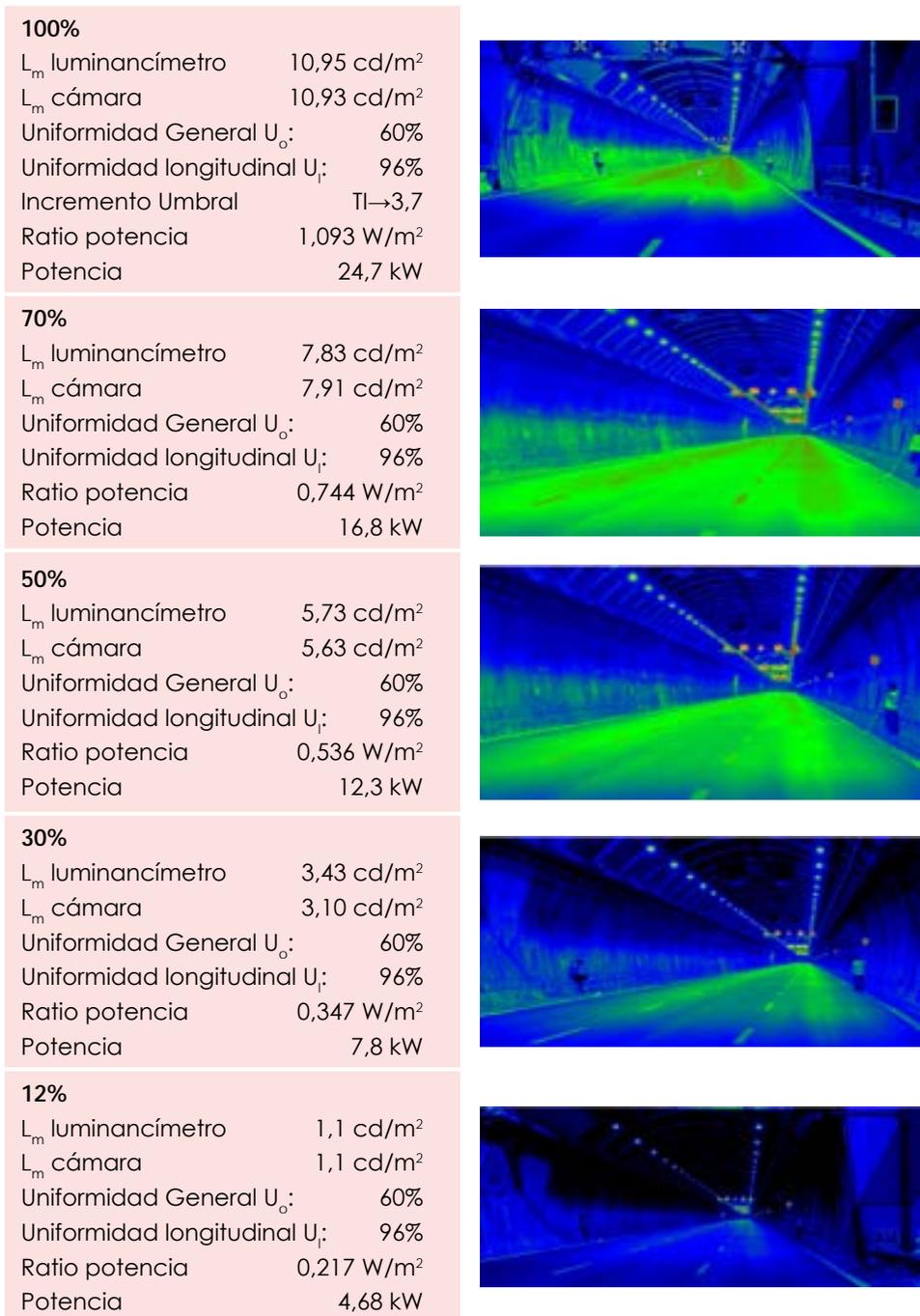


Figura 8.39. Resultado de los ensayos.

En las fotografías de la Fig. 8.39 se presentan los resultados de los valores puntuales y globales, obtenidos mediante cámara digital sin ganancia automática, desarrollada para valoración de imágenes en luminancias, modelo Canon E350 D, con lente 2016339 de 18-50 mm Focus 280 mm *inf.*

Como se puede apreciar en los resultados, otra ventaja añadida a la regulación frente a otras soluciones, es la excelente uniformidad longitudinal en todos los casos, así como la mejora en la vida útil del conjunto, al trabajar el dispositivo LED a bajos regímenes de intensidad.

8.8.2. Modernización de los sistemas de control, regulación y supervisión

Para la reforma en este aspecto se tomaron las siguientes decisiones:

- Gestión de la iluminación de refuerzo en bocas mediante la instalación de doble luminancímetro e integración al sistema de gestión técnica centralizada (GTC).
- Reducción de la velocidad de entrada, de 90 km/h a 80 km/h, con opción de variar las condiciones desde la GTC, en caso de necesidades técnicas, climáticas o de seguridad.
- Desconexión selectiva centralizada de líneas de alimentación en refuerzo de bocas, justificando las condiciones de uniformidad reglamentarias.
- Incorporación de luxómetros en hastiales, con medición en continuo cada 150 m para visualización y supervisión desde el centro de control (GTC).
- Implantación de luminarias LED para rótulos, balizados y alumbrado fijo en galerías de evacuación.
- Implantación de luminarias LED en alumbrado exterior con sistema de regulación mediante bus de regulación 1-10 V, modificando los niveles lumínicos en función de las necesidades horarias y del tránsito.
- Implantación de detectores volumétricos en alumbrado general en galerías de evacuación.

