

Bóvedas de Transición Lumínica en Túneles de Carretera para el Aprovechamiento de la Luz Solar



Light Transition Vault in Road Tunnels for the Exploitation of Sunlight

Ángel García Garay

*Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos del Estado
Ministerio de Fomento*

Antonio Guirao Piñera

*Doctor en Ciencias Físicas
Profesor Titular de Universidad, del Departamento de Física
– Área de Óptica – de la Universidad de Murcia*

Jerónimo Piñera Lucas

*Ingeniero Industrial, Responsable de Seguridad en los
Túneles de la Red de Carreteras del Estado en Murcia
imesAPI – Electromur-Grupo Etra (Grupo ACS)*

Oscar Gutiérrez Bolívar

*Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
Técnicas Avanzadas de Ingeniería y Servicios (Tainser)*

Resumen

Cuando el conductor atraviesa el portal de un túnel experimenta una drástica reducción del nivel de iluminación, que limita su percepción del entorno y de los obstáculos que comprometen su seguridad vial. Este efecto es conocido como “Agujero Negro” y se corrige gracias a la implantación de un gran número de proyectores de elevada potencia, que permiten en el umbral del túnel al conductor adaptar su visión, pero gastan más del 30 % de la energía eléctrica consumida en todo el túnel. Por tanto, la solución es eficaz, pero no muy eficiente, puesto que se podría utilizar la luz solar para realizar la misma transición lumínica, gracias a una estructura metálica perforada, que es el objeto de este artículo, y que reproduce fielmente los niveles de luminancia exigidos por la normativa, pero con un coste inferior al de los proyectores eléctricos, por lo que se consigue un importante ahorro a perpetuidad, que permite amortizar la inversión en 4 años.

PALABRAS CLAVES: túnel, iluminación, bóveda de transición lumínica.

Abstract

When the driver goes through the portal of a tunnel experiences a drastic reduction in the level of illumination, which limits his perception of the environment and obstacles that compromise his road safety. This effect is known as “Black Hole” and can be corrected thanks to the introduction of a large number of high power projectors at the entrance of the tunnel, allowing the driver to adjust his vision, but spending more than 30% of the consumed electric energy throughout the tunnel. Therefore, the solution is effective, but not very efficient, since sunlight could be used for the same light transition, through a perforated metal structure, this is the object of this article, which faithfully reproduces the levels of luminance required by the regulations, but with a lower cost than the electrical projectors, getting significant savings in perpetuity, and enabling investment payback in 4 years.

KEY WORDS: tunnel, lighting, dome.

1. Introducción

Los túneles de carretera son tramos singulares de la vía en los que cambian muy bruscamente las condiciones ambientales de iluminación.

Especialmente en días soleados, los conductores han de realizar un gran esfuerzo en pocos segundos para adaptar su visión desde el exterior del túnel, fuertemente iluminado por la luz solar, hasta la zona interior que se encuentra en penumbra.

Cuantitativamente, en el exterior del túnel, la luminancia en un día soleado puede alcanzar valores de 4.000 candelas por metro cuadrado (cd/m^2), mientras que en el interior del túnel, el nivel de luminancia suele ser de sólo 3 cd/m^2 (véanse figuras 4 y 6).

Este cambio tan brusco del nivel de luminancia puede ocasionar el efecto de “agujero negro” en la percepción de la entrada del túnel por el conductor, que consiste en la pérdida momentánea de visión y de percepción de los objetos que se encuentran en el interior del mismo, con el consiguiente peligro para la seguridad vial (véase figura 1).

Con el fin de paliar este efecto de agujero negro se iluminan fuertemente las entradas de los túneles, para que el contraste con el exterior sea lo menor posible, disponiendo a continuación unas zonas de transición lumínica en las que se va reduciendo paulatinamente el nivel de alumbrado hasta llegar a su valor mínimo en el interior del túnel.

Actualmente este gran nivel de iluminación a la entrada del túnel se suele conseguir mediante proyectores eléctricos de vapor de sodio de alta presión, que en el portal llegan a tener 600 W de potencia, en el caso de alumbrados con los proyectores en disposición cenital (véase figura 2), y de 400 W, en el caso de alumbrados con los proyectores en disposición bilateral (véase figura 3). En ambos casos, los proyectores están muy próximos entre sí, aunque su potencia y concentración se van reduciendo al recorrer la zona de transición.



