

Túneles: optimización de la explotación, actividades de mantenimiento y costes basados en la experiencia¹



Tunnels: optimization of the operation, maintenance activities and costs based on the experience

Rafael López Guarga

*Jefe de la Demarcación de Carreteras del Estado en Aragón. Ministerio de Fomento
Director Técnico del VI Simposio de Túneles de Carreteras*

Resumen

Este artículo hace un repaso sobre los distintos túneles de carretera existentes en España, con referencias a su longitud, tipología, sentido de circulación, altura sobre el nivel del mar y procedimiento de construcción, y resalta la necesidad de realizar un inventario sobre los mismos, de establecer una buena programación de las operaciones de mantenimiento y de continuar con inspecciones periódicas.

El mantenimiento y la inspección de los túneles deben garantizar la seguridad de los usuarios, el buen funcionamiento y la fiabilidad de las instalaciones, y la seguridad del personal de mantenimiento. Estos aspectos deben de tenerse en cuenta ya desde el principio de la planificación del túnel y por supuesto durante el proyecto, construcción y posterior explotación.

Antes de la puesta en servicio del túnel es necesario llevar a cabo una serie de pruebas de funcionamiento global del sistema, de simulacros y de formación inicial del personal que se hará cargo de la explotación, siendo fundamental disponer de un buen *Manual de Explotación* que recoja el mayor número posible de fichas de incidentes. Con el túnel ya en servicio debe disponerse, además, de un plan de formación continua para cada puesto de trabajo.

El *Plan de Mantenimiento* debe también quedar establecido desde el principio, definiendo la periodicidad de las distintas operaciones y estableciendo su categoría de preventivo o correctivo.

Por último se analizan los costes más usuales en la explotación de un túnel, basados en la experiencia, y se hace una reflexión sobre la vida útil de los distintos elementos y equipamientos.

PALABRAS CLAVES: túnel, mantenimiento, sostenibilidad, eficiencia, coste.

Abstract

The paper presents a general overview of the different types of road tunnels that can be found in Spain, considering their length, typology, uni- or bi-directional traffic, height above sea level and construction method, highlighting the importance of the creation of an inventory, the implementation of an adequate plan covering the maintenance activities and the follow-up of periodic inspections.

Tunnels maintenance and inspection must guarantee users safety, reliability and functioning of equipment and also the safety of maintenance staff. All these aspects should be considered at the early stages of the tunnel, from planning to design, construction and, obviously, subsequent operation.

Prior to tunnel opening to traffic, functional and performance tests, safety exercises and training of the operation staff, who will participate in the tunnel operation activities, should be completed. Moreover, the emergency plan included in the safety documentation (Operations Manual) should cover so many protocols for incidents management as possible and a continuous training program, for each role in the organization, to be developed once the tunnel is under operation.

Maintenance Program should also be implemented, in advance to the tunnel opening, establishing the periodicity of the maintenance activities and defining their preventive or corrective characteristics.

Finally, typical operation costs are described and categorized according to existing experience and some considerations on the life cycle of the tunnel equipment and elements are included.

KEY WORDS: tunnel, maintenance, sustainability, efficiency, cost.

¹ Comunicación presentada al VI Simposio de Túneles de Carreteras, celebrado en Zaragoza del 11 al 13 de marzo de 2015.

En España existen aproximadamente 710 túneles (tubos) de carretera, gestionados por distintas administraciones, de los que un 15% son urbanos, un 14% son gestionados por las Comunidades Autónomas y el 71% restante corresponde a la Red de Carreteras del Estado (RCE).

La longitud total de estos túneles es de unos 445 km, que corresponden un 21% a los urbanos, un 12% a los regionales y un 67% a los del Estado.

Todos ellos deben de cumplir las normativas de seguridad.

En la RCE existen actualmente 513 túneles (tubos), que suman una longitud de 302,4 km, de los que 266 pertenecen a la Red Transeuropea de Transporte. En la red gestionada por las Comunidades Autónomas hay 25 túneles cuya longitud es mayor de 500 m.

Entre los principales túneles de mayor longitud cabe destacar los señalados en la Tabla 2.

Por otra parte la altura media en España sobre el nivel del mar es de 660 m, solo superada en Europa por Suiza, Austria, Andorra y Liechtenstein, lo que se traduce en problemas de vialidad invernal y en importantes variaciones de temperatura que dan lugar a dificultades para la explotación y el mantenimiento, afectando a la vía útil de los diferentes equipamientos. A veces la temperatura en los accesos puede alcanzar los 20 °C bajo cero. En la Tabla 3 se recogen los túneles de longitud mayor de 500 m cuyas bocas se sitúan a una altitud superior a los 1100 m.

Dentro de los túneles urbanos cabe citar los de Calle 30, en Madrid, que en su totalidad suman 47,4 km, los 15 túneles también en Madrid gestionados desde un mismo Centro de Control que suman 18,4 km, los 46 túneles (tubos) de las Rondas de Dalt y Litoral en Barcelona que suponen una longitud de 15,4 km y los túneles del Ayuntamiento de Barcelona que con 17 tubos dan lugar a otros 6,7 km.

En cuanto a la tipología y procedimientos de construcción hay falsos túneles, como los que aparecen en la Figura 1, y túneles excavados en mina, tanto unidireccionales como bidireccionales, constituyendo estos últimos aproximadamente las dos terceras partes del total.

