

Metodología para el análisis de los ahorros de energía en el alumbrado de túneles de carretera



Energy Savings Methodology for Road Tunnel Lighting

Comité de Túneles de Carretera
Asociación Técnica de Carreteras

Resumen

En el presente artículo, el Comité de Túneles de la ATC presenta una metodología que permite analizar las modificaciones que se podrían implantar en el alumbrado de un túnel en servicio para incrementar su eficiencia energética, manteniendo las condiciones de seguridad, facilitando la valoración de los costes de implantación y de los ahorros que se producirán en el consumo. Esta metodología permite evaluar de manera eficaz y fiable diversas medidas que puede ejecutar el explotador y elegir aquellas que sean más rentables y que proporcionan un mayor retorno de la inversión o un menor tiempo de amortización. Para facilitar su interpretación se incluye un ejemplo práctico y real de aplicación de la metodología presentada y que muestra cómo, en determinados casos, se pueden obtener importantes ahorros energéticos con pequeñas actuaciones, manteniendo los niveles de iluminación requeridos por la normativa de aplicación.

Asimismo se repasan los factores que influyen en el alumbrado de un túnel y se destacan diversas actuaciones que pueden desarrollar las empresas explotadoras, con sus propios medios, para mejorar la eficiencia energética de la instalación. Por último se realizan diversas recomendaciones en relación con los criterios que deben aplicarse en el diseño del alumbrado de un túnel de carretera con el fin de mejorar su eficiencia energética, manteniendo las condiciones de seguridad.

Abstract

In this paper, the Tunnels Committee of the Spanish Road Association (ATC after its initials in Spanish) presents a methodology that allows analyzing the modifications that could be implemented in the lighting of a tunnel in service to increase energy efficiency while maintaining safety conditions, improving the assessment of implementation costs and savings that will result in operational. This methodology allows evaluating efficiently and reliably various measures that can be run by the operator and choosing those that are most profitable and that provide a greater return on investment or a shorter payback period. To make its interpretation easier, a practical and realistic application example of the methodology presented is included in the paper. It shows how, in certain cases, significant energy savings can be achieved with small actions, maintaining lighting levels required by the applicable regulations.

Additionally, the paper reviews factors influencing the lighting of a tunnel and various activities that can develop operating companies with their own means to improve the energy efficiency of the facilities. Finally, a number of recommendations are made regarding the criteria to be applied in the design of the road tunnel lighting in order to improve energy efficiency while maintaining safety conditions.

Prólogo

(Por Rafael López Guarga, presidente del Comité Técnico de Túneles de la Asociación Técnica de Carreteras)

Uno de los objetivos que se marcó el Comité de túneles de la Asociación Técnica de Carreteras para el ciclo 2012-2015, recién finalizado, fue el de analizar el estado del arte de la iluminación de los túneles para poder emitir unas recomendaciones que mejoren la eficiencia de esta instalación, sus condiciones de mantenimiento, la uniformidad en el rendimiento y su fiabilidad y, en definitiva, la reducción del consumo eléctrico y por tanto la mejora de la factura por este concepto. Para ello se creó un grupo de trabajo que abordase este asunto y fruto de ello fue el artículo “Consideraciones del Comité de Túneles de la ATC sobre el empleo de tecnología led en el alumbrado de túneles”, publicado en esta revista en su nº 154 de enero-marzo de 2013, y el que a continuación se presenta bajo el título “Propuesta del Comité de túneles de la ATC de una Metodología para el análisis de los posibles ahorros de energía en el alumbrado de túneles de carretera”.

Aunque recientemente se han aprobado por parte de la Dirección General de Carreteras del Ministerio de Fomento las “Recomendaciones para la Iluminación de túneles”, el Comité de túneles ha querido exponer su punto de vista sobre los criterios de proyecto del alumbrado al objeto de reducir el consumo de energía sin afectar a la seguridad en la circulación, estableciendo para ello una metodología basada en la revisión de los cálculos, en la comprobación, medición y verificación en el campo, en un ajuste de los diferentes parámetros, en un análisis de las distintas actuaciones a llevar a cabo y en un estudio económico. Posteriormente se aplica la metodología a un caso práctico y se extraen una serie de recomendaciones y conclusiones.

1. Introducción

El alumbrado de los túneles es una de las instalaciones que más contribuye al confort y a la seguridad vial al circular por los mismos. Debido al elevado consumo energético que representa se procura obtener una óptima eficiencia en su proyecto, instalación y mantenimiento.

En este artículo se recogen algunas consideraciones del Comité de Túneles de la Asociación Técnica de Carreteras (ATC) con la finalidad de incrementar la eficiencia energética en los túneles en servicio.

Se centra fundamentalmente en las medidas que podría adoptar el conservador – explotador con sus propios medios, sin abordar aquellas otras que requieren una actuación de mayor calado o que solamente pueden acometerse adecuadamente en la etapa de proyecto o ejecución.

