

TWIN TUNNEL 5.0: GEMELO DIGITAL PREDICTIVO PARA LA GESTIÓN RESILIENTE DE TÚNELES EN SERVICIO ANTE EMERGENCIAS

Almudena Rubio¹, David Díez², Juan García Escudero², Clemente Huerta³, Benjamín Ventura⁴

1 TPF Ingeniería, Madrid, España, almudena.rubio@tpfingenieria.com

2 Itainnova, España, ddiez@ita.es

3 Implaser, Zaragoza, España, chuerta@implaser.com

4 NEXIO Ingenieros, España, bbentura@nexioingenieria.com

Resumen

Los túneles de carretera presentan condiciones únicas que exigen una gestión especial de su seguridad y mantenimiento. Los incidentes catastróficos ocurridos en la red europea de carreteras a finales del siglo XX impulsaron la promulgación de la Directiva 2004/54/CE y, en España, el Real Decreto 635/2006, que obliga a adaptar los sistemas de seguridad de prácticamente todos los túneles de la Red de Carreteras del Estado. En este contexto, el proyecto TWIN TUNNEL 5.0 propone el desarrollo de un gemelo digital predictivo para la gestión resiliente de túneles en servicio ante emergencias.

El objetivo principal del proyecto es crear un modelo digital del túnel capaz de simular escenarios de riesgo y predecir fenómenos adversos en tiempo real, permitiendo una gestión inteligente, automatizada y segura tanto en operación normal como ante eventos de emergencia. Las innovaciones clave incluyen: (1) modelos ambientales predictivos y un sensor virtual de condiciones interiores; (2) algoritmos dinámicos de ventilación adaptados a las condiciones reales del túnel; (3) un sistema de comunicaciones IoT híbrido basado en tecnología LiFi para garantizar la conectividad en zonas sin red RF; y (4) un sistema de señalización multiagente, inteligente y adaptativa.

El consorcio está liderado por TPF Ingeniería junto con IMPLASER, LED5V, el Instituto Tecnológico de Aragón (ITA) y la Universidad Carlos III de Madrid. Los resultados esperados incluyen una reducción significativa de los riesgos y costes de mantenimiento, una mayor seguridad operacional y la implementación de un sistema avanzado de gestión de túneles capaz de responder dinámicamente a condiciones adversas o imprevistas.

Palabras Clave: Gemelo digital; túnel de carretera; gestión de emergencias; LiFi; ventilación predictiva.

1 Introducción

Los túneles de carretera son elementos singulares de la red viaria que, por sus características intrínsecas, requieren una atención especial en materia de seguridad. A diferencia de otros tramos de carretera, cualquier incidencia grave que les afecte puede provocar una elevada alarma social, dadas las dificultades de rescate y evacuación, el dramatismo del confinamiento y el trastorno que supone para el sistema de transportes un cierre temporal con alternativas difíciles o inexistentes [1].

A finales del siglo XX y principios del XXI, una serie de accidentes catastróficos sacudió la red europea de carreteras. El más grave fue el incendio en el túnel del Mont Blanc (Francia) en 1999, con 39 fallecidos y tres años de cierre para su reconstrucción. Le siguieron los accidentes en los túneles de

Tauern (Austria, 1999), San Gotardo (Suiza, 2001) y Gleinalm (Austria, 2001). Estos sucesos llevaron a la Comisión Europea a promulgar la Directiva 2004/54/CE [2], trasladada en España al ordenamiento jurídico mediante el Real Decreto 635/2006 [3]. La inversión prevista por el Ministerio de Transportes para la segunda fase de adaptación de los túneles de la Red de Carreteras del Estado supera los 340 millones de euros.

Paralelamente, los gemelos digitales emergen como tecnología habilitadora para la gestión predictiva de infraestructuras. Un gemelo digital es una representación dinámica de un activo físico que imita sus comportamientos en tiempo real, permitiendo el intercambio de datos históricos y en directo para obtener mayor exactitud en la toma de decisiones [4]. Aunque algunos túneles han comenzado a explorar esta tecnología, su uso actual se limita en la mayoría de los casos a repositorios de información sin aplicación predictiva ni implicación activa en la gestión.

En este contexto surge TWIN TUNNEL 5.0, un proyecto de I+D en cooperación nacional financiado por el CDTI cuyo objetivo central es desarrollar un gemelo digital predictivo capaz de simular escenarios de riesgo y predecir fenómenos adversos para favorecer una gestión inteligente, automatizada y segura del túnel tanto en explotación normal como, principalmente, ante eventos de emergencia.