Figura 1: Efecto “agujero negro” a la entrada de un túnel, paliado mediante proyectores. *Imagen correspondiente al acceso sur del túnel de la variante de Lorca en Murcia.



Figura 2: Iluminación de túnel con proyectores instalados en disposición cenital. *Imagen correspondiente al interior del túnel Loma de Bas de la Autopista AP-7 (tramo Cartagena - Vera).



Figura 3: Iluminación de túnel con proyectores instalados en disposición bilateral. *Imagen correspondiente al interior del túnel de Lorca de la Autovía A-7.

La forma más adecuada para calcular esta reducción progresiva del nivel de luminancia ha sido largamente estudiada por el Comité Internacional de la Iluminación, quien estableció la comúnmente conocida como curva CIE (véase figura 5), que se emplea en toda la normativa vigente. (Véanse figuras 4 y 6).

En la curva CIE se aprecia cómo la zona umbral del túnel se ilumina con un nivel de luminancia L_{th} , que suele ser del orden del 5 al 8 % del nivel exterior, y constituye el nivel máximo de alumbrado en el túnel (100%). Este nivel máximo, de unas 150 cd/m^2 , se mantiene en una longitud igual a la mitad de la distancia de parada, SD , (calculada con tiempo de percepción y reacción de 1 segundo), y a partir de ahí comienza la reducción suave del nivel de luminancia hasta llegar al nivel mínimo del interior del túnel, que se calcula aplicando la normativa vigente (UNE-CR 14380 EN), y suele estar en torno a 3 cd/m^2 durante el día.

Actualmente, gracias a los proyectores eléctricos se consiguen con cierta facilidad los niveles de iluminación calculados a partir de la Curva CIE para realizar correctamente la transición lumínica, por lo que se puede considerar que el procedimiento resulta eficaz, en cuanto que consigue su objetivo, pero no se puede afirmar que sea eficiente, ya que requiere un gran consumo de energía eléctrica, que podría reducirse considerablemente.

Analizando la distribución de proyectores a lo largo de un túnel de cierta longitud (en torno a los 1.500 m), se puede comprobar que aproximadamente el 30 % de la potencia instalada se encuentra en la zona umbral del túnel, para realizar la transición lumínica.

Tomando como ejemplo el túnel Loma de Bas, de la autopista AP-7 en Murcia, se comprueba que el consumo total en iluminación es de 438.000 kWh/año, de los cuales 128.000 kWh/año corresponden a la zona umbral, y suponen, efectivamente, el 30 % del consumo total (véase figura 6).

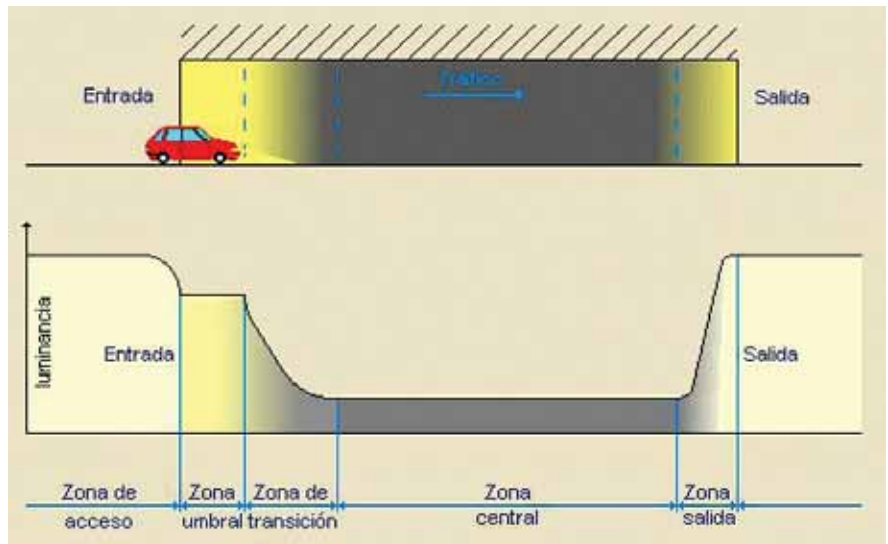


Figura 4: Escalones de luminancia requeridos en un túnel de tráfico unidireccional. *Imagen obtenida del Manual de iluminación de interiores y exteriores de la página web edison.upc.edu/curs/illum/.

