LII Simposium Nacional de Alumbrado
Lleida, 20 al 22 de mayo del 2026
Ponencia

Título del trabajo/ Title of paper:
Sol al final del túnel: Innovación energética para infraestructuras viales

Autor/es/ Author/s:
Alvaro Arpon Zufiaur
Ramón Ruiz Pereda

Empresa/s Company/s:
Diputación Foral de Bizkaia -Tecuni

Dirección principal/ Mail address:

ramon.ruiz@tecuni.com - alvaro.arpon@bizkaia.eus

Teléfono, e-mail de la persona de contacto/
Phone, e-mail address of the contact person:
607 517 610

Tema:

1. Científico y formación en aspectos generales de la iluminación: visión, color, fotometría, luminotecnia…….
2. Luz, salud y bienestar
3. Normativa, Legislación, Calibración y Certificación
4. Iluminación interior
5. Iluminación conectada en interior
6. Sistemas de control y equipos auxiliares
7. Eficiencia energética y empresas de Servicios energéticos
8. Ciudades inteligentes e iluminación conectada en exterior
9. Gestión de fondos y ayudas para el ahorro
10. Otros usos de la luz
11. Novedades tecnológicas
12. Realizaciones prácticas
13. Contaminación lumínica
14. Energías renovables
15. Alumbrado de emergencia

El Territorio Histórico de Bizkaia tiene la competencia sobre la planificación, proyecto, construcción y conservación de las carreteras.
Desde esas amplias competencias, se está realizando un análisis sobre soluciones a la movilidad que mejoren la seguridad de los usuarios y sean más eficientes energéticamente. Entre ellas, los túneles son elementos singulares que requieren una especial atención por la normativa en materia de seguridad que se debe cumplir, siendo el alumbrado un elemento destacable por estar activo en todo momento y tener una afección directa a la comodidad de la conducción. Además, la energía eléctrica demandada para cumplir con esas necesidades de seguridad es muy elevada, para conseguir una iluminación adecuada en el interior del túnel.
De esta manera, de los 1.254 kilómetros de carreteras de titularidad Foral, apenas 26 kilómetros (un 2,1%) corresponden a tramos de túnel. Pero, el consumo eléctrico supone el 51,74% para los tramos de túnel y un 48,26% para los tramos de cielo abierto.
Esto es, que en apenas un 2,1% del total de las carreteras se consume más de la mitad de la energía demandada a lo largo de un año.

Es por esto por lo que es prioritario avanzar en la renovación del sistema de iluminación y a dar respuesta a cuatro posibles retos, como son:

- Cómo y cuánto hay que iluminar un túnel
- Con que tecnología ejecuto el proyecto
- Influye esta actuación en la seguridad de los usuarios
- Se genera un ahorro energético

En los siguientes párrafos, intentaremos dar respuesta estas preguntas.

¿Cómo hay que iluminar un túnel?

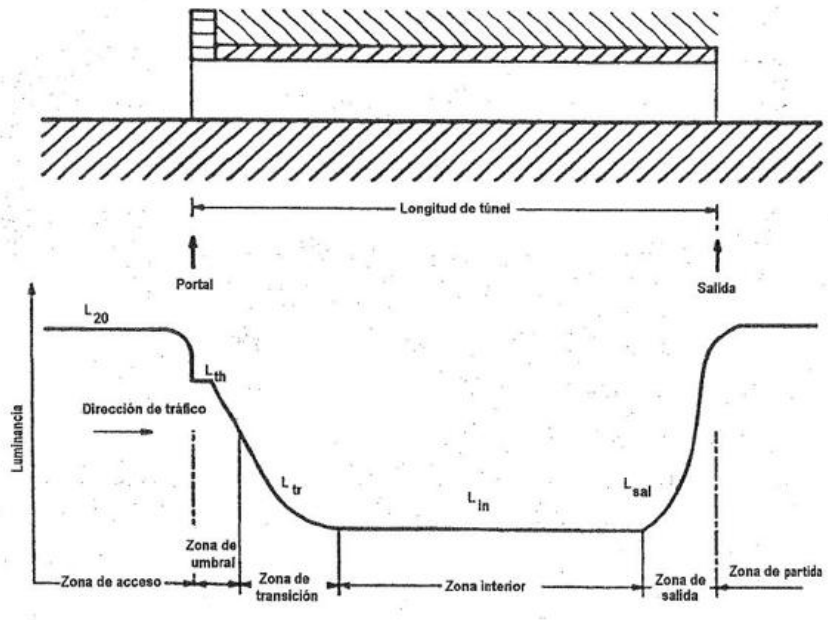
El mayor problema dentro de la iluminación en un túnel es el derivado de la adaptación del ojo humano desde las elevadas luminancias exteriores durante el día, a la oscuridad que se puede dar en su interior.
La forma de reducir esa afección viene definida y explicada en la norma CIE 88:2004, titulada "Guía para la iluminación de túneles de carretera y pasos inferiores", donde se define la metodología de cálculo para la iluminación de un túnel.
Dicha metodología de cálculo, indica que se deben definir zonas capaces de poder adaptar de forma progresiva el ojo humano a la luminancia interior atendiendo a criterios como son la velocidad de la vía, su morfología o su orientación.