Realizado el inventario de los túneles, se ha llevado a cabo por las distintas Administraciones una inspección inicial de los mismos para determinar el grado de cumplimiento de sus normativas correspondientes (Directiva 2004/54/CE, RD 635/2006) que ha reflejado que:

- el 65% cumple ya con todos los requisitos de seguridad establecidos en las normativas;
- el 35% restante requiere actuaciones que precisan la elaboración de un proyecto previo para su adecuación;
- es fundamental una buena programación de las operaciones de mantenimiento para que los túneles perduren con sus características iniciales;
- es preciso, y lo exige la normativa, continuar con las inspecciones periódicas.

Tabla 1. Distribución de los túneles pertenecientes a la RCE

Túneles	Número de túbos		
	L > 500 m	L ≤ 500 m	TOTALES
Red Transeuropea	139	127	266
Resto	52	195	247
TOTAL	191	322	513

Tabla 2. Principales túneles en España

Túnel	Año de construcción	Situación	Longitud (m)
Somport	2003	N-330/RN 134	8608
Pedrero	2005	A-67	1100
Gedo	2005	A-67	2500
Viella	2007	N-230	5200
Guadarrama	2007	AP-6	3148
Marchante	2007	A-7	1400
Piqueras	2008	N-111	2444
Cantalobos	2009	A-7	2170
Bracons	2009	C-153	4556
Arlabán	2009	AP-1	3370
Bielsa (*)	2010	A-138	3070
Petralba	2012	N-260	2625

(*) Remodelación

Tabla 3. Túneles de más de 500 m de longitud situados a una altitud superior a 1100 m

Túnel	Longitud (m)	Altura (m)	Situación
Monrepós I	1484	1236	N-330
Monrepós II	601	1264	N-330
Somport	8608	1183	N-330/RN-124
Cotefablo	683	1473	N-260
Petralba	2625	1221	N-260
Viella	5230	1494	N-230
Guadarrama	3340	1298	AP-6
Piqueras	2444	1499	N-111
Negrón	4210	1240	AP-66
Bielsa	3070	1743	A-138
Cadí	5026	1236	C-16
Padornelo	875	1343	A-52
La Canda	660	1215	A-52
Somosierra	620	1450	A-1
Piedrafita	813	1080	A-6



Túnel Avenida Cesáreo Alierta (ZARAGOZA)



Túnel Ronda Este (Santa Isabel, ZARAGOZA)



Túnel glorieta de la MAZ (ZARAGOZA)



Túnel Ortega de Prados (MÁLAGA)

Figura 1. Ejemplos de falsos túneles

1. Mantenimiento e inspección de túneles

Los objetivos del mantenimiento e inspección de los túneles son los siguientes:

- garantizar la seguridad de los usuarios;
- garantizar el buen funcionamiento y la fiabilidad de las instalaciones, (para minimizar el nº de intervenciones no planificadas);
- garantizar la seguridad del personal de mantenimiento.

Para ello, desde los primeros esbozos de la iniciativa de que se va a construir el túnel es necesario prever los sistemas para el mantenimiento, siendo necesario disponer desde el inicio de un *Plan de Mantenimiento* ya que una parte importante de sus costes queda fijado por las decisiones que se adopten en la concepción y la ejecución del túnel.

En la Figura 3 se puede observar que cuando en la fase de planificación se invierte poco para proyectos pensando en el mantenimiento y se ahorran costes en construcción para adaptar las obras para que el mantenimiento se lleve a



Túnel de Campo (HUESCA)



Túnel de Cantalobos (MÁLAGA)

Figura 2. Ejemplos de túneles excavados en mina

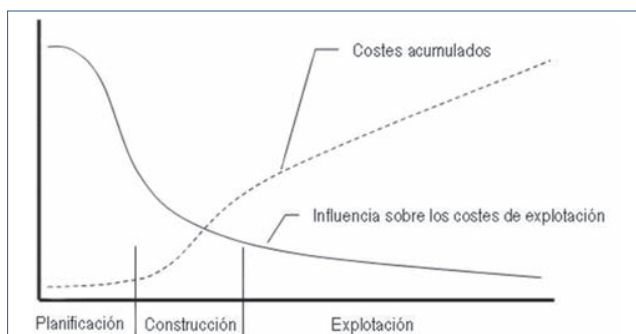


Figura 3

cabo de la forma más holgada y funcional posible, los costes acumulados de explotación se elevan considerablemente en el tiempo. Sin embargo, si se hace una previsión inicial ya en la fase de planificación, aunque suponga un incremento económico de la obra, si ello favorece las operaciones de mantenimiento, el coste de explotación futuro será menor.

El Comité de túneles de la AIPCR publicó en 2005 el documento titulado "Guía de buenas prácticas para la Explotación y el Mantenimiento de túneles de carretera" en el que se puede consultar información sobre este asunto (<http://www.piarc.org>).

Durante el proyecto y la construcción del túnel hay que tener en cuenta los códigos y normas técnicas nacionales y si no se dispone de ellas, en determinadas materias, adoptar las de otros lugares como por ejemplo las Recomendaciones del CETU, de la AIPCR, etc., debiendo en todo momento ser llevada la supervisión por expertos o por una empresa especializada.

En cuanto al marco legal, normalmente suele existir una normativa a aplicar, siendo en el caso de los túneles de la red de carreteras del Estado el R.D. 635/2006 y en general para los de la Red Transeuropea de Transporte la Directiva 2004/54 sobre requisitos mínimos de seguridad.

