

---

# Comparecencia en el Parlamento de Andalucía

Manuel Chiachío Ruano

Juan Chiachío Ruano



Comisión de Presidencia, Interior, Diálogo Social y Simplificación  
Administrativa.

[Grupo de trabajo relativo a la Inteligencia Artificial]

Colectivo: Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos

Demarcación: Andalucía, Ceuta y Melilla

Fecha: 25 de marzo de 2025

---

## Índice

<b>1</b>	<b>Presentación</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Introducción</b>	<b>2</b>
<b>3</b>	<b>Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos e IA</b>	<b>3</b>
3.1	La IA en las competencias de la Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos	3
3.2	IA y la formación de los Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos . . . . .	5
<b>4</b>	<b>Potenciales usos e impactos de la IA en infraestructuras</b>	<b>7</b>
4.1	Gemelos digitales . . . . .	9
4.2	Tecnologías predictivas y de pronóstico inteligente . . . . .	12
4.3	Ciudades y territorios inteligentes . . . . .	16
4.4	Mantenimiento Predictivo . . . . .	21
<b>5</b>	<b>Conclusión: retos y oportunidades bajo el espectro normativo</b>	<b>26</b>

---

## 1. Presentación

Esta comparecencia se enmarca dentro de las actividades del Grupo de Trabajo relativo a la Inteligencia Artificial de la Comisión de Presidencia, Interior, Diálogo Social y Simplificación Administrativa, del Parlamento de Andalucía. Los comparecientes, Juan y Manuel Chiachío Ruano, son Doctores Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, colegiados en el Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Actualmente son Profesores Titulares de la Universidad de Granada, con plaza en la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos. Son los fundadores y directores del grupo de investigación *Laboratorio de Pronóstico Inteligente y Sistemas Estructurales Ciber-físicos-iPMLab* (<https://ipmlab.ugr.es>), registrado como Grupo TEP-1001 del Sistema Andaluz del Conocimiento, dentro de la categoría de Grupos de Investigación. El grupo de investigación iPMLab surge con la visión de impulsar la investigación y transferencia sobre Inteligencia Artificial, y en particular, Gemelo Digital y Mantenimiento Predictivo en infraestructuras. Actualmente cuenta con 11 investigadores contratados procedentes de cinco nacionalidades distintas, siendo un grupo con un marcado carácter internacional. En los últimos 5 años, el grupo ha liderado proyectos de investigación e innovación, en su mayoría de ámbito europeo, por valor de 5M€, algunos aún activos. Fruto de la vocación innovadora y emprendedora del grupo iPMLab, surgió en septiembre de 2023 la empresa de base tecnológica *Quantia Ingeniería y Consultoría S.L.* (<https://quantia.es>), empresa Spin-Off de la Universidad de Granada, de la cual Manuel y Juan Chiachío son cofundadores y sus asesores científicos. Esta labor es compaginada junto a la docencia, la investigación y la dirección del grupo iPMLab.

---

## 2. Introducción

Las tecnologías digitales disruptivas, basadas en la innovación, destacan por su rápida evolución y adaptación a diversos sectores, impulsando nuevos paradigmas comerciales y sociales. La inteligencia artificial (IA) y otras tecnologías digitales están transformando la sociedad en el contexto de lo que puede llamarse la *Cuarta Revolución Industrial*.

Dentro del ecosistema de la IA, existen tecnologías digitales consolidadas y otras emergentes, con una separación difusa entre ambas. No obstante, todas ellas son clave para la transformación digital de la sociedad, con un creciente impacto económico. La IA, y en particular sus aplicaciones, han madurado desde principios del presente siglo y actualmente puede estimarse un impacto económico previsto en 15 billones de euros para 2030. Además, existen numerosos estudios que remarcan su contribución en la consecución de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de la Agenda 2030 de la ONU [1].

Las infraestructuras civiles forman parte de nuestro entorno construido, y son, sin duda, parte de esta cuarta revolución industrial debido al elevado potencial de digitalización de sus activos, explicado por el relativo bajo coste de la digitalización en comparación con los elevados costes de instalación, inspección y operación de las mismas. Por tanto, esta comparecencia se enmarca dentro de las aplicaciones de la IA y tecnologías digitales en el ámbito de la Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos, lo que abarca tanto la construcción, conservación y explotación de infraestructuras, así como la planificación y gestión de la propia ciudad y el entorno construido. Los comparecientes aportan una visión particular sobre este ámbito de conocimiento, desde una óptica obtenida a través de la promoción, gestación y participación en numerosos proyectos de investigación e innovación. Las siguientes secciones proporcionan un texto de ampliación de la comparecencia, y abarcan aspectos que van desde el papel de la Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos en la IA, pasando por los potenciales usos e impactos de la IA en infraestructuras, hasta los retos que afronta el sector bajo la óptica de la reciente normativa sobre IA.