2 Objetivos del proyecto

Los objetivos generales de TWIN TUNNEL 5.0 se articulan en torno a tres ejes principales: (1) la investigación en modelos predictivos y dinámicos dirigidos a reproducir y predecir las condiciones ambientales y de uso de un túnel carretero en servicio, así como su afección al mantenimiento y a la gestión de la infraestructura; (2) el desarrollo de un gemelo digital del túnel con capacidad de simular escenarios imprevistos de riesgo y predecir fenómenos adversos para favorecer una gestión inteligente, automatizada y segura ante eventos de emergencia; y (3) el diseño y desarrollo de un sistema multiagente, basado en IoT, para la conectividad, señalización e iluminación del túnel ante eventos imprevistos.

3 Descripción técnica del proyecto

3.1 Arquitectura del gemelo digital

El gemelo digital de TWIN TUNNEL 5.0 se concibe como un sistema escalable que integra diferentes módulos con capacidades predictivas para la planificación, actuación y mejora del mantenimiento y gestión de la infraestructura ante eventos imprevistos o situaciones de emergencia. La arquitectura, representada en la Figura 1, comprende cuatro capas funcionales interconectadas: las fuentes de datos, la plataforma IoT/data lake, el núcleo de inteligencia artificial del gemelo digital, y la capa de actuación sobre los sistemas del túnel.

Un túnel carretero tipo de más de 1 km de longitud dispone normalmente de un amplio equipamiento: ventiladores tipo jet-fan, ventiladores de sobrepresión de galerías de evacuación, estaciones meteorológicas en las proximidades de las bocas (con sensores de humedad en calzada, temperatura, pluviómetro, anemómetro, visibilímetro, etc.), detectores de CO, detectores de NO/NO₂, opacímetros, anemómetros interiores y cable detector lineal de incendios. Todos estos sistemas constituyen la base de sensores del gemelo digital, complementada por aquellos instalados específicamente para el proyecto.

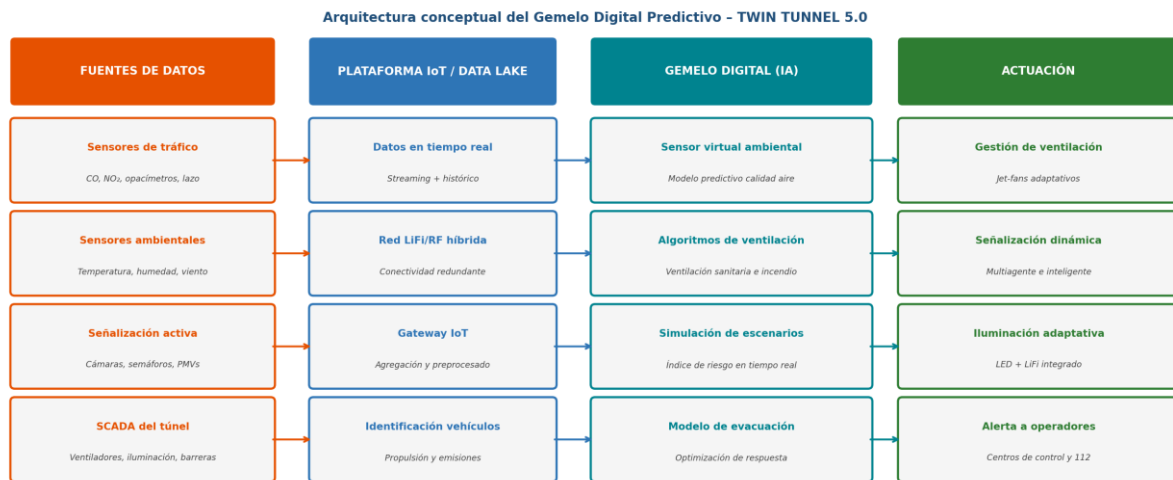


Figura 1. Arquitectura conceptual del Gemelo Digital Predictivo – TWIN TUNNEL 5.0.

3.2 Modelos ambientales predictivos y sensor virtual

El primer bloque tecnológico aborda la investigación en modelos ambientales que reproduzcan y predigan las condiciones del aire en el interior del túnel, con especial atención a los fenómenos de condensación y a la calidad del aire. Estas condiciones dependen de múltiples variables: las condiciones atmosféricas exteriores (temperatura, humedad, velocidad del viento); las condiciones del tráfico (intensidad media, tipología y antigüedad de los vehículos); y las condiciones geométricas del túnel (trazado, pendiente, materiales del revestimiento y temperatura de las paredes).

A partir del análisis de registros históricos y lecturas en tiempo real de los sensores disponibles, se desarrolla un sensor virtual capaz de estimar las condiciones del aire en cualquier punto del interior del túnel, incluso en ubicaciones no instrumentadas. Este sensor virtual, integrado en el gemelo digital, permite anticipar la evolución de las condiciones ambientales y su afección a la infraestructura y los equipos.