No obstante lo anterior se recomienda antes de tomar una decisión sobre los equipamientos con los que se ha de dotar al túnel hacer una evaluación de los mismos y reali-

zar un análisis coste/beneficio ya que no por muchas cosas que se pongan y por sofisticadas que éstas sean el túnel va a ser más seguro. Hay que elegir la situación óptima e inclinarse por sistemas sencillos pero seguros.

Habría que buscar el diseño óptimo y realizar una evaluación funcional, (por ejemplo para determinar si es mejor utilizar únicamente los postes SOS o eliminar éstos por el uso de móviles; si se debe de utilizar una frecuencia específica de FM o limitarse únicamente al uso de paneles de Mensaje Variable, ...), una evaluación técnica (determinar cuál es el modelo de equipamiento que mejor se adapta a cada caso, ...), una evaluación operacional (mediante la comprobación de que todo funciona bien y de que es útil) y una evaluación económica (¿hasta qué nivel de instalaciones interesa poner hasta amortizarlas?, por ejemplo en función de la reducción de accidentes, ...).

Tras construir el túnel, antes de su puesta en servicio, es necesario resolver una serie de cuestiones, tales como:

- Ensayos de funcionamiento global del sistema.
- *Manual de Explotación* y reglamento de tráfico (si fuese el caso).
- Contratación de personal y formación.
- Simulacros.
- Estudio de peligros.
- Gestión del túnel durante la explotación.

Los equipamientos de un túnel son técnicamente muy complejos por lo que se deben comprobar los sistemas instalados para verificar si su funcionamiento es el esperado según proyecto. Se han de efectuar ensayos sobre la ventilación, la gestión técnica centralizada, el sistema de Detección Automática de Incidentes (DAI), el sistema de detección de incendios, las comunicaciones, la iluminación, la red contraincendios, etc.

El *Manual de Explotación* es el documento en el que deben quedar recogidas de forma detallada todas las instalaciones del túnel que permitan la explotación del mismo en adecuadas condiciones de seguridad y eficiencia, incluyendo

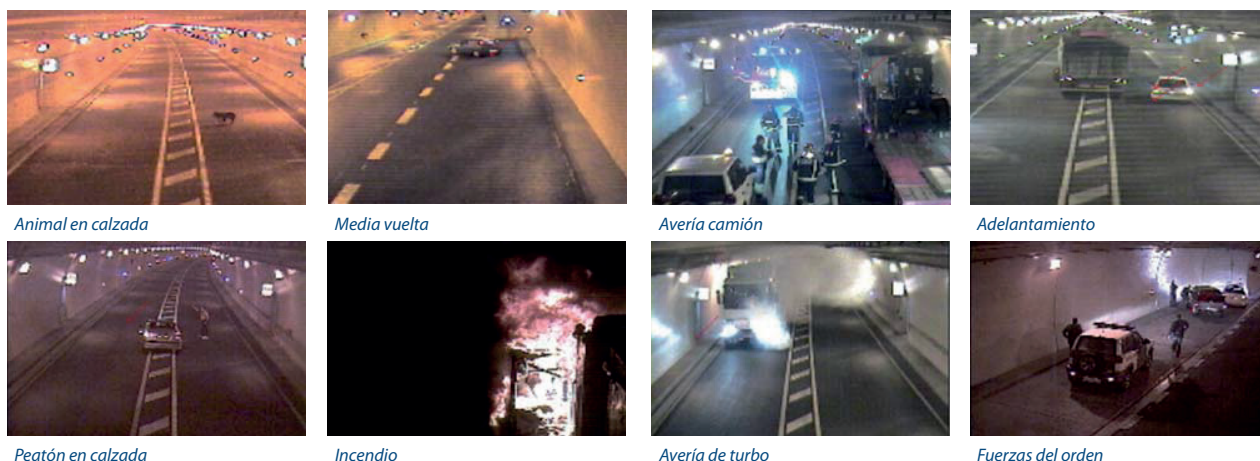


Figura 4. Ejemplo de incidentes que pueden tener lugar en un túnel durante su explotación

las tareas, tanto permanentes como periódicas y ocasionales, de mantenimiento y control de la instalación, estructura organizativa, gestión de incidencias, etc., siendo sus funciones las de regular el control de la circulación ante incidencias y accidentes, las de regular el mantenimiento de las instalaciones y de la obra civil, y las de regular las actuaciones en caso de emergencias. El Manual debe redactarse durante la fase de proyecto, sin perjuicio de su actualización y ampliación en las fases posteriores de construcción y explotación.

El *Manual de Explotación* debe recoger y analizar un conjunto de incidentes susceptibles de producirse en el túnel. Las fichas de incidentes deben describir las acciones a tomar que afectan tanto a los equipamientos como a los medios humanos y materiales del explotador y, en su caso, a los medios de socorro exteriores, constituyendo la base de las consignas de explotación. La detección de los incidentes puede ser manual y/o automática. La gestión de un incidente debe ser totalmente automatizada, de forma que el operador no tenga más que confirmar la ficha de actuación dándole para ello un periodo de respuesta (por ejemplo entre 45 y 90 segundos). Conforme se va desarrollando la vida del túnel, estas fichas se irán completando de acuerdo con la característica especial de cada caso.

La gestión de la explotación se puede realizar mediante la contratación de una empresa especializada que deberá cumplir un pliego en el que se defina la dotación de personal, los medios materiales (por ejemplo, si se debe disponer de vehículo de bomberos), la organización, la necesidad de mantener unos repuestos mínimos, etc.