Los principales objetivos de la norma son:

- Adaptación Visual: Asegurar que el ojo humano se adapte correctamente a los cambios bruscos de luminosidad (del exterior brillante al interior oscuro y viceversa).
- Distancia de Parada: Garantizar niveles de luz permitan al conductor identificar obstáculos a una distancia igual o superior a la de frenado.
- Seguridad y Confort: Evitar deslumbramientos y el efecto de "agujero negro" a la entrada del túnel.

Para cumplir estos objetivos, la norma divide el túnel en cinco zonas específicas para calcular la iluminación necesaria:

1. Zona de Acceso: Tramo exterior antes de la boca del túnel donde el conductor debe empezar a distinguir el interior.
2. Zona Umbral: El inicio del túnel, donde se requiere la mayor intensidad de luz para igualar la luminancia exterior.
3. Zona de Transición: Donde el nivel de iluminación se reduce gradualmente hasta el nivel del interior.
4. Zona Interior: Tramo central con iluminación constante y niveles más bajos.
5. Zona de Salida: Tramo final donde la luz aumenta ligeramente para preparar al conductor a la claridad del exterior



Cada una de esas zonas tiene unos requisitos propios para el diseño y el rendimiento de la iluminación.

Sin la transición entre las luminancias exterior e interior, sufriremos una ceguera momentánea con visión borrosa hasta llegar a un nuevo estado de adaptación visual. Es lo mismo que ocurre cuando, en un día soleado, entramos en un portal oscuro y durante unos instantes no vemos con claridad. Es el fenómeno de la adaptación. Se trata, por lo tanto, de un problema de diferencia de niveles de luminancia entre el exterior (3000-8000 cd/m2) y el interior del túnel (5-10 cd/m2).

Podríamos pensar que manteniendo un valor de luminancia próximo al exterior en toda su longitud habríamos resuelto el problema, pero esta solución es antieconómica. La solución pasará por reducir progresivamente el nivel de luminancia desde la entrada hasta la zona central manteniendo una linealidad con el exterior.

Las entradas requieren, por tanto, altos niveles de luz con poco espacio entre luminarias y conforme nos adentramos en el túnel y nuestro ojo va adaptándose, la iluminación del interior del túnel va disminuyendo. Esto es así para facilitar la adaptación del ojo humando los días en los que el sol brilla en el exterior del túnel. Sin embargo, en horarios nocturnos o en días nublados o no muy soleados, la cantidad de iluminación necesaria dentro del túnel disminuye.

Esa diferencia de iluminación exterior y la necesidad de mantener una linealidad, se debe realizar no solo con la ubicación de las luminarias, sino, regulando los niveles de potencia de las luminarias o incluso trabajando con los encendidos y apagados.

-¿Con que tecnología ejecuto el proyecto?

El avance tecnológico derivado del cambio de luminarias de VASP a LED propicia la creación de nuevos escenarios derivados de estas principales diferencias

-Mayor rendimiento lumen /watio de las luminarias con tecnología Led frente a los antiguos equipos de VSAP. Lo cual permite realizar ajustes en el número de circuitos eléctricos en los armarios de protecciones, al poder depender de un mismo térmico más luminarias.