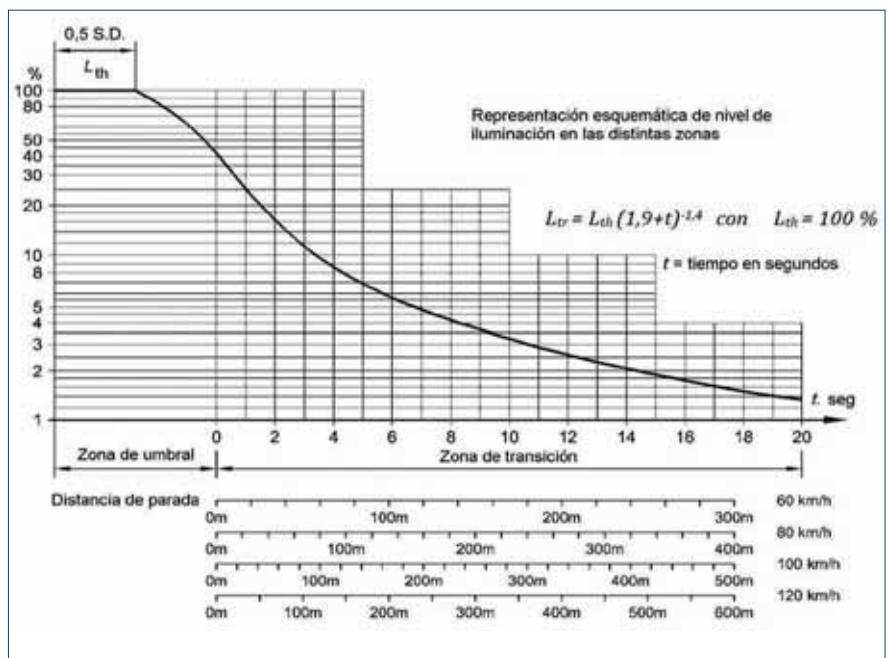


Figura 5: Reducción de la luminancia en la zona de transición. *Imagen obtenida de la Norma UNE-CR 14.380 IN.

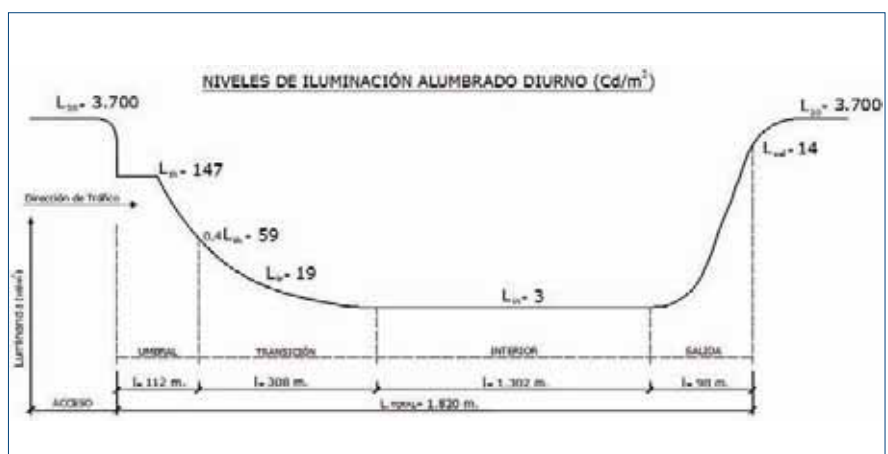


Figura 6: Niveles de luminancia reales en el túnel Loma de Bas de la autopista AP-7.

2. Objeto del Estudio

El objeto de este artículo es mostrar una solución alternativa al sistema de proyectores eléctricos, para conseguir la misma transición lumínica en la zona umbral del túnel que la realizada normalmente por dichos proyectores, pero con un coste menor.

Existen precedentes de actuaciones dirigidas a conseguir la transición lumínica por medios alternativos a la energía eléctrica, como por ejemplo la pérgola construida en el año 1987 en el acceso al túnel de la variante de Lorca, que utilizaba ranuras transversales en una visera construida para proteger frente a posibles desprendimientos, con lo que se conseguía adicionalmente una zona de iluminación intermedia entre el exterior y el interior del túnel, aunque en dicha zona la uniformidad resulta escasa. (véase figura 7).