El personal contratado debe ser formado atendiendo a su puesto (operador, personal de intervención, técnico de mantenimiento, etc.) siendo necesaria la definición para cada uno de ellos de sus funciones, competencias, responsabilidades y coordinación con el resto.

La formación debe ajustarse a las necesidades de una intervención, siendo necesaria la realización de ejercicios y simulacros tanto por parte del personal del explotador como por parte de los servicios exteriores, imprescindible para conseguir práctica y coordinación.

La mayoría de los túneles cuentan con un sistema de control (en el caso de túneles significativos, alojado en un centro de control) con tres funciones principales:

- Detectar cualquier cambio en la situación del túnel, "evento", mediante los distintos sensores.
- Calcular la reacción, "escenario", más adecuada a dichos cambios.
- Activar y controlar los correspondientes equipamientos de seguridad, "actuadores", en consecuencia. Se suele solicitar al operador confirmar el evento detectado o la acción que se va a desencadenar.

Así por ejemplo:

- El régimen de funcionamiento de la ventilación se incrementa automáticamente si se detecta contaminación.
- Los niveles de iluminación se adaptan automáticamente a los datos de luminancia exterior.
- Las barreras se cierran en caso de un incidente grave o de un incendio.

Las tres funciones anteriormente indicadas (a, b y c) se llevan a cabo de forma continua y comprenden, dependiendo del escenario concreto, interacciones entre los sistemas automáticos, los operadores y los usuarios. El papel del operador puede ser vital y debe considerarse como un componente importante del sistema de control del túnel y de los procedimientos de evacuación.

Por lo tanto con el túnel en servicio debe disponerse de un plan de formación continua para cada puesto de trabajo y en función de la entidad del túnel debe disponerse un servicio de 24 h sobre 24 h los 7 días de la semana. El personal de explotación suele clasificarse en Gestión (cuadros directivos y administrativos), Explotación (operadores y mantenimiento) e Intervención.

El Comité de túneles de la AIPCR publicó en 2007 el documento titulado "Guía para la organización, contratación y formación del personal de túneles de carretera" en el que se encuentra información sobre este asunto, que ha sido traducido al español y se puede consultar en la página web de la Asociación Técnica de Carreteras (ATC).



Figura 5. Esquema del sistema de control del túnel

El operador controla el estado de las instalaciones (GTC), supervisa las condiciones de tráfico (CCTV y DAI), adapta las condiciones del túnel a la situación en cada momento (señalización, ventilación...), coordina al resto del personal de explotación y activa las emergencias. El servicio debe ser prestado durante las 24 horas del día y según las características del túnel habrá 1 ó 2 operadores.

El personal de intervención debe tener conocimientos de técnicas de extinción de incendios en túneles, de técnicas básicas sanitarias, de la ubicación de las distintas instalaciones y de la gestión del tráfico.

Como ya se ha indicado anteriormente, todo el personal debe estar sometido a una formación continua y deben organizarse simulacros periódicamente.

Finalmente, para que la explotación sea efectiva todas las actuaciones deben quedar recogidas mediante informes que, además de suponer un histórico de la actividad llevada a cabo, servirán para retroalimentar la experiencia del propio túnel y de otros a los que se les puedan presentar problemas similares.

El contenido de los informes dependerá de su periodicidad. Así en los informes mensuales deberán figurar los consumos de materiales y la descripción y evolución del tráfico; en los trimestrales se realizará un análisis de las incidencias y de los simulacros y en los anuales se incluirá una recopilación de los hechos más importantes acaecidos en el año, un resumen de los informes anteriores, las tasas de disponibilidad del túnel, el cumplimiento del plan de formación y las averías más destacables.

2. Plan de mantenimiento

El *Plan de Mantenimiento* del túnel quedará definido:

- en el Pliego del Contrato de Explotación, si es que se adopta este sistema, que indicará qué elementos se deben mantener;
- en el propio *Plan de Mantenimiento* del Explotador, que deberá recoger la periodicidad de las revisiones (semanal, quincenal, mensual, semestral,...);

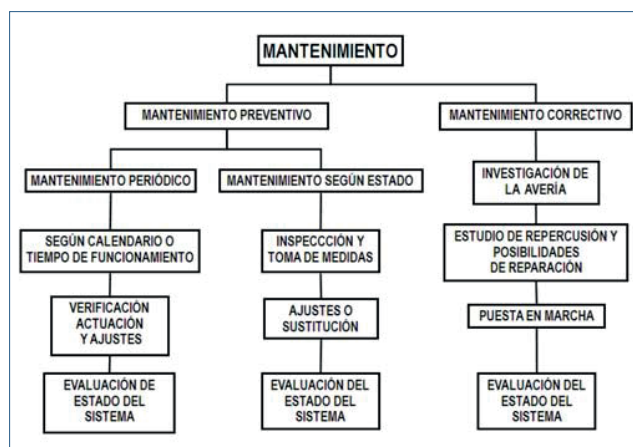


Figura 6. Esquema del mantenimiento de un túnel

Tabla 4. Ejemplo de la frecuencia y nivel de inspecciones de un equipo que debe figurar en el Plan de Mantenimiento de un túnel

CÓDIGO	CONCEPTO	TIPO DE REVISIÓN	
		Inspección	Limpieza
Ventilación			
V. 1	Detectores de CO	T	S
V. 2	Opacímetros	T	S
V. 3	Anemómetros	T	S
V. 4	Ventiladores	S	A
V. 5	Cuadros eléctricos variadores de velocidad	T	A
V. 6	Instalación eléctrica	T	A

T: Trimestral; S: Semestral; A: Anual

- y en el Sistema de Gestión propio del túnel, "Tratamiento de Elementos y Reconocimiento de Estado en Explotación de Carreteras, TEREX".