También se incluyen unas consideraciones sobre las normativas de aplicación y los niveles en ellas establecidos,

proponiendo mejoras en el proyecto, explotación y mantenimiento del alumbrado que se considera pueden repercutir en disminuir el consumo de energía sin que por ello se produzca menoscabo o disminución en la seguridad.

2. Metodología para establecer los posibles ahorros de energía en el alumbrado de túneles en servicio

A continuación se propone una metodología para analizar las diversas medidas, basadas en la buena práctica, que se pueden adoptar con el objeto de reducir el consumo de energía eléctrica en el alumbrado de un túnel en servicio:

2.1 Revisión de los cálculos de alumbrado

En primer lugar se deben revisar los cálculos del alumbrado del túnel, verificando las hipótesis que se consideraron en su proyecto, que pueden coincidir o no con las condiciones reales de explotación. Se debe considerar que la situación a lo largo de la vida del túnel cambia y que los cálculos se hacen antes de la instalación, previendo un factor de conservación, generalmente muy estricto, que se alcanzaría, en todo caso, pasados muchos años. A efectos de una gestión eficaz de la energía, ya en la fase de cálculo de proyecto se debería considerar esta circunstancia y adaptarla a la situación real.

2.2 Comprobación de la distribución de luminarias

Se debe verificar “in situ” la potencia de las lámparas, así como el modelo, posición, altura, interdistancia y orientación de las luminarias dispuestas en el túnel para conocer si la instalación se ejecutó de acuerdo con los parámetros definidos en el proyecto de alumbrado así como las posibles modificaciones introducidas durante la explotación al objeto de poder comparar adecuadamente los valores medidos en campo con los previstos en proyecto.

2.3 Medición de la iluminación real

Se debe medir la distribución de luminancias o iluminancias en las distintas zonas del túnel con los distintos niveles activados. Para optimizar los trabajos se recomienda que al menos se realicen estas medidas en las zonas que más energía consumen, que son la zona umbral con el nivel soleado (mayor potencia instalada) y la zona interior (por su condición de encendido permanente).

Las mediciones se pueden realizar mediante luxómetro (medición de la luz que llega a la calzada y cuya unidad es el lux) o luminancímetro (medición la luz que refleja la calzada en dirección al conductor y cuya unidad es la cd/m²) aunque en este último caso deberá prestarse especial atención al estado del pavimento. Desde el punto de vis-



Mediciones del alumbrado



Túnel de Campo (unidireccional). N-260 Huesca



Túnel de San Simón (bidireccional). A-2 Huesca

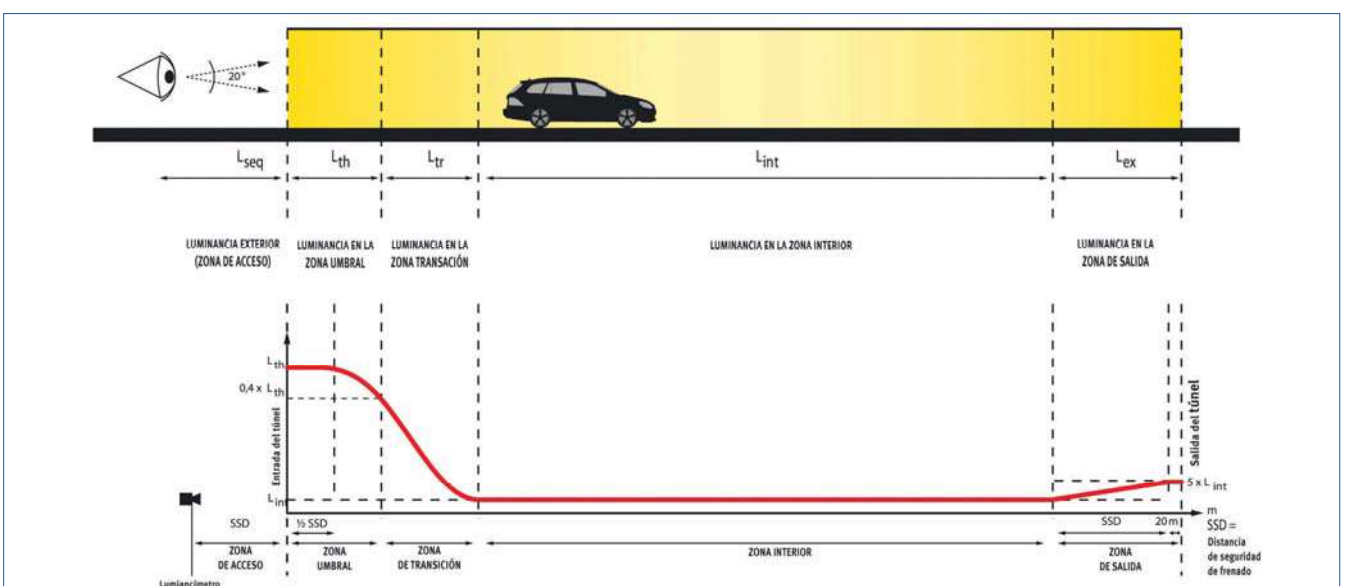
ta práctico la mayor parte de comprobaciones y ajustes se pueden realizar a partir de los valores de iluminancia medidos con el luxómetro ya que es una medida objetiva, más fácil y rápida de realizar que con el luminancímetro.