Como consecuencia de lo anterior, los ahorros obtenidos se pueden ver reflejados en los siguientes datos (Tabla 8.12) correspondientes al alumbrado permanente.

Tabla 8.12. Comparación estado nuevo/ antiguo.

ZONA	INSTALACIÓN ANTIGUA	INSTALACIÓN NUEVA (2013)
Alumbrado T1	1.862 fluorescentes 51 W	222 x Tunlite PHILIPS Led 105 W
Alumbrado T2	168 SON-T 128 W	168 x Tunlite PHILIPS Led 105 W
Potencia TOTAL	117 kW	41 kW
Energía consumida	1.816.768 kWh	1.000.517 kWh

Se adjunta un gráfico (Fig. 8.40) de evolución de consumos reales hasta la fecha y previstos para los siguientes años en el que se aprecia su evolución favorable.

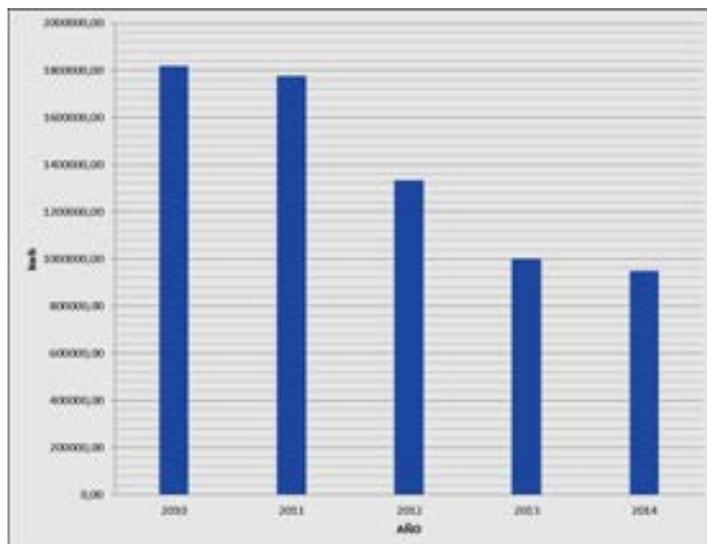


Figura 8.40. Evolución.

8.8.3. Resultados en horario nocturno

Los resultados obtenidos en horario nocturno fueron:

(De 11:00 pm a 6:00 am) - 1,1 cd/m²

Potencia alumbrado interior túnel	(T1)...	4,68 kW
.....	(T2)...	3,46 kW
Potencia alumbrado exterior.....		1,60 kW
Potencia sala control-almacén-taller		6,81 kW
Potencia antigua instalación (t1 + t2)		117 kW

8.8.4. Coste de la instalación. Amortización

En la evaluación de costes de la nueva instalación en el túnel del Bruc se obtuvieron los siguientes resultados:

Ahorro anual energía respecto antigua instalación	816.251 kWh/año
Coste ahorro energía (0,1587 €/kWh).....	129.539 €/año
Coste punto luz LED con p.p. reforma instalación.....	1.295 €/Ud.
Número de puntos instalados.....	390 Uds.
Importe instalación	481.650 €
Periodo de amortización.....	3,89 años

8.8.5. Conclusiones

Las conclusiones extraídas de las operaciones de mejora en iluminación para el túnel del Bruc se resumen en los siguientes puntos:

- En nuevos proyectos de túneles y cuando las condiciones económicas lo permitan, debería estudiarse la posible opción de realizar el alumbrado de bocas con LED de alta potencia y regulación variable de flujo, variando la distancia de montaje entre todos los proyectores, con el fin de conseguir una óptima adaptación a la curva CEI.
- En reformas y modernizaciones de instalaciones, planes de ahorro energético o nuevos proyectos en túneles, debería plantearse como opción idónea para el alumbrado permanente, el implantar luminarias LED con sistema de regulación de flujo variable en función de las condiciones del tráfico u otros condicionantes de seguridad requeridos.
- La opción de utilización de doble luminancímetro L_{20} . Es aconsejable siempre que la instalación de refuerzo de bocas, cumpla con los requisitos técnicos y de conservación que justifiquen un ahorro energético.
- Es importante, que la gestión del sistema de alumbrado, al igual que los restantes subsistemas, se lleve a cabo mediante una adecuada supervisión técnica centralizada. La cual mediante los algoritmos de control, deberá justificar y conseguir un óptimo funcionamiento, junto con la posibilidad mediante módulos de control local y remoto de la visualización, y la fiscalización de los resultados reales por parte del responsable de la Propiedad, y de la gestión energética y de conservación, por la Empresa adjudicataria de la explotación.
- Dado el importante coste de la inversión inicial que representan las instalaciones de alumbrado en los túneles, al igual que el de conservación y energético, es preciso que al considerar la opción de cálculo inicial para definir los valores lumínicos requeridos, se tenga muy en cuenta, las condiciones mínimas necesarias, en lo que a seguridad, costes de inversión, conservación, gasto energético y situación económica actual se refiere.



Fundación de la Energía
de la Comunidad de Madrid

Energy Management Agency
Intelligent Energy Europe

www.fenercom.com