Si la explotación del túnel no está sometida a un contrato, las funciones las asumirá directamente la propiedad.

El mantenimiento puede ser preventivo o correctivo, obedeciendo al esquema de la Figura 6.

Debe organizarse un calendario que contemple la revisión de todos los equipos, que normalmente se llevará a cabo por el propio personal de explotación según la cualificación requerida para cada actividad, y complementariamente en muchos casos será imprescindible formalizar contratos de mantenimiento específicos para la atención a los sistemas críticos.

Para cada equipo debe establecerse la frecuencia y el nivel de las inspecciones (Tabla 4).

3. Costes de explotación

Analizar el coste que supone a largo plazo la construcción y explotación de un túnel de carretera es una labor cuyo análisis previo no es sencillo. Más complejo resulta analizar el resultado de dicha inversión.

El coste de proyecto y ejecución supone sumar partidas, probablemente conocidas con precisión al finalizar la obra. El coste de explotación, aunque también queda recogido en presupuestos, se encuentra ligado a variables como el consumo energético, el personal que gestiona la obra y, por supuesto, los gastos relacionados con el mantenimiento de la misma: reposiciones por avería, por sustitución debido a la antigüedad, mejoras tras analizar el modelo de explotación que se desea, aspectos no considerados en el proyecto o cambios de legislación. Algunos de estos gastos pueden variar de manera importante en función de las consideraciones del proyecto y su ejecución.

Una vez sumadas estas partidas se puede valorar el coste de explotación por kilómetro de instalación o por vehículo

y así comparar distintas instalaciones. A su vez, cada túnel dispone de diferentes niveles de equipamiento, según si cumple o no el R.D. 635/06 sobre equipamientos mínimos de seguridad. Sin duda, mayor nivel de equipamiento deriva en un mayor gasto de mantenimiento. Por otra parte, mayor equipamiento puede suponer que las consecuencias y, por tanto, los costes ocasionados por accidentes sean menores. La posibilidad de disponer de un centro de control que gestione varios túneles ayuda a reducir el gasto de gestión.

Aunque la obra pública, por definición, no analiza un rendimiento económico por sí misma, si es cierto que logra un beneficio social evidente. En algunos puntos geográficos la existencia de túneles permite una mejor organización territorial, creación y/o distribución de la riqueza tanto a nivel local como internacional por lo que estudiar el resultado de la inversión que supone la construcción de estas infraestructuras trasciende más allá de lo evidente.

Para estudiar el gasto que se genera en los túneles durante su fase de explotación se han considerado varios casos, de diferentes características, con objeto de extrapolar algunos datos y obtener conclusiones.

Análisis eléctrico

La primera visión sobre gasto que se puede revisar está relacionada con el coste del suministro eléctrico.

Ya en el año 2006 se produjeron fuertes aumentos en el coste del suministro eléctrico. Desde entonces, se han buscado fórmulas de ahorro, encajadas en distintas normas buscando la denominada eficiencia energética.

Desde el Ministerio de Fomento se han redactado diversas indicaciones como la Nota de Servicio 3/2010 y las Instrucciones complementarias de 19/5/2011 y 12/6/2012. Uno de los grandes problemas detectados es que las medidas de ahorro en consumo han chocado con los incrementos en el precio del suministro, que en los últimos 10 años se ha doblado. Por otra parte, muchas instalaciones apenas disponen de medios para controlar el consumo o reducirlo, sin realizar nuevas inversiones que, en la situación económica actual, resultan difíciles de asumir.

Por ejemplo, en el túnel de Petralba (bidireccional de 2625 m de longitud), en la carretera N-260, la potencia contratada (1400 kW) se ha ajustado al 60% de la instalada, con objeto de economizar, pero teniendo en cuenta que, si fuese necesario, es posible el uso de todo el equipamiento con una penalización económica. El gasto medio mensual es de 14 241 € y el coste anual por km de túnel es de 61 185 €.

Para tratar de mitigar el consumo se ha ajustado al máximo el nivel de iluminación aprovechando la alta luminosidad de las balizas (hublots), sin reducir la capacidad de detección de los sistemas de seguridad, observándose que el peso de la factura eléctrica por potencia disponible es tan elevado que las reducciones en el consumo, por importantes que sean, tienen una escasa repercusión económica (Figura 9).