-Capacidad de poder suministrar la potencia exacta de una luminaria para la cantidad de luz requerida frente a las antiguas lámparas normalizadas de 150, 250 o 400w. Esta optimización de potencias máximas de fábrica, al igual que la anterior, aligeran y abaratan la instalación.

-La adaptación a demanda e inmediata de la regulación de potencia de las luminarias LED , manteniendo una linealidad entre la cantidad de luz exterior y la interior, frente a los antiguos agrupamientos de luminarias, donde se dotaba de mayor cantidad de iluminación al túnel energizando diferentes conjuntos de luminarias prefijados en función de cambios escalonados significativos en el exterior.

-Índice de reproducción cromática muy superior de las luminarias LED hace que se puedan diferenciar los colores de la señalización o de los obstáculos, Dando la posibilidad de poder distinguir señales amarillas de obra de señales convencionales o vehículos de conservación.

-Además de la capacidad de adaptación de la potencia, la tecnología asociada a la luminarias LED permite variar la temperatura de color de las luminarias, frente al monocronismo de los equipos antiguos, de tal forma que exista una linealidad entre el color la luz exterior e interior.

-¿Influye esta actuación en la seguridad de los usuarios?

El trágico incendio del túnel del Mont Blanc en 1999 (39 fallecidos) no fue el origen directo de la norma CIE 88, pero sí fue el catalizador crítico para su actualización y para la creación de leyes que hoy obligan a cumplirla estrictamente, la norma nació de la colaboración internacional técnica para solucionar el efecto de "agujero negro" y asegurar que un conductor pueda detectar obstáculos a tiempo al entrar en un túnel

En Bizkaia, desde su publicación se empieza a trabajar como normativa de referencia y es en el año 2006 se publica el decreto foral sobre seguridad en túneles, donde se indica bajo qué criterios debe construirse y operarse un túnel en el territorio histórico.
La norma CIE establece un período de adaptación de 10 años para adaptar las instalaciones existentes a la iluminación que se define como necesaria, finalmente dieron una prórroga hasta 2019.

Estos cambios en las necesidades de iluminación dentro del túnel conforme a la iluminación exterior hacen que se necesite un sistema capaz de absorber de manera rápida y ágil los cambios de luminancia exteriores y repercutirlos en el interior, en favor de una mejor experiencia de conducción para el usuario, un aumento en los niveles de seguridad de la vía y una optimización de consumos, en definitiva, crear tramos de carreteras dotados de inteligencia y sostenibles.

Esto se encuentra totalmente ligado con la instalación eléctrica asociada al funcionamiento del sistema, su diseño y la elección de los materiales a utilizar y su comportamiento frente a mantener la continuidad del servicio, en caso de incendio, así como a la baja emisión de humos o la toxicidad de los mismos y la forma de evacuarlos, incluyendo sistemas que den redundancia de alimentación eléctrica (SAIs y grupos)

Todos los cambios que se ejecuten para su corrección deben justificarse y ser conformes con la normativa actual.

Visto que la adaptación a norma de la iluminación es un apartado notable dentro de la instalación y tras la detección de las oportunidades generadas tras la

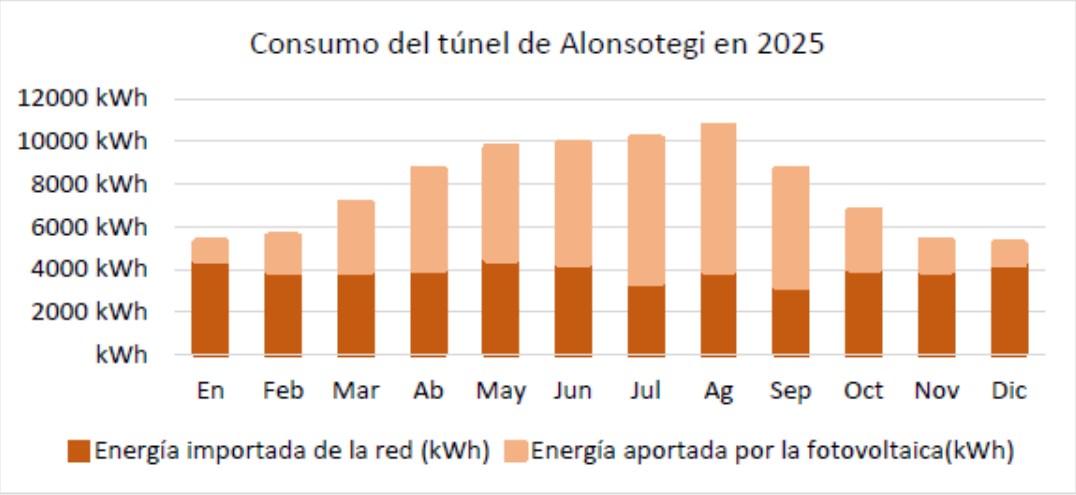
irrupción de la tecnología led, se hace casi indispensable asociar esta instalación a la renovación del sistema eléctrico del túnel, mejorando por tanto las condiciones de seguridad del mismo tanto para los usuarios como para la propia instalación.