Más recientemente, se constata el uso de dispositivos que ayudan a la transición lumínica, como los ubicados en las vías urbanas de Valencia (véase figura 9)

Como se puede apreciar, gracias a la pérgola de opacidad creciente en el sentido de la marcha, la luminancia se va reduciendo paulatinamente y ello permite minorar el número de proyectores necesarios para la transición lumínica.

Aunque hay que reseñar que estas pérgolas tuvieron como función principal atemperar el ruido producido por el tráfico en la salida de los pasos inferiores, si bien es cierto que en las mismas fotografías se aprecia una concentración de proyectores inferior a la habitual.



Figura 7: Túnel de Lorca (Murcia).

En otros países también se han aplicado soluciones similares. En ese sentido el Centro de Estudios de Túneles (CETU) del Ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie de Francia, ha realizado también numerosos estudios sobre la iluminación de túneles y sobre formas de iluminación natural mediante aberturas laterales o de cubiertas que por medio de deflectores consigan disminuir el flujo lumínico (véase figura 8). Se han tenido en cuenta problemas como la facilidad de limpieza y de conservación de las soluciones planteadas.

Alternativamente a estos sistemas, en este artículo se propone una bóveda de transición lumínica, ubicada antes del portal del túnel, que por medio de un entramado variable de orificios calculados para tal fin, permita adap-

tar la visión del conductor a las condiciones de iluminación existentes en el interior del túnel.

3. Propuesta

La propuesta consiste en la construcción de una estructura metálica permanente y de bajo coste de mantenimiento, ubicada antes del inicio del túnel, que de forma paulatina reduce la entrada de luz a su través, mediante una reducción equivalente del porcentaje de orificios de su revestimiento, de tal modo que se reproduzcan fielmente los niveles de iluminación fijados por la curva CIE, o por la normativa vigente en su caso, en la zona umbral del túnel (véase figura 10).

La estructura metálica tiene la misma longitud de la zona umbral del túnel (igual a la distancia de parada



Figura 8: Túnel Rond-Point (Saint-Etienne).



Figura 9: Túnel de la Avda. General Avilés (Valencia).