El procedimiento de medida está claramente explicado en diversas normativas, concretamente en el 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. En síntesis, consiste en medir la luminancia o iluminancia en los puntos de una cuadrícula a partir de los cuales

se verifican los valores medios del área y las uniformidades globales y longitudinales alcanzadas. Especial importancia tiene el que la rejilla empleada disponga de un adecuado número de puntos de medición y su distribución respecto a las luminarias y a los carriles de circulación.

2.4 Cálculo de los niveles de iluminación necesarios

Dado que el proyecto de alumbrado de un túnel se suele realizar antes de la ejecución del mismo, conviene volver a calcular los niveles de alumbrado que son necesarios en



Zonas alumbrado y distribución de luminancias

las distintas zonas según la norma de aplicación y con los parámetros reales del túnel (IMD, distancia de seguridad, % vehículos pesados, L20,...). Esto es de especial importancia si se tiene en cuenta que en fase de proyecto se suelen realizar hipótesis conservadoras y con un horizonte muy lejano correspondiente a la vida útil prevista.

En primer lugar conviene medir el valor L20, luminancia percibida por los conductores al acercarse al túnel, que suele ser determinante para fijar los niveles de iluminación necesarios en la zona de entrada. Además, se debe verificar la clasificación del túnel con los valores reales de tráfico y las condiciones de circulación requeridas, que dependen del número de vehículos por carril y hora, de la proporción de vehículos pesados, de la guía visual que aporte el túnel y de la comodidad requerida en la conducción, para obtener, junto con el tipo de alumbrado dispuesto (simétrico o asimétrico), los niveles necesarios en la boca y en el interior del túnel.

2.5 Verificación de los niveles lumínicos exteriores y actuación del control de los distintos niveles de alumbrado

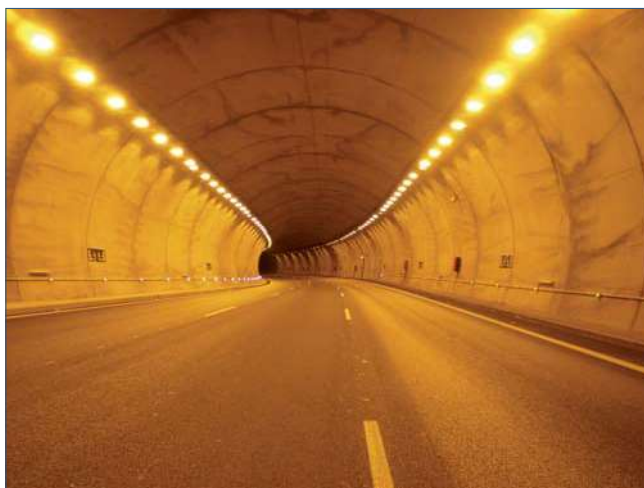
Una parte muy importante del consumo de energía en el alumbrado de un túnel se debe a los refuerzos en la boca de entrada. Es pues de suma importancia que se realice un adecuado control de la activación de los distintos niveles de alumbrado, de acuerdo con las condiciones lumínicas exteriores.

Tal y como se ha indicado anteriormente, los niveles de iluminación de la zona umbral, y como consecuencia de ello en toda la zona de transición, dependen directamente de la luminancia percibida por los conductores al acercarse al túnel, por lo que el control del alumbrado debe realizarse de manera independiente en cada uno de los tubos, en el caso de dos calzadas, a partir de los valores medidos por un luminancímetro dispuesto adecuadamente en las proximidades de la boca de entrada correspondiente.

En caso de disponer de luminancímetro para el control se debe verificar la precisión de sus medidas y que la activación de cada nivel de iluminación se realiza manteniendo la proporción entre L20 y Lth (nivel de luminancia de la entrada) establecida en el proyecto del alumbrado.

En caso de disponer de otros sistemas de control (células fotoeléctricas, relojes,...) se deben analizar las particularidades concretas de cada boca para verificar si existe relación directa entre luminosidad del entorno y luminancia percibida por los conductores, lo que se puede realizar con un luminancímetro portátil. En cualquier caso se recomienda la sustitución de estos sistemas por luminancímetros.