-¿Se genera un ahorro energético?

Los objetivos de Ahorro para el Sector Público según **Ley 4/2019 de Sostenibilidad Energética de Euskadi se establecieron las siguientes:**
Las administraciones públicas vascas (Gobierno Vasco, diputaciones, ayuntamientos y entes públicos) deben cumplir con las siguientes metas de reducción de consumo de energía final:
Año 2030: Reducción del 35% del consumo de energía final.
Año 2050: Reducción del 60% del consumo de energía final.
Renovables, según la ley de cambio climático: para 2030, el 32% del consumo de los edificios públicos debe proceder de fuentes renovables.

-El mayor rendimiento lumen/watio de las luminarias con tecnología Led frente a los antiguos equipos de VSAP, la capacidad de poder suministrar la potencia exacta de una luminaria para la cantidad de luz requerida frente a las antiguas lámparas normalizadas de 150, 250 o 400w sumado a la posibilidad de adaptación a demanda e inmediata de la regulación de potencia de las luminarias LED, genera un ahorro estimado frente a las antiguas instalaciones de alumbrado de túnel de un entorno al 70-80%.

Vista la correlación entre la mayor demanda de energía en boca de túnel con la luminancia exterior, se están ejecutando varios proyectos de implantación de generación fotovoltaica en boca de túnel, enfocados al autoconsumo, alcanzando valores del 50%, una vez realizada la adaptación a tecnología LED del túnel.



La necesidad de garantizar el suministro eléctrico en ciertos túneles por motivos de seguridad o incluso en caso de apagón, sumado a los desarrollos tecnológicos en materia de almacenamiento eléctrico, ha propiciado la implantación de baterías de almacenamiento y descarga flexibles.

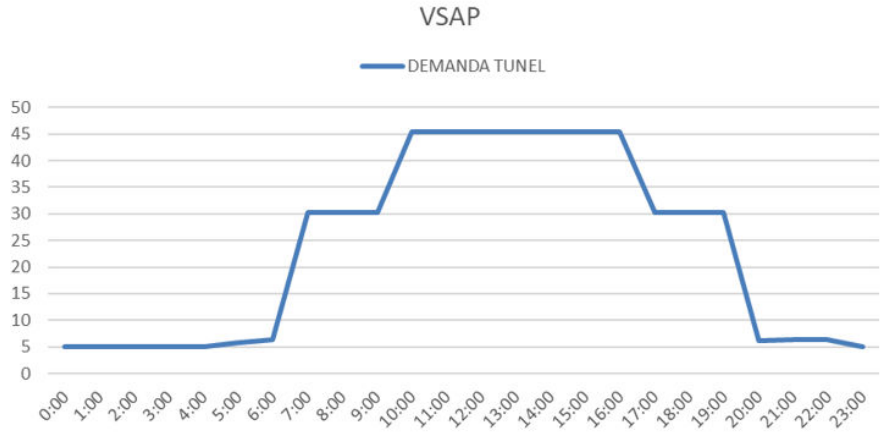
Estos sistemas de almacenamiento pueden cargarse con los excedentes de las plantas fotovoltaicas de las bocas de los túneles o mediante la red eléctrica convencional en horarios de bajo precio de la energía o momentos de necesidad y descargarse de forma flexible en horarios de mayor precio de la energía, en momentos donde la energía consumida por la instalación es alta y la planta fotovoltaica no puede atender el total de la demanda o incluso disponer de un funcionamiento en isla del sistema formado por la carga del túnel-planta fotovoltaica – batería que junto con un estudio de ajustes de la carga haga que se puedan garantizar largos períodos de funcionamiento.