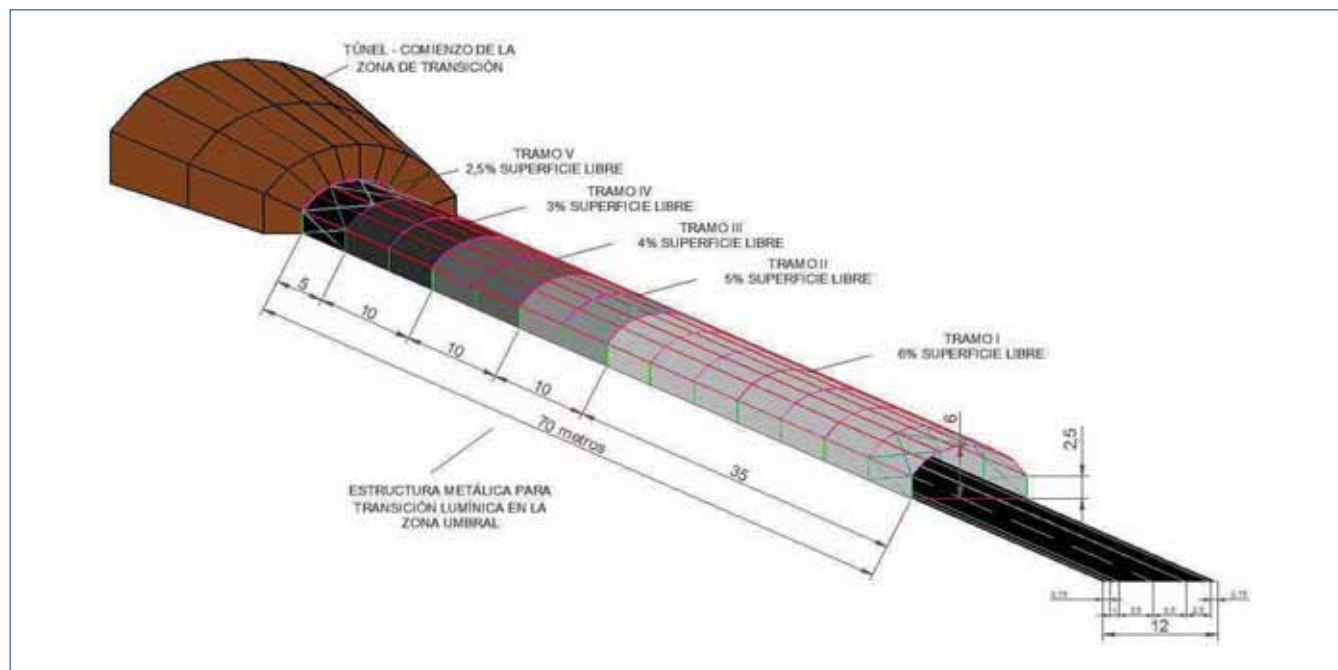


Figura 10: Estructura metálica para transición y transmisión lumínica en la zona umbral.

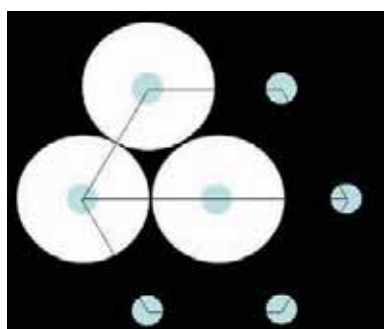


Figura 11: Orificios (en azul) y luz proyectada (círculos blancos) sobre un plano a cierta distancia de la luz directa del sol. Ensayo realizado en el Departamento de Física de la Universidad de Murcia por el Doctor en Ciencias Físicas Dr. D. Antonio Guirao.

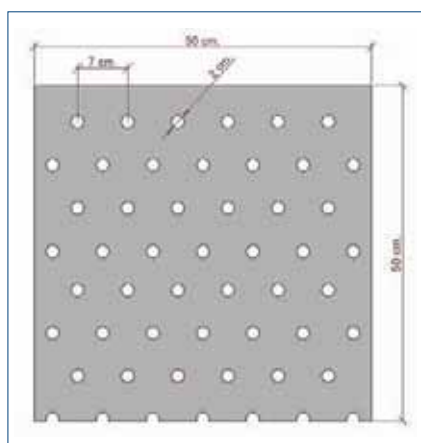


Figura 12: Patrón tipo de 50x50 cm. de chapa metálica a utilizar en la zona de chapa metálica con 5 % de superficie agujereada.

calculada para tiempo de percepción y reacción de 1 segundo), y la malla metálica que forma su revestimiento está perforada con orificios de superficie constante, cuya separación va aumentando al adentrarse en el túnel para disminuir progresivamente la luminancia interior según las proporciones fijadas por la curva CIE.

De esta manera se consigue, automática y permanentemente, tanto en ambiente soleado como en ambiente nublado, que la luminancia en la zona umbral del túnel sea el porcentaje deseado de la luminancia exterior, que según la curva CIE, y la normativa vigente, se sitúa en torno al 6 % en el inicio y el 2,5 % en el final del umbral del túnel.

Gracias a este sistema, el explotador del túnel queda liberado de la obligación de medir con luxómetro el nivel de luminancia exterior y de adaptar en todo momento el régimen de trabajo de los proyectores existentes en el umbral del túnel, para alcanzar el porcentaje de luminancia exigido por la normativa.

Tras diversos cálculos y ensayos, el patrón de malla elegido para el revestimiento de la bóveda es un patrón de tipo hexagonal-triangular con orificios circulares de 2 centímetros de diámetro, con lo que se produce una disper-

Tabla 1: Cálculo de la distancia de parada

		Tiempo de reacción = 1s. (CIE - UNE)	
		Velocidad = 80 km/h	
		Pav. Seco	Pav. Húmedo
Distancia de parada	SD (m)	64,52	101,37
Límite Velocidad Túnel	u (km/h)	80	80
Tiempo de reacción	t0 (s)	1	1
Aceleración de la gravedad	g (m/s ²)	9,81	9,81
Coeficiente de fricción	f	0,625	0,348
Pendiente	s (%)	-3	-3



Figura 13: Imágenes de la construcción de la maqueta de transición lúminica a escala 1/6. Ubicada en el Centro de Conservación y Explotación del sector de carreteras de Murcia 4.



Figura 14: Detalle de orificios del cubrimiento de la estructura.

sión adecuada de la luz natural y se impide la colmatación por acumulación de suciedad (véase figura 11).