Para mejorar la eficiencia energética de los refuerzos de la boca de entrada es conveniente disponer un elevado número de escalones de encendido, siendo en la práctica complicado su aumento durante la explotación. Normalmente en un túnel nuevo se suele disponer al menos de los niveles soleado, nublado, crepuscular, nocturno y nocturno reduci-



Alumbrado de refuerzo



Alumbrado permanente



Alumbrado en zona de transición

do, aunque convendría incrementar estos escalones en 2 ó 3 más, siendo la situación óptima establecer una regulación continua fácilmente implementable a un bajo coste mediante reguladores de flujo dispuestos en cabecera.

Todas estas actuaciones requieren que se realice una medición de la L20 de cada boca del túnel, en diversas épocas del año y a distintas horas, con el objeto de verificar

su valor máximo de proyecto y facilitar las estimaciones de encendido de cada uno de los niveles de alumbrado.

2.6 Cálculo de la distribución de iluminación y ajuste de parámetros

Con la distribución real de luminarias dispuestas en el túnel, verificada en campo, se deben realizar los cálculos lumínicos teóricos del mismo. Se recomienda emplear alguno de los programas disponibles de iluminación de túneles.

Los valores obtenidos se pueden comparar directamente con los medidos “in situ”, en las distintas zonas del túnel, con el objetivo de verificar la bondad de los cálculos teóricos y de las mediciones realizadas. Como norma general, será necesario repetir el cálculo con diversos factores de mantenimiento de la instalación hasta alcanzar la distribución teórica que mejor se adapte a las mediciones realizadas.

En el caso de que los valores teóricos y los medidos “in situ” no se aproximaran suficientemente deberán analizarse los motivos de la desviación, que normalmente corresponderán a la instalación de luminarias con una distribución distinta a la considerada, lámparas en mal estado en la zona de medida, problemas en la instalación o en los equipos auxiliares, mal estado del pavimento o estado no uniforme (en el caso de haber realizado las mediciones en luminancias),...

Una vez que se haya conseguido modelizar con suficiente precisión el alumbrado (coincidencia de los valores teóricos y los medidos “in situ”), se dispondrá de una herramienta adecuada para analizar las variaciones en la luminancia media y en las uniformidades del alumbrado en función de las diversas medidas posibles de actuación. Estas medidas pueden ir en dos sentidos:

- Medidas que incrementen los niveles de alumbrado, como pueden ser mejorar el mantenimiento de la instalación, para aumentar el factor de mantenimiento (en consecuencia aumentarían los niveles medios), optimizar los ángulos de orientación de las luminarias (en determinados casos se podrían mejorar las luminancias percibidas por los conductores o la uniformidad),...
- Reducción del consumo mediante la sustitución de lámparas por otras de menor potencia o el apagado de determinadas luminarias. Esta medida debe ser considerada con prudencia dadas las implicaciones a las que puede dar lugar: efecto flicker, uniformidad,...

2.7 Posibles actuaciones para incrementar los niveles de iluminación o su eficiencia energética

De entre las distintas posibilidades para mejorar el alumbrado de un túnel en explotación, a continuación se indican aquellas que pueden ser asumidas por el explotador con el objeto de obtener una mayor eficiencia energética,



Alumbrado con Led en el túnel de calzadas superpuestas de la M40



Túnel de Papers. C-60. Barcelona

que permitirán posteriormente mayores reducciones del consumo. Se omiten aquellas medidas que requieran complicadas actuaciones o inversiones desproporcionadas para el resultado esperado o que son difíciles de acometer con el túnel en servicio (más adelante se recoge una lista exhaustiva de todas las medidas posibles):

- limpieza de luminarias,

- sustitución de lámparas,
- sustitución de balastos o equipos auxiliares,
- cambio de balastos normales por otros electrónicos,
- optimización de los ángulos de orientación de las luminarias,
- instalación o mejora de los sistemas de reducción de flujo del alumbrado permanente,
- limpieza, pintado de hastiales o colocación de paneles de acero vitrificado,
- sustitución de células fotoeléctricas de control por luminancímetros.

2.8 Posibles actuaciones para reducir el consumo energético del alumbrado de un túnel en servicio

De acuerdo con lo anteriormente indicado se debe proceder a:

- medir la distribución del alumbrado en las distintas zonas del túnel para los distintos niveles de iluminación establecidos,
- desarrollar un modelo teórico ajustado al alumbrado dispuesto en el túnel,
- estimar los incrementos que se podrían alcanzar con distintas actuaciones,
- calcular los niveles que se deberían disponer en cada una de las zonas con los valores en explotación.

Finalmente habría que verificar si los niveles de iluminación del túnel obtenidos con el alumbrado disponible, con las posibles mejoras que se puedan abordar durante la explotación, son mayores que los requeridos y por tanto decidir si es posible reducir la utilización de parte del alumbrado con el consiguiente ahorro de energía.