Todo ello encaminado a cumplir la Ley 7/2021, de 20 de mayo, a nivel estatal, la Ley 4/2019 tiene como objetivo principal reducir el consumo energético y fomentar la sostenibilidad, que marca objetivos de ahorro del 35% para 2030 y del 60% para 2050. Además, se aprobó, posteriormente la Ley 1/2024, de 8 de febrero, de Transición Energética y Cambio Climático fija entre otras cuestiones una participación de renovables del 32% en el consumo final energético para 2030. Siendo la solución fotovoltaica una solución que avanza en la reducción del consumo y aporta en la generación de energías renovables.

Experiencias Vividas:

En línea con la consecución de los retos marcados, procedemos a explicar la forma de trabajar que hemos desarrollado en los últimos años.

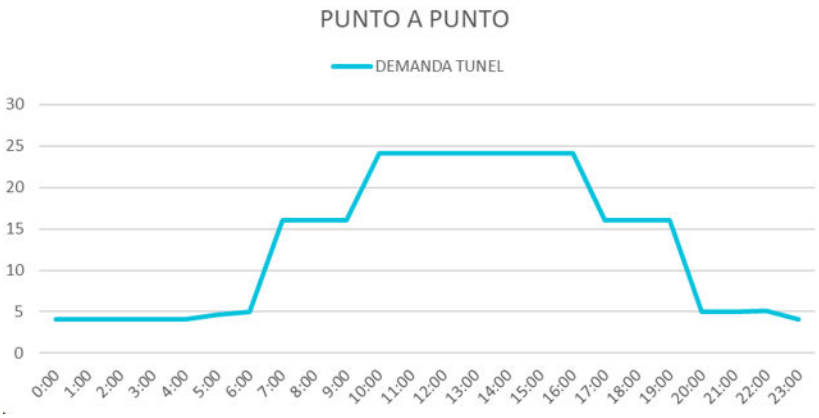
Partíamos de instalaciones de no muy larga longitud, que durante la noche ya se iluminaban con tecnología relativamente eficiente, pero que en el momento en que el túnel necesita de mayor iluminación, esta se aporta a base de encender grupos de luminarias.



Esta grafica refleja el consumo a lo largo de un día completo de una instalación con dos escalones de potencia para dar servicio en diurno.

Se ve como el consumo es lineal hasta el momento del amanecer, en ese momento se activa el primer escalón de regulación, que enciende un conjunto de luminarias.
En un momento del día, debido a un mayor sol en boca del túnel, se activa el segundo escalón que enciende otro grupo de luminarias. Este segundo escalón se apagará de nuevo cuando el sol baja.
Finalmente, al anochecer, de nuevo el consumo se reduce.

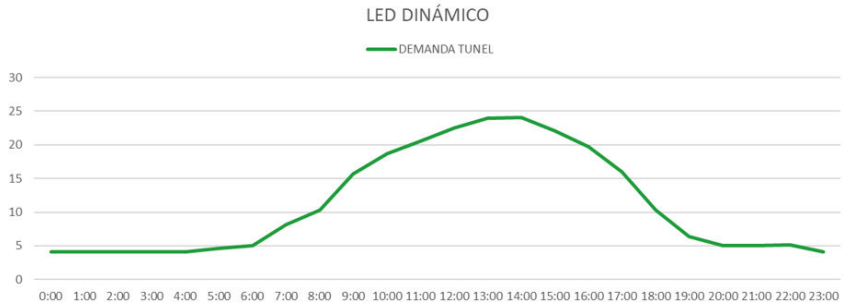
Haciendo la prueba de cambiar luminarias una a una, sustituyendo las existentes de VSAP por otras más eficientes en LED, vemos que las nuevas luminarias, además de ser más eficientes tienen la característica de poder ajustar más la potencia final necesaria, frente a las antiguas de VSAP que siempre disponían de lámparas comercializadas en escalones (250w,400w…).