---

### 3. Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos e IA

En esta sección se proporciona una visión sobre el papel de la Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos en la IA, desde un punto de vista competencial y de formación académica.

#### 3.1. La IA en las competencias de la Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos

Desde el punto de vista competencial, se debe remarcar que la Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos es una profesión regulada, con competencias profesionales en la asesoría, análisis, diseño, cálculo, proyecto, planificación, dirección, gestión, construcción, mantenimiento y explotación de infraestructuras, así como de los aspectos medioambientales relacionados con las mismas [2]. Desde el punto de vista legal, la orden CIN/309/2009, de 9 de febrero (BOE-A-2009-2738), es la que establece los requisitos para la verificación de los títulos universitarios oficiales que habilitan para el ejercicio de la profesión. Recientemente, el Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos ha publicado el *Catálogo de Competencias Profesionales de los Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos* [3], como actualización del Anexo I del *Reglamento de Certificación y Acreditación Profesional*. En el citado catálogo, se mencionan competencias específicas sobre:

- A. Vías de comunicación y transportes
- B. Puertos y Costas
- C. Hidráulica y Energía
- D. Urbanismo y Ordenación del Territorio. Ingeniería de la Ciudad y Territorios Inteligentes.<sup>1</sup>

---

<sup>1</sup>Menciona expresamente la planificación y proyecto de todos los trabajos relacionados en este apartado incorporando las nuevas tecnologías. Gestión del territorio inteligente y de los sistemas de movilidad y transportes inteligentes.

---

E. Edificación y aspectos conexos. Estructuras

F. Actividad concesional

G. Medioambiente

H. Seguridad y Salud

**I. Nuevas tecnologías aplicadas a la construcción**

J. Solución extrajudicial de conflictos y colaboración con la administración de justicia.

En todas las actividades competenciales indicadas, y en particular, aquellas relacionadas con el proyecto, conservación y explotación, existe hoy día potencial tecnológico suficiente para el uso y aplicación de la IA. Sin ánimo de rigurosidad, se citan a modo de ejemplo los modelos de IA generativa de soporte en redacción y optimización de proyectos de ingeniería, gemelos digitales y sistemas ciberfísicos para la operación y mantenimiento de infraestructuras, algoritmos predictivos para la explotación y mantenimiento, sistemas expertos de toma de decisiones para el proyecto y operación, etc.

Nótese que el Catálogo de Competencias [3] no especifica, ni tampoco excluye, metodología científico-técnica alguna para la puesta en práctica de las competencias generales de los ICCP. Esto implica que, por ejemplo, el uso de un algoritmo de aprendizaje máquina (como una red neuronal profunda) podría constituir un modelo válido para evaluar el comportamiento de una infraestructura (o de parte de ella), de la misma forma que lo es un modelo basado en simulación física, salvo por las reservas oportunas que puedan establecerse en base a las normativas técnicas de obligado cumplimiento. Además, el catálogo también indica que tienen competencia para cualquier trabajo en el que la titulación de Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos (o Máster en Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos) otorgue la capacidad y los conocimientos para desarrollarlo, en función del esquema de contenidos que establece la orden CIN/309/2009, salvo reserva por ley a otra titulación. En este aspecto, merece destacar que la citada orden CIN, en su Apartado 5

---

indica que los planes de estudio de los ICCP constan de módulos de ampliación de formación científica que confieren *capacidad para abordar y resolver problemas matemáticos avanzados de ingeniería, desde el planteamiento del problema hasta el desarrollo de la formulación y su implementación en un programa de ordenador*. Desde la experiencia de los comparecientes en el desarrollo y uso de modelos y algoritmos de IA en aplicaciones de ingeniería civil, podemos afirmar que los conocimientos necesarios para el desarrollo e implantación de soluciones de IA tienen su base en la formación matemática, y muy particularmente, en la estadística computacional, siendo aspectos cubiertos en los módulos de formación científica y de ampliación científica de los planes de estudio recientes.

No obstante, y adicionalmente a lo expuesto en el párrafo anterior, el Catálogo de Competencias reserva de forma expresa un apartado de competencias dedicado a tecnologías digitales (Apartado I: Nuevas Tecnologías Aplicadas a la Construcción). En este apartado se menciona concretamente el desarrollo de la tecnología *Building Information Modelling* (BIM), el desarrollo, verificación y dirección de proyectos de ciberseguridad, desarrollo, verificación y la gestión de proyectos mediante IA, big data, y gemelos digitales, así como tecnologías de mantenimiento predictivo. En conclusión, el papel de los Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos en la IA en el ámbito de sus diversas aplicaciones a infraestructuras es ya una realidad soportada tanto por la existencia y disponibilidad de tecnologías maduras, así como por los ámbitos competenciales y legales que rigen nuestro desempeño profesional.