Las medidas encaminadas a incrementar la eficiencia energética, bien porque incrementen los niveles obtenidos o porque reduzcan el consumo de energía, que se deben analizar para conocer su posible implantación a las condiciones concretas del túnel en explotación, son las siguientes:

- mejoras del mantenimiento para incrementar el factor de mantenimiento (FM) considerado: limpiezas periódicas, sustitución de todas las lámparas y equipos auxiliares al alcanzar su vida útil, ...
- optimización de la orientación de las luminarias,
- cambio de elementos auxiliares por otros de mayor rendimiento,
- sistemas de reducción de flujo de las luminarias,
- incremento, si es posible, del número de escalones de los niveles de iluminación o establecimiento de un sistema de regulación continuo,
- mejoras en el control de los distintos niveles de iluminación, bien por los sensores dispuestos o por el ajuste de la activación de los distintos niveles o por considerar en el mismo otros factores (por ejemplo variaciones en la intensidad del tráfico o condiciones de explotación en determinadas horas o épocas del año),



Operarios reemplazando una luminaria



Instalación experimental de luminarias Led en el túnel de San Simón. A-2. Huesca

- mejoras en los paramentos para incrementar los coeficientes de reflexión (por ejemplo limpieza de hastiales).

En el caso en el que el nivel de alumbrado dispuesto, una vez consideradas las medidas anteriores que se elija aplicar, sea mayor que el necesario, se plantearán una serie de actuaciones, que deberán ser analizadas para determinar la conveniencia o no de su implantación en fase de explotación, debiendo verificarse en todas ellas, mediante el modelo de cálculo establecido, que se mantienen los niveles y uniformidades requeridas en las condiciones de explotación. Estas actuaciones son las siguientes:

- Cambio de lámparas por otras de menor potencia. Se debe analizar si las luminarias permiten esta posibilidad y en qué medida. Esta es una de las mejores soluciones ya que reduce el consumo y el nivel medio y no suele afectar apreciablemente a las uniformidades obtenidas.
- Apagado parcial de luminarias. Es una medida sencilla y barata, pero debe analizarse con cuidado si el apagado es solamente en determinados momentos, en cuyo caso hay que resolver el procedimiento de activación

de dicha condición, o de forma continua, debiéndose comprobar en todo caso que las uniformidades no caigan por debajo de los valores mínimos establecidos.

Otras medidas encaminadas a producir un ahorro en la factura eléctrica, que no suponen un ahorro de energía consumida, podrían ser las siguientes:

- optimización del término fijo de potencia contratada,
- análisis del coste con diferentes tarifas eléctricas,
- posibilidad de unificar los distintos suministros del túnel,
- revisión del coste de la energía reactiva y posibilidades de corrección de este factor.

2.9 Análisis económico de las distintas medidas de ahorro posibles

Una vez consideradas todas las medidas que pueden ser viables en un túnel en explotación, se debe proceder al análisis de los costes iniciales y periódicos para su implantación y a su comparación con el ahorro energético que se pueda alcanzar. A continuación se resumen los principales costes a analizar:

- coste inicial de actuación: ajuste de luminarias, implantación de sensores o elementos de control, modificación de la instalación, sustitución de luminarias o balastos, ... Deben quedar incluidos los costes derivados de los necesarios cortes de carril,
- costes periódicos. Son los relacionados con el mante-

nimiento de la instalación para que perduren en los parámetros lumínicos y de eficiencia establecidos. En caso de elegir un Factor de Mantenimiento muy alto se deberán realizar frecuentes limpiezas de las luminarias y reducir el periodo establecido para el cambio de las lámparas. En todo caso se desaconseja esperar al cambio de luminarias y equipos auxiliares a cuando se produzca su fallo o avería ya que si se hace de esta forma se suelen obtener niveles y uniformidades inferiores a los requeridos y unos consumos mayores de energía de los necesarios. En estos costes también se deben incluir los cortes de carril que sean necesarios,

- ahorro de energía. Se debe analizar el ahorro que supondrán en la factura eléctrica todas las medidas planteadas,
- se deben considerar otros factores no cuantificables económicamente y que suponen ventajas para la explotación (por ejemplo: aunque no se reduzca el consumo, si se mejora la eficiencia energética se tendrá mejor iluminación del túnel) o para el entorno (no es necesario extenderse en la conveniencia para el medio ambiente de reducir el consumo de energía aunque no supusiera un importante ahorro económico) o en los factores de sostenibilidad de la explotación.

3. Aplicación de la metodología propuesta a un caso práctico

A continuación se expone un caso analizado recientemente con la metodología propuesta. Se recoge únicamente la parte correspondiente al alumbrado interior.

El túnel dispone de luminarias de 150 W de VSAP, colocadas al tresbolillo con una interdistancia de 14 m. Según el proyecto es necesario obtener 6 cd/m^2 y se considera un Factor de Mantenimiento de 0,7. La instalación dispone de reducción de flujo para horas nocturnas de bajo tráfico.

Según las mediciones realizadas y el modelo teórico de cálculo se dispone de un Factor de Mantenimiento de 0,8 y valores de alumbrado mayores que los establecidos en el proyecto, verificando que la orientación de las luminarias es óptima. Por tanto no es necesaria ninguna actuación inicial para mejorar el rendimiento de la instalación.