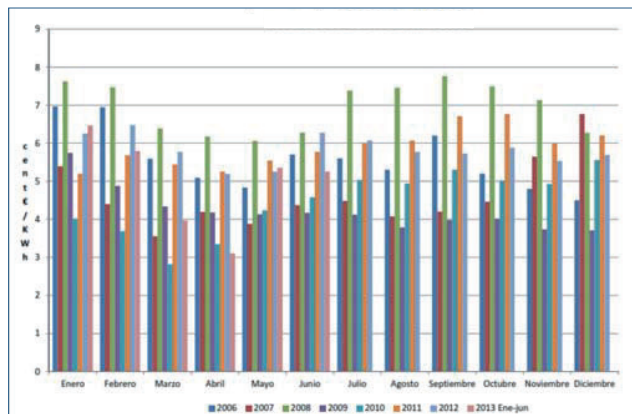


Figura 7. Evolución mensual del precio medio de la electricidad en el periodo 2006 - 2012 [Fuente: Boletín estadístico de la Comisión Nacional de los Mercados y la Competencia]

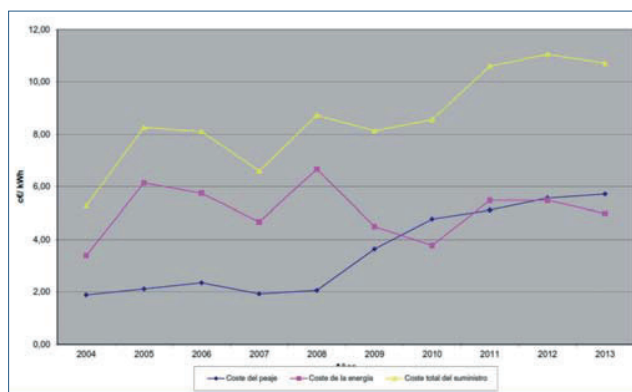


Figura 8. Evolución del precio del suministro eléctrico en el periodo 2004 - 2013 [Fuente: Boletín estadístico de la Comisión Nacional de los Mercados y la Competencia]

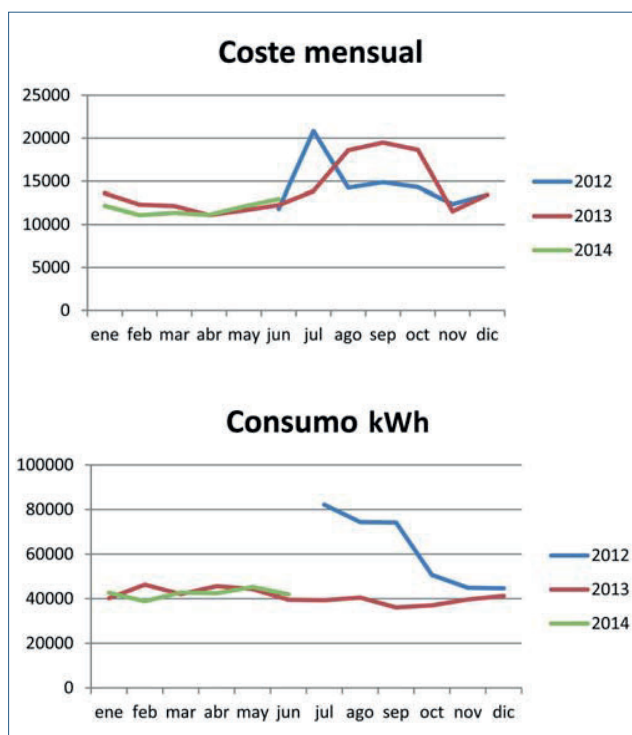


Figura 9. Variación del coste y del consumo mensual de electricidad en el túnel de Petralba en el periodo 2012 - 2014

Costes laborales

La segunda visión se refiere al coste laboral. En España, en los últimos años, el coste salarial se ha reducido en el marco de la crisis económica. De acuerdo con el informe del Banco de España sobre costes laborales [16] entre los años 2005 y 2013 el aumento del coste laboral en España ha supuesto un 7,4% mientras que en la Unión Europea ha supuesto el 15,8%. Entre los años 2010 a 2013 en España los gastos salariales se han reducido en un 7,4%.

En los últimos 6 años el gasto salarial en el túnel transfronterizo de Somport, de 8608 m de longitud, ha evolucionado de casi 3 millones de euros al año en 2008 a algo más 2,8 millones en 2014, tal y como se recoge en la Tabla 5. Estas cifras incluyen los impuestos vigentes en cada año: el 16% de IVA en el año 2008, que se elevó hasta el 21% en 2014, por lo que la diferencia de costes es incluso mayor.

El coste en 2014 por km es de 327 646 € y por vehículo de 7,38 €. Si se eliminan los costes relacionados con la gestión de emergencias del túnel (su retén de agentes de conservación, que es una particularidad del túnel de Somport), el coste específico de la explotación queda en 146 850 €/km y año y 3,31 € por usuario.

Reposición de elementos dañados. El mantenimiento

El tercer punto de vista es el de la reposición de elementos dañados y mantenimiento de sistemas. La adaptación de los túneles a las exigencias del R.D. 635/2006 supone un gran esfuerzo económico para lograr la implantación de todos los equipamientos que se requieren para garantizar la seguridad del tráfico.

Un aspecto muy importante para dimensionar el gasto de las instalaciones es el concepto de vida útil de los elementos. Aunque los fabricantes y suministradores informan sobre este dato o periodo entre fallos, existe escasa documentación sobre este tema. Dos documentos útiles

elaborados por PIARC son las "Recomendaciones para la gestión del mantenimiento y las inspecciones técnicas de túneles de carretera" y las "Consideraciones sobre el ciclo de vida de los equipamientos eléctricos en túneles de carretera".

Anticiparse al fallo total de un equipo puede suponer tanto una garantía en la seguridad del túnel como un ahorro, si a consecuencia de los daños en un equipo, otros pueden también sufrirlo. Un caso destacado es el de los sistemas SAI y de protección de sobretensiones eléctricas, cuyo malfuncionamiento puede afectar a todos los sistemas eléctricos del túnel.