Por ejemplo, para el tramo de 5%, el modelo de chapa metálica a escala real sería similar al mostrado en la figura 12.

La longitud de la estructura podría ser de 70 m, coincidiendo con la longitud de la zona umbral de un túnel con velocidad limitada a 80 km/h, en el que dicha zona umbral es la distancia de parada calculada con tiempo de percepción y reacción de 1 segundo como establece la CIE, para condiciones normales de fricción y humedad del pavimento. (véase tabla 1).

Es importante destacar que, en nuestra opinión, la prolongación del túnel mediante la estructura metálica no tendría la consideración de túnel propiamente dicho, porque al incluir aperturas laterales cada 10-15 m., no estaría completamente cerrada, y por

tanto, además de ventilar el habitáculo interior, estas aberturas servirían como salida de emergencia para usuarios, y evitarían el confinamiento de humos ante un eventual incendio.

4. Modelo

Al objeto de comprobar fundamentalmente el grado de dispersión de la luz filtrada, realizando mediciones reales, se ha construido una maqueta a escala 1/6 imitando la zona umbral de un túnel unidireccional con velocidad máxima de 80 km/h (véanse figuras 13 y 14).

Las mediciones realizadas con luxómetro en el interior de la maqueta, han permitido comprobar que los resultados de luminancia en el interior del túnel, en cada uno de los diferentes tramos, se corresponden con los fijados en la curva CIE, y que la proyección sobre la calzada de la luz filtrada por los orificios exteriores no se percibe como “lunares” sobre el firme, y no tiene lugar el efecto Flicker, que induce al parpadeo de los conductores.

Por tanto, se considera que tales resultados son extrapolables a una es-

tructura a escala real, de manera que si económicamente resulta viable, estaríamos ante una alternativa consistente para el ahorro energético en el alumbrado de túneles carreteros.

5. Análisis de Rentabilidad Económica

Para realizar el estudio de viabilidad económica de la ejecución de una bóveda de transición lumínica en túneles de nueva ejecución, se han calculado los indicadores económicos más relevantes.

Tales indicadores, y sus umbrales de rentabilidad como inversión pública, son:

- Tasa Interna de Retorno - TIR (> 3%)
- Valor Actual Neto - VAN (>0)
- Relación Beneficio (B) / Coste (C) (>1)
- Periodo de Recuperación de la Inversión (< 20 años)

Los datos de partida para el estudio han sido los siguientes:

- Coste de ejecución de la estructura metálica.
- Ahorro que supone la no necesidad de instalación de proyectores eléctricos de refuerzo en la

Tabla 2: Proyectores eléctricos instalados en la zona umbral (70 m.) del túnel Loma de Bas de la Autopista AP-7 en Murcia.

	TÚNEL LOMA DE BAS (70m.)	
	PROYEC.	POT. UNITARIA (W)
SOLEADO	26	600
NUBLADO	21	600

zona umbral (considerando por el contrario un mínimo de proyectores de baja potencia para la iluminación nocturna de la bóveda).

- Ahorro del consumo energético de los proyectores eléctricos de refuerzo en la zona umbral (considerando solamente la instalación del alumbrado base para periodo nocturno).

También se podría tener en cuenta el ahorro en el mantenimiento de los proyectores eliminados, y su coste de reposición al transcurrir su vida útil, pero no se han incluido en los cálculos.

los porque el impacto sobre la rentabilidad del proyecto es mínimo, y en todo caso darían mayor rentabilidad al proyecto.

5.1 Coste de ejecución de la estructura metálica.

Se ha realizado un anteproyecto de la estructura metálica con el objeto de tener una estimación del coste real de la estructura, que se ha estimado en 154.256,26 €.