Iluminación Led al 100 % de la potencia



Mismo tramo anterior, iluminación Led al 10%



Ejemplo disposición de luminarias



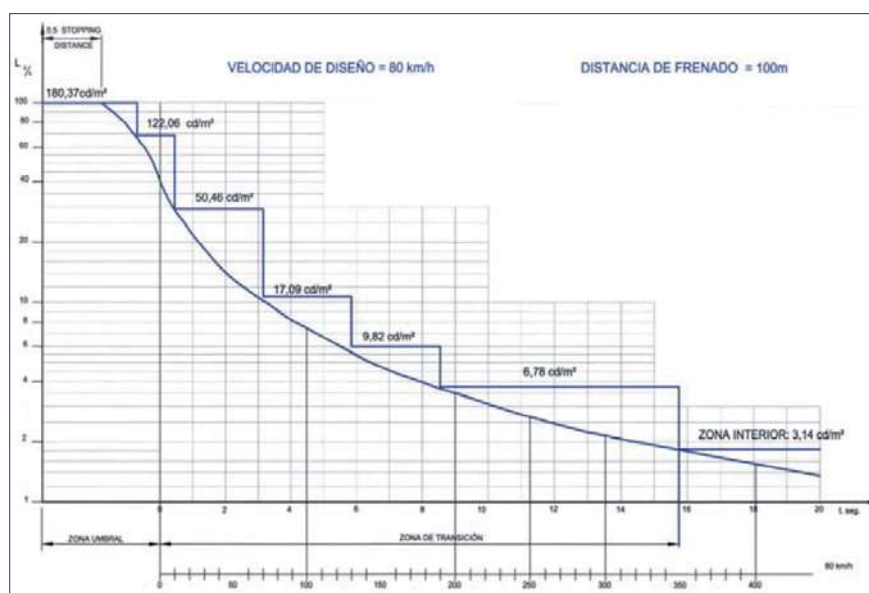
Iluminación zona umbral con VSAP

Con las condiciones de explotación se comprobó que sólo era necesario un nivel de 4 cd/m^2 durante el día y de 2 cd/m^2 durante la noche.

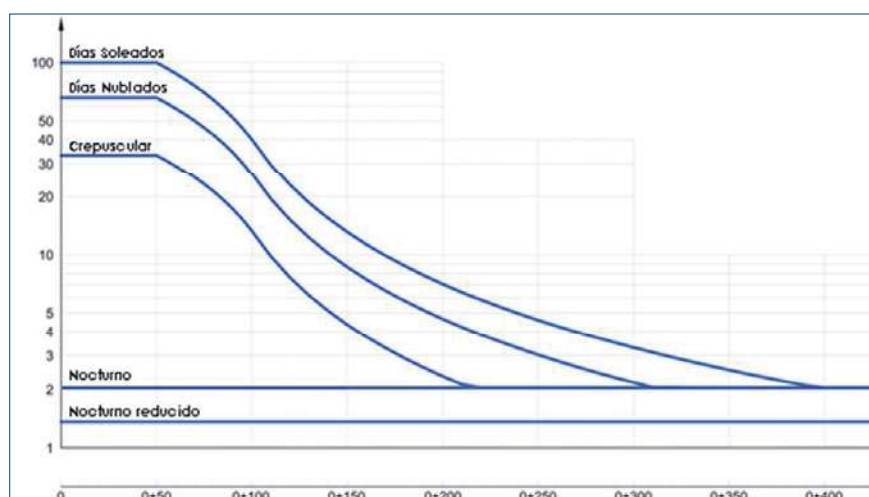
Se comprobó que las luminarias instaladas aceptaban lámparas de 100 W, verificando que los valores obtenidos con ellas mantenían los niveles por encima de las 4 cd/m^2 establecidas y las uniformidades se mantenían prácticamente como las actuales.

El ahorro de energía que se alcanza con el cambio de lámparas es del 33 % de la energía consumida en el alumbrado permanente por lo que para el caso analizado, suponiendo 6 horas de reducción de flujo, que era lo programado en el túnel, y considerando el consumo de la lámpara y no el de la luminaria al no conocer experimentalmente dicho valor y no afectar a la comparación entre las dos situaciones, se obtiene lo siguiente:

Consumo anual inicial: $1000 \text{ m} / 14 \text{ m entre lámparas} \times 2 \text{ laterales} \times (150 \text{ W lámpara} \times 18 \text{ horas encendido sin reducción} + 90 \text{ W lámpara con reducción de flujo} \times 6 \text{ horas}) \times 365 \text{ días} = 168\,628 \text{ kWh por km de tubo del túnel y año.}$