Las emisiones de referencia originadas por los vehículos de combustión interna en los túneles son las de CO, partículas sólidas y NO_x. Partiendo del nivel de tráfico, su porcentaje de vehículos pesados, el mix de vehículos (gasolina, diésel, eléctrico, gas) y la edad media del parque, el modelo calcula la concentración de contaminantes prevista y las necesidades de ventilación del túnel, de acuerdo con las recomendaciones de PIARC [5] y la normativa NFPA 502 [6].

3.3 Algoritmos dinámicos de ventilación

El sistema de ventilación de los túneles actuales opera con algoritmos definidos en la etapa de diseño, basados en condiciones predeterminadas de tráfico, atmósfera y escenarios de incendio que pueden diferir significativamente de los valores reales. TWIN TUNNEL 5.0 supera esta limitación mediante el desarrollo de algoritmos de ventilación inteligentes y predictivos que responden de forma específica y optimizada a cada evento que se presente.

Estos algoritmos dinámicos mejoran: la operativa durante el proceso de evacuación de ocupantes en caso de incendio, donde la ventilación debe adaptarse en tiempo real a la evolución del foco de fuego y

a los flujos de evacuación; y la eficiencia del sistema durante la operación normal, reduciendo el consumo energético de los ventiladores mediante una gestión basada en las condiciones reales del túnel.

3.4 Tecnología LiFi para comunicaciones IoT en túneles

Una de las innovaciones más destacadas del proyecto es el desarrollo de un sistema de comunicaciones inalámbricas basado en la tecnología LiFi (Light Fidelity) para mejorar la conectividad y la transmisión de datos en túneles. LiFi utiliza la luz visible (VLC, Visible Light Communication) como medio de transmisión, permitiendo su despliegue en zonas donde las comunicaciones de radiofrecuencia (RF) son limitadas o nulas debido a las características constructivas del túnel.

Se diseña una arquitectura de comunicaciones IoT mixta que integra tecnología LiFi junto con otras tecnologías RF, creando sistemas redundantes que garantizan la continuidad de las comunicaciones incluso durante situaciones de emergencia. Las luminarias LED del túnel, dotadas de nodos LiFi, actúan como puntos de acceso de la red de datos, asegurando la conectividad de sensores, señalización dinámica y demás equipos. Un gateway híbrido LiFi/RF gestiona las señales de ambas tecnologías asegurando la redundancia y fiabilidad de la comunicación. Los parámetros clave evaluados en las pruebas piloto son la velocidad de transmisión de datos, la latencia y la fiabilidad de la conexión bajo diferentes condiciones del túnel.

3.5 Señalización multiagente, inteligente y adaptativa

El proyecto desarrolla un sistema de señalización multiagente, inteligente y adaptativa para túneles que mejora la seguridad y eficiencia en la gestión del tráfico y en situaciones de emergencia. El sistema se basa en agentes inteligentes capaces de interactuar entre sí y adaptarse a las condiciones cambiantes del túnel en tiempo real, sin necesidad de intervención humana.

Los algoritmos avanzados de inteligencia artificial permiten que estos agentes respondan de manera autónoma a eventos imprevistos: accidentes, cambios en las condiciones del tráfico y emergencias de cualquier tipo. El sistema integra sensores, luminarias y dispositivos de señalización dinámica distribuidos a lo largo del túnel, que recopilan datos en tiempo real para ajustar la señalización de manera óptima, proporcionando instrucciones claras y precisas a los conductores y coordinando la evacuación en caso de emergencia. Complementariamente, el sistema de identificación de vehículos por sistema de propulsión mejora la precisión de las decisiones del gemelo digital al conocer con mayor exactitud las emisiones reales del parque vehicular en circulación.

3.6 Integración de la plataforma IoT con el gemelo digital

La plataforma IoT desarrollada en el proyecto actúa como el módulo de captura y suministro de información al data lake del gemelo digital. Esta plataforma integra todos los equipos del túnel — ventilación, señalización inteligente y sensores— y los conecta con el repositorio central de datos que alimenta los modelos predictivos. La arquitectura en capas (electrónica, red y software) permite la captura de información en tiempo real y el control remoto de los equipos, cerrando el ciclo de retroalimentación entre el mundo físico y el gemelo digital.

4 Resultados e impacto esperado

Los resultados previstos de TWIN TUNNEL 5.0 impactan tanto en la seguridad vial como en la eficiencia operacional y la sostenibilidad económica de la explotación de túneles. En el plano de la seguridad, la capacidad del gemelo digital de simular en tiempo real escenarios de emergencia —

incendios, accidentes, situaciones de riesgo por contaminación— permitirá anticipar la evolución de los eventos y operar los sistemas instalados de forma optimizada y coordinada.