5.2 Ahorro en ejecución de instalación eléctrica.

Para calcular el ahorro que se podría conseguir en instalación eléctrica, gracias a la bóveda de transición lumínica, se ha considerado la instalación real del túnel Loma de Bas de la Autopista AP-7 en Murcia, que cuenta con 47 proyectores de 600 W correspondientes al alumbrado de refuerzo (soleado y nublado) en la zona umbral, instalados en una disposición cenital (véanse tabla 2 y figura 2). Considerando un precio unitario para

Tabla 3: Cálculo del ahorro en el consumo energético de los proyectores instalados en la zona umbral

	TÚNEL DE LOMA DE BAS (70 m.)								
	PROYEC.	POT. UNITARIA (W)	POT.REACT (W)	POT. TOTAL (kW)	CONSUMO PUNTA (kWh/año)	CONSUMO LLANO (kWh/año)	CONSUMO VALLE (kWh/año)		
SOLEADO	26	600	90	17, 94	13289, 50	44.969,30	68, 62		
NUBLADO	21	600	90	14, 49	13482, 95	49.189,93	2658, 92		
NOCTURNO	6	150	22, 5	1, 04	885, 96	3.556,26	0, 00		
					CONSUMO PUNTA (kWh/año)	CONSUMO LLANO (kWh/año)	CONSUMO VALLE (kWh/año)		
COSTE MEDIO Tº POT. (€/año)	977,47				27.658,41	97. 715,49	2.727,54		
COSTE ENERGÍA PUNTA (€/kWh)	0,162126	4.484,15				CONSUMO (kWh/año)			
COSTE ENERGÍA LLANO (€/kWh)	0,141086	13.786,29				128. 101,43			
COSTE ENERGÍA VALLE (€/kWh)	0,097701	266,48	ESTIMACIÓN COSTE DEL TÉRMINO DE POTENCIA (€/año)						
						0,22	0,76	0,02	
COSTE ENERGÍA (€/año)	19.514,38				13,01	45,95	1,28		
			Pot. Instalada (W)	33,47	23,54	14,52	3,29		
TOTAL COSTE ILUMINACIÓN (€/año) (IVA INCLUIDO)	23.026,97				Pot. Cálculo (W)	60,24	306,18	667,06	4,22

cada proyector de 600 €, se obtendría un ahorro de 28.200 € (47 uds x 600 €/ud). Además, la no instalación de dichos proyectores supone un ahorro en instalación de cableado, cajas de protección y bandeja de aproximadamente un 3 % sobre el precio de instalación, que suponen 1.236,54 €.

En definitiva se obtendría un ahorro estimado en instalación eléctrica de 29.436,54 €, por lo que el coste de la estructura menos el ahorro por la instalación eléctrica no necesaria sería de 124.819,72 €.

5.3 Ahorro en el consumo energético

El ahorro en el consumo energético es el producido por los 47 proyectores de 600 W del alumbrado de refuerzo menos el de 6 proyectores de 150 W del alumbrado base, los cuales estarían instalados en la estructura metálica, por lo que no se han tenido en cuenta en el cálculo del ahorro de la instalación eléctrica, y sólo funcionarían en periodo nocturno.

La tarificación corresponde a una

tarifa 3.1A, que tiene una discriminación horaria en 3 periodos (Punta, Llano y Valle). Los precios en €/kWh de cada periodo han sido tomadas de una oferta realizada por una compañía comercializadora a nivel nacional:

- Horas punta: 0,162126 €/kWh.
- Horas llano: 0,141086 €/kWh.
- Horas valle: 0,097701 €/kWh.

Con ello, y con la estimación de funcionamiento de los proyectores en cada periodo se obtiene un ahorro de 23.026,97 €/año (véase tabla 3).

5.4 Resultado del cálculo de los indicadores económicos

Tabla 4: Análisis de rentabilidad económica . Bóvedas de transición lumínica en túneles de carretera de nueva ejecución

	AÑO	COSTE DE INVERSIÓN (€)	AHORROS (€)	EXCEDENTES (€)
Año 1	2012	-154.256,00	29.436,54+23.026,97	-101.792,49
Año 2	2013	0	23.026,97	23.026,97
Año 3	2014	0	23.026,97	23.026,97
Año 4	2015	0	23.026,97	23.026,97
Año 5	2016	0	23.026,97	23.026,97
Año 6	2017	0	23.026,97	23.026,97
Año 7	2018	0	23.026,97	23.026,97
Año 8	2019	0	23.026,97	23.026,97
Año 9	2020	0	23.026,97	23.026,97
Año 10	2021	0	23.026,97	23.026,97
Año 11	2022	0	23.026,97	23.026,97
Año 12	2023	0	23.026,97	23.026,97
Año 13	2024	0	23.026,97	23.026,97
Año 14	2025	0	23.026,97	23.026,97
Año 15	2026	0	23.026,97	23.026,97
Año 16	2027	0	23.026,97	23.026,97
Año 17	2028	0	23.026,97	23.026,97
Año 18	2029	0	23.026,97	23.026,97
Año 19	2030	0	23.026,97	23.026,97
Año 20	2031	0	23.026,97	23.026,97