Análisis conjunto de los costes de explotación

Algunos autores relacionan los costes ordinarios de funcionamiento con los costes de construcción mediante un tanto por ciento de éstos al año, de manera que se fijan entre el 0,8% y el 1,0% para los 10/15 primeros años de funcionamiento, entre el 1,0% y el 1,5% entre ese periodo y hasta los 25 años y de entre 1,5% y 2% para los cinco años siguientes. Como referencia hay que tener en cuenta que el coste de construcción viene a ser del orden de 25 000 €/m para túneles de longitud superior a los 1000 m, y del orden de 18 000 €/m para los túneles de entre 500 y 1000 m de longitud. A partir de los 2500/3000 m estos costes aumentan considerablemente.

A los costes ordinarios de funcionamiento se deben de añadir los de las pequeñas reparaciones (pavimento, filtraciones, edificios, drenaje, etc.).

Con el paso del tiempo y el cambio de las diferentes normativas también habría que añadir los costes de gran reparación (rehabilitación y adaptación) que podrían llegar a suponer entre un 5% y un 20% del coste de construcción.

Como resumen se puede considerar que el coste anual de explotación de un túnel puede oscilar entre los 130 000 y 300 000 €/km por tubo, en función de su longitud y de las instalaciones con los que esté dotado. Si además en el túnel se gestiona también el tráfico este coste podría incrementarse entre un 20% y un 30%.

Tabla 5. Evolución del gasto salarial en el túnel de Somport en el periodo 2008-2014

Gasto laboral anual (incluye impuestos)	2008	2014	Evolución
Personal de atención a emergencias	1 646 968,56 €	1 556 289,42 €	-5,51%
Personal de explotación	1 336 219,77 €	1 264 091,47 €	-5,40%
Total	2 983 188,33 €	2 820 380,90 €	-5,46%

Gasto total por km	346 559,98 €	327 646,48 €	-5,46%
IMD	1050	1047	-0,29%
Gasto total según IMD	7,78 €	7,38 €	-5,19%

Gasto sólo explotación por km	155 229,99 €	146 850,78 €	-5,40%
Gasto sólo explotación según IMD	3,49 €	3,31 €	-5,13%

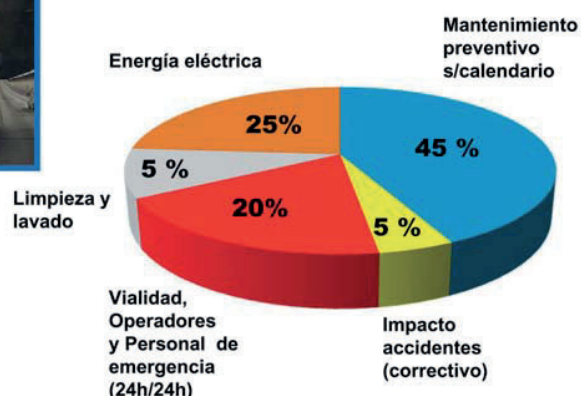
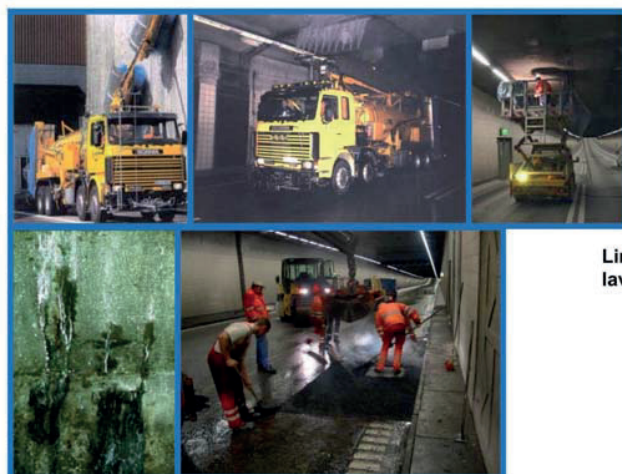


Figura 10. Distribución de los costes de explotación de un túnel

El coste energético anual puede oscilar entre los 60 000 y 80 000 €/km, por tubo. Para conseguir ahorros deben tenerse en cuenta la Nota de Servicio 3/2010 "Actuaciones a realizar por las Demarcaciones de Carreteras para reducir el consumo de energía en las instalaciones de alumbrado" y las Instrucciones complementarias de 19/5/2011 y de 12/6/2012 de la Dirección General de Carreteras del Ministerio de Fomento, aunque a veces el ahorro quede maquillado por la oscilación del coste de la energía. Es recomendable que la potencia contratada sea del orden del 60% de la instalada.

En cuanto al coste de mantenimiento de los distintos equipamientos, ventilación y abastecimiento eléctrico (trafos, SAIs, Variadores) son los equipos de mayor coste de reparación. Los sistemas de radio son muy robustos, los de CCTV, aunque menos, son de reparación asequible. La iluminación es económica (la reposición de lámparas, pro-

yectores y equipos de encendido) aunque su vida útil es menor y, por lo tanto, requiere más reposiciones.

En el marco de los contratos de conservación integral de la Dirección General de Carreteras del Ministerio de Fomento cabe indicar, después del análisis realizado para diferentes túneles de la RCE, que el coste anual de explotación de un túnel, por tubo, puede distribuirse en unos 70 800 €/km para los trabajos correspondientes al Grupo I, y en unos 24 500 €/km para los correspondientes al Grupo II.