De esta forma, el consumo disminuye de manera notable pero el comportamiento no ha variado, se replica la curva pero con menores consumos.

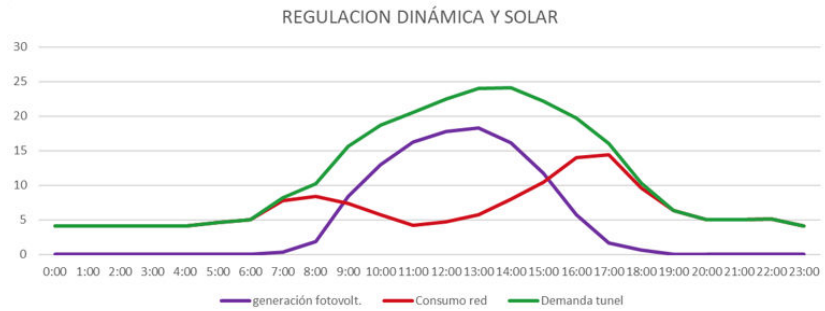
Esta solución, tampoco ofrece respuesta al problema de la seguridad en túneles, principalmente a garantizar la continuidad del servicio en caso de incendio en su interior o a minimizar los problemas de los humos, al tratarse de instalaciones antiguas. La solución es renovar mayor parte de la instalación eléctrica.
Esto nos permite plantear un diseño desde el principio, incluyendo canalizaciones, cableados, armarios eléctricos sistemas de regulación.

Implementando un sistema de regulación punto a punto, podemos crear diferentes escenas que se adaptan con mayor precisión a los cambios de iluminación exterior. Evitando los escalones que teníamos en las gráficas anteriores.



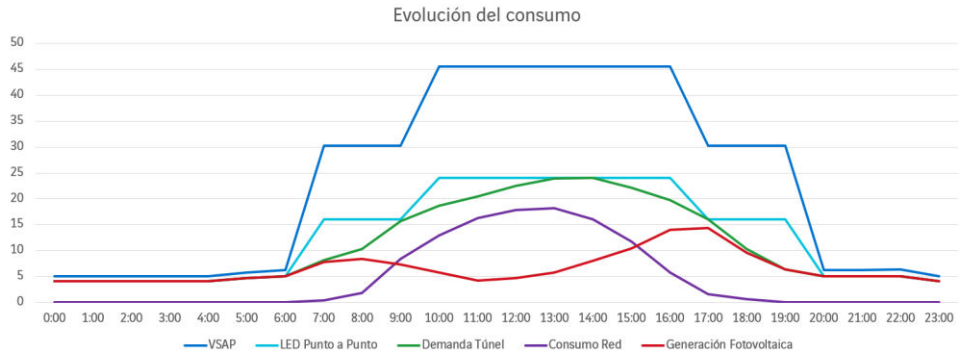
Se puede apreciar como el consumo pico del túnel es el mismo, pero más adaptable a los cambios de iluminación.

Apoyándonos en el criterio de que un túnel demanda mayor cantidad de energía conforme mayor cantidad de iluminación hay en el exterior de sus bocas, se plantea la posibilidad de incrementar una planta fotovoltaica en boca del túnel, que disminuya el consumo en horario diurno.



La curva verde corresponde a la demanda real del túnel (igual que la anterior grafica), la morada corresponde a la generación FV, que únicamente aporta valor en horario diurno. La roja se corresponde con el consumo demandado de la red. Se ve como se reduce en aproximadamente un 50%.

En definitiva, partíamos de una instalación de alto consumo debido a la tecnología y la falta de flexibilidad (curva azul oscura). Modificando ambas condiciones, pasamos a la curva verde, capaz de reducir el consumo aproximadamente un 80%. Implementando paneles solares, curva morada, podemos reducir todavía un 50% el consumo, dejándolo por debajo de la curva roja.



En este momento estamos trabajando la implementación de baterías flexibles, que se puedan alimentar del excedente de la planta fotovoltaica o de la propia red en momentos de precios bajos de la energía y que puedan ayudar a bajar la curva morada en momentos programados.

Esta solución, además esta ayuda a contribuir además con la seguridad y la autonomía del túnel.