Curva de luminancia teórica y proyectada a lo largo de un túnel

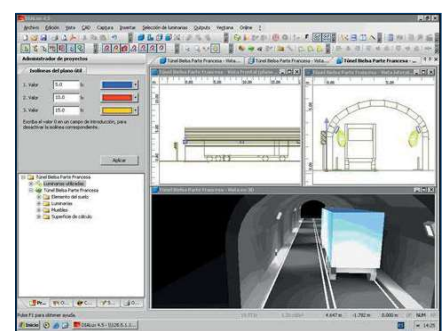


Ejemplos de distintos niveles de iluminación para un túnel

Considerando un valor de $0,12 \text{ € el kW hora consumido}$ (al estar liberalizado el mercado de la energía se debe verificar el coste en cada caso y las posibilidades de negociación para mejorar dicho valor) se obtiene un coste de unos $20\,000 \text{ € año / km por tubo de túnel}$ y de efectuarse el cambio de luminarias un posible ahorro del 33 % que corresponde a unos $6700 \text{ € año y km de tubo del túnel}$.

El coste de sustitución de todas las lámparas por cada km de tubo es de $143 \text{ luminarias / km} \times 80 \text{ € por lámpara}$ (incluyendo corte carril, material, personal, maquinaria y limpieza de luminaria) = $11\,440 \text{ €}$. En este caso, dada la necesidad de cambiar todas las lámparas cada dos años y medio, no conviene adelantar el cambio programado ya que su amortización es de dos años, coincidente con su vida útil.

Como se puede observar, el coste de la energía es un parámetro de gran importancia en el análisis económico, lo que hace que en el caso estudiado no sea rentable realizar de manera inmediata el cambio de lámpara. No obstante se decidió sustituir las lámparas de 150 W por otras



Simulación luminotécnica



Luminarias basadas en lámparas LED

de 100 W en el próximo cambio establecido en el plan de mantenimiento. También se obtiene un pequeño ahorro adicional en el coste de la lámpara.

Se mantuvieron las recomendaciones de limpieza periódica de las luminarias y de cambio de todas ellas cada 20 000 horas de funcionamiento (que en la práctica lleva a su cambio cada dos años y medio, al estar encendidas las 24 horas del día todo el año, que corresponde a 8760 horas año) y de los elementos auxiliares al alcanzar la vida útil indicada por el fabricante.

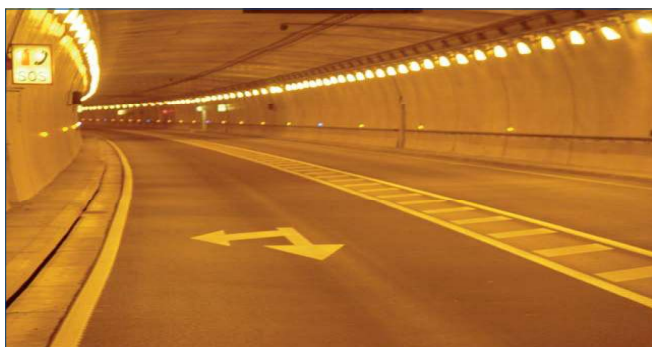
4. Resumen de los parámetros y elementos que afectan al alumbrado de un túnel

A continuación se relacionan los factores que influyen en las necesidades de iluminación de un túnel y en la obtención de los distintos valores. En fase de proyecto se puede analizar la influencia de cada uno de ellos, pero para un túnel en servicio las posibilidades suelen reducirse a las desarrolladas en los apartados anteriores:

- velocidad de proyecto,
- distancia de seguridad,
- túnel unidireccional o bidireccional (algunos túneles bidireccionales con pilares intermedios podrían con-



Túnel de Petralba. N-260. Huesca



Túnel hispanofrancés de Somport

vertirse en unidireccionales disponiendo un muro de cierre continuo, lo que disminuye el alumbrado necesario),

- vehículos / hora / carril,
- % de vehículos pesados,
- guiado visual,
- comodidad de conducción requerida,
- luminancia percibida por los conductores al acercarse al túnel (se puede modificar oscureciendo el entorno o disponiendo paralúmenes),
- tipo de alumbrado dispuesto (simétrico o a contraflujo),
- reproducción cromática en alumbrados simétricos,
- reflectancia del pavimento,
- reflectancia de los paramentos verticales,
- modelo de luminaria y curva de distribución lumínica,
- potencia y modelo de lámpara,
- distribución y orientación de luminarias,
- factor de mantenimiento previsto,
- sensor de luminancia en la boca de entrada y control de alumbrado,
- escalones dispuestos en los niveles de alumbrado (entre los que se incluyen los sistemas de reducción de flujo),
- ajuste del alumbrado a la curva de adaptación de forma continua o escalonada.