### **3.2. IA y la formación de los Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos**

La formación académica de los Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos está reglada en base a planes de estudio que deben adecuarse a los requisitos establecidos en la citada orden CIN/309/2009, y muy particularmente, al esquema de módulos de formación que establece el Apartado 5 de tal norma. Los módulos se clasifican en tres: de ampliación de formación científica (ya mencionado anteriormente), de tecnología específica y trabajo

---

fin de máster. La lectura de las competencias que deben adquirirse dentro de los citados módulos no incluye de forma expresa metodologías ni algorítmicas relacionadas con la IA, aunque sí mencionan competencias relacionadas con modelos computacionales y metodologías matemáticas variadas, que, como se indicó en la sección anterior, son, en parte, la base de la IA.

No obstante, y como apunte crítico, convendría plantear una actualización de las competencias referidas a los dos primeros módulos del Apartado 5 para recoger de forma expresa aquellas relacionadas con la digitalización y la IA, en coherencia con Catálogo de Competencias [3] que ya reconoce el propio Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Desde un punto de vista más pragmático, y bajando al nivel de los propios planes de estudios implantados en las universidades españolas, se observa una clara ausencia de formación específica sobre IA en los estudios de Grado en Ingeniería Civil y de Máster en Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos (ni siquiera, en materias optativas). Tras una primera consulta a los recientes planes de estudio de las universidades públicas españolas donde se expide el mencionado título, se observa que solo algunas universidades, como la Universidad de Granada, la Universidad Politécnica de Madrid y la Universidad Politécnica de Valencia, imparten formación reglada relacionada con la tecnología BIM, lo que podríamos calificar como un mero primer paso en la formación sobre tecnologías digitales. En este ámbito destacan la Universidad Politécnica de Barcelona, que incluye en su plan de estudios una asignatura denominada ‘Aprendizaje automático y modelos para la toma de decisiones’; la Universidad Politécnica de Valencia, con una asignatura optativa denominada ‘Carreteras Inteligentes’; o la Universidad de Extremadura, con la asignatura optativa ‘Sistemas de Transporte y Ciudades Inteligentes’. En todo caso, concluimos que estos ejemplos podrían considerarse solo un primer paso en la actualización de los planes de estudio.

Por tanto, emerge otro discurso crítico en este aspecto, dirigido en este caso a las personas responsables del diseño y actualización de los planes de estudio en Ingeniería de

---

Caminos, Canales y Puertos. Creemos decididamente que es necesario incorporar asignaturas específicas sobre IA en los planes de estudio con objeto de dar respuesta, desde el ámbito académico, a la creciente demanda de profesionales con tal formación, y sobre todo, a las competencias en IA que ya quedan recogidas por el propio Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.

#### **4. Potenciales usos e impactos de la IA en infraestructuras**

Las infraestructuras, ya sean de transporte, hidráulicas, urbanas o energéticas, entre otras, articulan el territorio y lo habilitan para el desarrollo de la vida en toda su extensión. Su papel es fundamental en el funcionamiento de las sociedades modernas, proporcionando conectividad, acceso a recursos y servicios esenciales. La interrupción temporal del servicio que prestan supone uno de los trastornos más severos que puede afrontar una región. Si esta interrupción se prolonga en el tiempo, sus consecuencias pueden derivar en graves perjuicios sociales, daños económicos e impactos ambientales de gran magnitud.

En las últimas cuatro décadas, la mayoría de los países desarrollados han realizado una inversión considerable en construcción y conservación de infraestructuras. Este esfuerzo fue particularmente intenso desde los años noventa hasta el inicio de la crisis financiera de 2008 en España, cuando la construcción y conservación de infraestructuras sufrió una ralentización significativa. Como resultado, el parque de infraestructuras a nivel nacional, aunque relativamente moderno, ha alcanzado estadios relativamente avanzados de degradación. A esta situación se suman varios factores que agravan el desafío de su gestión. En primer lugar, las infraestructuras actuales están sometidas a una creciente demanda de uso, fundamentalmente asociada con la constante concentración de la sociedad en grandes aglomeraciones urbanas y con el crecimiento económico experimentado en las últimas décadas. En segundo lugar, su creciente exposición a estresores ambientales como consecuencia del cambio climático, que genera eventos extremos e inciertos para los cuales

---

muchas de estas infraestructuras no fueron diseñadas.