En cuanto a la reposición de elementos hay que tener en cuenta que muchas veces éstos se cambian para reducir costes y otras para adecuarlos a una mejor gestión. La vida útil de algunos equipos puede suponer un coste en un tanto por ciento muy elevado sobre el total de costes de explotación, mucho mayor en túneles más pequeños. La necesidad de reponer material por otro semejante abarata

Tabla 6. Reparto de gastos en túnel en función de su longitud (periodo de servicio de 10 años)

Concepto	Tipo de túnel	
	Gran longitud (%)	Longitud mediana/pequeña (%)
Gasto eléctrico	20	31
Vigilancia 24 h (operadores)	6	28
Personal de atención accidentes exclusivo	24	-
Trabajos de limpieza	3	-
Reparaciones por accidentes	3	-
Asistencia de empresas especializadas	8	10
Renovación de equipos por obsolescencia	22	-
Reparaciones de firmes	1	-
Reparaciones de ventilación	4	11
Reparaciones de abastecimiento eléctrico	4	5
Reparaciones de radiocomunicaciones	1	4
Reparaciones de iluminación	2	6
Reparaciones de CCTV, DAI, fibroláser	2	5

Tabla 7. Ejemplos de vida útil basados en la experiencia

Equipo	Vida útil (años)
Ventiladores de chorro	15-20
Bombas drenaje	15
Hidrantes	25-30
Grupos electrógenos	20
Sistemas de iluminación	20
CCTV	
Cámaras	15
Monitores	10
Equipos de control	20
DAI	20-25
Señalización y control de tráfico	20
Sistemas de comunicación (SOS, teléfonos, antenas, etc.)	20-25
Paneles acero inoxidable (hastiales)	10-15
Instalaciones eléctricas	20-25

mucho esta operación (o a la inversa). Por ejemplo, los postes SOS analógicos tienen costes bajos de reposición pero si no es posible su reparación debe sustituirse el sistema de forma completa por uno digital y si el túnel es largo ello supone la reposición de muchas unidades.

La Figura 10 considera un reparto de costes medio y de una forma más general, sin embargo se podría concretar algo más este reparto, según la longitud del túnel y para un periodo de servicio de 10 años, tal y como se indica en la Tabla 6.

4. Conclusiones

- Para disponer de un túnel seguro y con una explotación al menor coste deben tenerse en cuenta estos parámetros desde la fase de planificación.
- El nivel de servicio y calidad ofrecido a los usuarios de un túnel, no depende solo del nivel de servicio asegurado por sus instalaciones, también depende de la forma de explotación de éstas por parte del personal del túnel.
- Se ha de estar al tanto de las nuevas tecnologías, mejorando los rendimientos y la vida útil de los diferentes equipos.
- Se debe de buscar la eficiencia en la elección del centro de control.
- La formación del personal de explotación resulta una herramienta fundamental de la gestión de un túnel.
- Es fundamental disponer de un buen *Manual de Explotación*.
- Es básico realizar simulacros y ejercicios.
- En una intervención es clave la coordinación con los servicios de emergencia.
- Se ha de hacer un análisis exhaustivo de los costes e intentar constantemente reducirlos.

5. Bibliografía

- [1] 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.
- [2] Comité de túneles de la AIPCR; *Guía de buenas prácticas para la Explotación y el Mantenimiento de túneles de carretera*; 2005.
- [3] Real Decreto 635/2006, de 26 de mayo, sobre requisitos mínimos de seguridad en los túneles de carreteras del Estado.
- [4] Comité de túneles de la AIPCR; *Guía para la organización, contratación y formación del personal de túneles de carretera*; 2007.
- [5] López Guarga, R.; *La explotación de túneles binacionales*; 2º Seminario Internacional de túneles y aplicaciones ITS; Buenos Aires; Marzo 2010.
- [6] Holst, J.; *Optimización de la Operación. Actividades de Mantenimiento y Costos para túneles viales basados en la experiencia*; Seminario Internacional Túneles de Gran Longitud; Santiago de Chile; Octubre 2012.
- [7] López Guarga, R.; *Explotación y Gestión de la Seguridad en túneles largos*; Seminario Internacional Túneles de Gran Longitud; Santiago de Chile; Octubre 2012.
- [8] Comité de túneles de la AIPCR; *Recomendaciones para la Gestión del Mantenimiento y las Inspecciones técnicas de túneles de carretera*; 2012.
- [9] Comité de túneles de la AIPCR; *Consideraciones sobre el Ciclo de Vida de los equipamientos eléctricos de túneles de carretera*; 2012.
- [10] López Guarga, R.; *Los túneles de carretera durante el invierno. Problemática de mantenimiento y explotación*; XIV Congreso Internacional de Vialidad Invernal; Andorra; Febrero 2014.
- [11] López Guarga, R.; *Inspección, mantenimiento y reparación de túneles*; IX Máster en túneles y obras subterráneas. AETOS. 2014.
- [12] Ministerio de Fomento; *Inventario de túneles de la Dirección General de Carreteras*; 2014.
- [13] Comité de túneles de la AIPCR; *Mejora de seguridad en túneles de carretera a través de la comunicación en tiempo real con los usuarios*; 2014; Borrador.
- [14] Informes de seguimiento anuales de explotación del túnel de Somport.
- [15] Boletín estadístico de la Comisión Nacional de Mercados y la Competencia. (<http://www.data.cnmc.es>).
- [16] Informe del Banco de España sobre costes laborales. (<http://www.bde.es/webbde/es/estadis/ccff/0325.pdf>). ♦