El índice de riesgo en tiempo real calculado por el gemelo digital ofrecerá la posibilidad de ajustar dinámicamente los parámetros operativos del túnel en función de las condiciones reales de tráfico, manteniendo en todo momento un nivel de riesgo aceptable. Esta capacidad representa una innovación significativa respecto a los sistemas de gestión actuales, que operan con parámetros predefinidos en la fase de diseño.

En el plano económico, el control ambiental preciso permitirá reducir los fenómenos corrosivos que afectan a los elementos instalados en el túnel, prolongando su vida útil. La gestión predictiva de la ventilación reducirá el consumo energético, que representa uno de los principales capítulos del coste de explotación. Se estima asimismo una reducción de los costes de mantenimiento correctivo mediante la anticipación de anomalías y la planificación preventiva regulada por el gemelo digital.

Desde el punto de vista tecnológico, el proyecto generará varios resultados de transferencia directa al mercado: el gemelo digital como producto software para la gestión de túneles; el sensor virtual de condiciones ambientales; la luminaria LED con nodo LiFi integrado; el sistema de señalización multiagente; y el gateway híbrido LiFi/RF. El horizonte de explotación comercial abarca un período de 10 años con potencial de internacionalización dado el alcance global de los socios del consorcio.

6 Conclusiones

El proyecto TWIN TUNNEL 5.0 afronta uno de los retos más complejos de la gestión de infraestructuras de transporte: la protección de los usuarios de túneles de carretera ante eventos de emergencia imprevisibles. La convergencia de tecnologías como el gemelo digital, la inteligencia artificial, el IoT, las comunicaciones LiFi y la señalización adaptativa en un sistema integrado y predictivo representa un salto cualitativo respecto al estado actual de la técnica.

La arquitectura propuesta —un gemelo digital que recibe datos en tiempo real de todos los sensores del túnel, simula escenarios de riesgo, predice fenómenos adversos y actúa sobre los sistemas de seguridad de forma coordinada y autónoma— tiene el potencial de transformar la gestión de los túneles de carretera en un contexto en el que la normativa vigente exige inversiones significativas en la mejora de los sistemas de seguridad.

Las principales aportaciones del proyecto son: un modelo ambiental predictivo capaz de reproducir y anticipar las condiciones del aire en el interior del túnel, incluyendo un sensor virtual; algoritmos de ventilación dinámicos que optimizan la respuesta ante cualquier evento; una red de comunicaciones IoT híbrida LiFi/RF que garantiza la conectividad en todas las zonas del túnel; y un sistema de señalización multiagente que coordina la respuesta de emergencia de forma autónoma.

La composición del consorcio garantiza la solidez técnica del proyecto y su orientación hacia resultados de aplicación práctica e impacto real en el sector de la construcción e infraestructuras. TWIN TUNNEL 5.0 contribuye a la construcción de infraestructuras más seguras, eficientes y resilientes, alineadas con los objetivos de la Agenda 2030 y con la visión europea de una movilidad segura y sostenible.

Referencias

- [1] Ministerio de Fomento de España. (2006). Real Decreto 635/2006, de 26 de mayo, sobre requisitos mínimos de seguridad en los túneles de carreteras del Estado. Boletín Oficial del Estado, 137, 21386-21399.
- [2] Parlamento Europeo y Consejo de la Unión Europea. (2004). Directiva 2004/54/CE sobre los requisitos mínimos de seguridad para los túneles de la red transeuropea de carreteras. Diario Oficial de la Unión Europea, L 167, 39-91.
- [3] Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana. (2022). MITMA invierte 340,4 millones de euros del PRTR en optimizar la seguridad de 128 túneles de la Red de Carreteras del Estado. Recuperado de <https://www.mitma.gob.es>
- [4] Grieves, M., & Vickers, J. (2017). Digital twin: Mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems. En F.-J. Kahlen, S. Flumerfelt, & A. Alves (Eds.), *Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems* (pp. 85-113). Springer.
- [5] PIARC. (2012). Road Tunnels: Vehicle Emissions and Air Demand for Ventilation (Informe técnico 2012R02EN). World Road Association.
- [6] NFPA 502. (2020). Standard for Road Tunnels, Bridges, and Other Limited Access Highways. National Fire Protection Association.
- [7] Haack, A., Schreyer, J., & Stärk, R. (2010). The tunnel of the future. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 25(4), 406-415.
- [8] Bariéty, J. (2019). Artificial intelligence applied to tunnelling: State of the art and perspectives. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 89, 214-225.