5. Recomendaciones en los criterios de proyecto del alumbrado al objeto de reducir el consumo de energía

Al objeto de reducir el consumo de energía en los túneles, sin afectar a la seguridad en la circulación, se realizan algunas recomendaciones para el proyecto del alumbrado que influyen en él de manera muy importante (algunos de estos aspectos se recogen en las "Recomendaciones para la Iluminación de Túneles", de febrero de 2015, de la Dirección General de Carreteras del Ministerio de Fomento):

- La distancia de seguridad debería considerarse con pavimento húmedo sólo en la zona umbral y en la de transición, debiendo ser en la zona interior la correspondiente a pavimento seco.
- En túneles largos debería permitirse continuar la reducción del nivel de iluminación, de acuerdo con la curva de adaptación, hasta valores de 2 cd/m^2 e incluso menores, por el día.
- El nivel del alumbrado en el interior del túnel debería considerarse, salvo casos excepcionales, de 1 cd/m^2 , permitiéndose su reducción en horarios de bajo tráfico hasta $0,5 \text{ cd/m}^2$.
- En alumbrados con buena reproducción cromática el nivel requerido para el alumbrado simétrico debería reducirse hasta valores iguales o próximos al considerado para alumbrado a contraflujo.



VSAP en Somosierra



VSAP en calzadas superpuestas de M-40

6. Conclusiones

De todo lo expuesto se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- Se debe revisar si los valores e hipótesis considerados en el proyecto de alumbrado se corresponden con los reales de explotación. Se debe comprobar si se fue conservador o si las previsiones de tráfico no han sido alcanzadas todavía, ya que es posible que se estén utilizando mayores niveles de los requeridos.
- Conviene medir el alumbrado realmente obtenido en la calzada del túnel en las distintas zonas y con los distintos niveles de activación para poder analizar si tiene un adecuado rendimiento y si se pueden proponer actuaciones que lo mejoren.
- Se debe revisar el plan de mantenimiento existente para optimizar los medios disponibles y el factor de mantenimiento (FM) real de la instalación, de forma que el rendimiento sea siempre el adecuado.
- Se deben analizar las posibles medidas de mejora de la eficiencia energética, de reducción del consumo y de disminución del importe de la factura, de forma que se puedan asumir y amortizar con los medios propios del explotador, muchos de ellos descritos en este artículo, y analizar la conveniencia o no de su aplicación a cada caso concreto.
- Muchas posibilidades de obtener mejor eficiencia energética en el alumbrado o menores consumos de energía solamente pueden realizarse en las etapas de proyecto y obra, no siendo viable su aplicación durante la fase de explotación.

7. Equipo de redacción

El presente artículo ha sido redactado por un Grupo de Trabajo del Comité de Túneles de la Asociación Técnica de Carreteras, que preside Rafael López Guariga, formado por los siguientes miembros: Juan Manuel Sanz Sacristán (coordinador), Alberto Abella Suárez, Luis Ayres Janeiro, María del Carmen Corral Escribano, Carlos de León Cristóbal, Guillermo Llopis Serrano, Ramón Morera Fauquier, Ángel J. Muñoz Suárez, José Ramón Ochoa Vega, José Manuel Portilla Saiz, Vicente Sebastián Alapont, Enrique Segura Echániz y Enrique Villalonga Bautista.

Las fotografías han sido proporcionadas por: Javier Borja López, José Ramón Ochoa Vega, Ramón Morera Fauquier, Vicente Vilanova Martínez Falero, Juan Manuel Sanz y Eduardo Gutiérrez Cardona.

8. Bibliografía

- [1] 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. BOE 19 noviembre de 2008.
- [2] 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 transeuropea de carreteras. Diario Oficial de la Unión Europea 30 de abril de 2004.
- [3] REAL DECRETO 635/2006, de 26 de mayo, sobre requisitos mínimos de seguridad en los túneles de carreteras del Estado. BOE 27 de mayo de 2006.
- [4] Norma 3.1-IC. Instrucción de Carreteras. Trazado. Ministerio de Fomento.
- [5] Real Decreto Legislativo 339/1990, de 2 de marzo, por el que se aprueba el texto articulado de la Ley sobre Tráfico, Circulación de Vehículos a Motor y Seguridad Vial, publicado en: «BOE» núm. 63, de 14 de marzo de 1990 (derogada por RDL 6/2015 por el que se aprueba texto refundido).
- [6] Orden circular 36/2015 sobre criterios a aplicar en la iluminación de carreteras a cielo a vierto y túneles. Tomo II Recomendaciones para la iluminación de túneles. Dirección General de Carreteras. 2015.
- [7] CIE 88:2004 2ª edición. Informe Técnico. Guía para el alumbrado de túneles de carretera y pasos inferiores. Comisión Internacional de Iluminación (CIE). ISBN 3 901 906 31 2.
- [8] Informe UNE UNE-CR 14380 IN Aplicaciones de iluminación. Alumbrado de túneles. Septiembre de 2007.
- [9] VI Simposio de túneles de carretera. "Explotación Sostenible de Túneles". Zaragoza, 11 a 13 de marzo de 2015.