Con los datos de la tabla anterior se obtienen los siguientes indicadores:

Tabla 5: Indicadores Económicos.	
VAN	240.790,68 €
TIR	22,21%
B	395. 046, 68 €
C	154.256,00 €
B /C	2,56
PRI	4 AÑOS

6. Conclusiones

- Desde que un vehículo circula a la entrada de un túnel, hasta que lo hace por su interior, experimenta una reducción drástica en los niveles de iluminación, que puede descender desde 4.000 cd/m² hasta 3 cd/m².
- Para realizar esta disminución en las adecuadas condiciones de seguridad y comodidad se disponen en la entrada del túnel una Zona Umbral, y una Zona de Transición, en las que se adapta la visión del conductor, siguiendo un modelo de reducción progresiva de la luminancia establecido por la CIE (Comité Internacional de Iluminación)
- En la Zona Umbral se consume habitualmente en torno al 30 % de la energía total destinada a la iluminación de todo el túnel.
- Cabe plantearse la construcción de estructuras metálicas permanentes, de bajo mantenimiento, ubicadas antes de la entrada del túnel, que permitan realizar la misma transición lumínica que los proyectores, pero a un coste inferior.
- Dichas estructuras garantizan que, en cualquier circunstancia de iluminación ambiental, se consigue en el portal del túnel el porcentaje deseado de la luminancia exterior, y se reproduce permanentemente la curva CIE.
- Adicionalmente, las bóvedas de transición lumínica pueden ofrecer una protección frente a desprendimientos en la zona de boquillas.
- Los estudios coste – beneficio preliminares muestran que la ejecución de estructuras de transición lumínica constituye una actuación energéticamente eficiente, así como sostenible ambientalmente y económicamente interesante a medio plazo.
- La bóveda de transición lumínica, cuyo coste se ha evaluado en 154.256,26 €, permite el ahorro de 29.436,54 € en primera implantación de proyectores de refuerzo que no serían necesarios, así como de 23.000 €/año, (actualizados), en energía eléctrica durante toda la vida útil de la bóveda.
- Según los indicadores económicos calculados, el proyecto sería muy rentable puesto que el Valor Actualizado Neto (VAN) sería de 240.790,68 €; la relación Beneficio/ Coste sería 2,56; la Tasa Interna de Retorno (TIR) del proyecto sería del 22,212 % y el Periodo de Recuperación de la Inversión (PRI) sería de 4 años.
- Como conclusión, se considera que en los túneles en fase de proyecto o de construcción, sería conveniente realizar un estudio económico de rentabilidad de este

tipo de estructuras, que pueden proporcionar una alternativa eficiente, sostenible y rentable, frente al alumbrado convencional.

- Cabría plantearse la colocación de este tipo de estructuras en túneles en servicio, pues, por su diseño, su instalación supondría una corta interrupción del tráfico de la vía.

Referencias

- [1] Recomendaciones para la iluminación de carreteras y túneles. Ministerio de Fomento 1.999 – Instrucciones de Construcción
- [2] UNE-CR 14380 IN. Aplicaciones de iluminación. Alumbrado de túneles.
- [3] Comisión Internacional de la Iluminación CIE 88:2004. Guía para el alumbrado de túneles de carretera y pasos inferiores.
- [4] 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.
- [5] Manual de iluminación de interiores y exteriores de la Universidad Politécnica de Cataluña.
- [6] Manual de Explotación y Plan de Autoprotección del túnel de Lorca. Autovía A-7.
- [7] Manual de Explotación del túnel Loma de Bas. Autopista AP-7 tramo Cartagena-Vera.
- [8] Manual de instalaciones de alumbrado y fotometría. Chapa, J. (1990). Limusa.
- [9] Proyectos de inversión en ingeniería: su metodología. Erossa, E. (1987). Limusa.
- [10] Principles of Optics. Born, M., & Wolf, E. (1973). Pergamon Press.
- [11] Visual Perception. Cornsweet, T. N. (1970). Academic Press.
- [12] Handbook of Applied Photometry. Decusatis, Casimer (1998). Springer-Verlag.❖