Frente a estos escenarios de cambio, la gestión predictiva del envejecimiento y de la vida útil remanente de las infraestructuras, apoyada por las tecnologías digitales e IA, se erige como pieza de conocimiento clave para la planificación y conservación racional de nuestras infraestructuras. La alternativa a esta propuesta de gestión predictiva sería un territorio con infraestructuras envejecidas, de funcionalidad impredecible y fiabilidad incontrolada, lo que derivaría en la necesidad de una reposición masiva de infraestructuras con un coste económico, social y ambiental inasumible.

No obstante, la evolución tecnológica y, en particular, el uso de la IA, ofrecen oportunidades realistas para abordar estos desafíos a un coste ínfimo en relación al coste de las consecuencias derivadas de una gestión ineficiente del envejecimiento de las infraestructuras, anteriormente mencionadas. Hoy día están disponibles soluciones digitales avanzadas que abarcan desde la monitorización del estado de salud de las infraestructuras hasta la creación de sistemas ciber-físicos y gemelos digitales, los cuales permiten una gestión inteligente de la vida útil de las infraestructuras. Estos avances representan un cambio de paradigma, facilitando una conservación más eficiente, reduciendo riesgos y prolongando la funcionalidad de las infraestructuras existentes.

En esta sección se repasan y extienden los aspectos más destacados de la comparecencia sobre aplicaciones de la IA en Ingeniería Civil. En particular, este texto desarrolla aspectos sobre las tecnologías asociadas al gemelo digital, las tecnologías predictivas y de pronóstico inteligente, mantenimiento predictivo, ciudad, movilidad y territorios inteligentes, así como los sistemas contextuales de simulación para la planificación y restauración de ciudades. Se debe mencionar que en algunos de los casos, la información aportada aquí es un resumen del texto que puede encontrarse en el libro *Inteligencia Artificial y Tecnologías Digitales para los ODS* [1], en el cual los comparecientes participaron como autores, y que se encuentra disponible en abierto para su lectura, descarga y consulta detallada en la web de la Real Academia de la Ingeniería: <https://www.raing.es/libro/inteligencia->

---

artificial-y-tecnologias-digitales-para-los-ods/. Los autores hacen entrega de un ejemplar impreso del citado libro en el acto de comparecencia.

#### 4.1. Gemelos digitales

El concepto de *gemelo digital* hace referencia a una integración de tecnologías mediante las cuales se permite digitalizar la geometría, comportamiento y operación de un ente físico en entorno real y en tiempo *quasi-real* mediante un modelo digital. El modelo digital representa el ‘espejo’ virtual de la realidad física mediante la transmisión de datos en tiempo real desde los sensores. Los principales atributos de la tecnología (o integración de tecnologías) del gemelo digital son los siguientes:

**Monitorización**, para captar el comportamiento del gemelo físico en operación.

**Modelo digital de simulación**, que reproduzca el comportamiento del gemelo físico con un nivel de confiabilidad suficientemente alto y bajo un contexto de modelización determinado.

**Método de aprendizaje**, que permita actualizar el modelo digital de simulación en función de los cambios experimentados en el gemelo físico.

**Sistema de gestión**, que comande la interacción entre el ente físico y digital. Particularmente, el sistema de gestión se ocupa de controlar cuándo debe aprender el modelo digital, y cuándo y cómo reaccionar ante alguna anomalía detectada, etc.

**Visualización y captación de la realidad**, que permita una fácil interpretación por el humano tanto de los datos como de las simulaciones, así como de toma de decisiones que adopte el sistema.

Un aspecto importante, destacado en alguna de nuestras investigaciones recientes sobre la aplicación de gemelo digital en infraestructuras, es la definición del contexto, lo que

---

hemos dado a conocer como *gemelo digital contextual* [4]. El contexto permite definir una integración tecnológica del gemelo digital enfocada a uno o varios aspectos particulares del funcionamiento y operación de una infraestructura<sup>2</sup>, y por ello, los anteriores atributos deben definirse y aplicarse dentro de un contexto específico. Desde el punto de vista matemático, el contexto delimita el conjunto de parámetros actualizables o de aprendizaje del modelo digital y acota el conjunto de variables a medir por el sistema de monitorización.

Respecto a las aplicaciones del gemelo digital, merece destacar, como una de las principales, la toma de decisiones automática e inteligente en función del estado actual y futuro de la contraparte física (por ejemplo, un puente ferroviario). No obstante, un gemelo digital se puede utilizar para otros propósitos, como pueden ser la simulación y diagnóstico de fallos o comportamientos anómalos, registro de datos históricos, interacción mediante lenguaje natural, o el mero aprendizaje automático, entre otros. El espectro de usos del gemelo digital abre la discusión sobre la definición de la propia tecnología de gemelo digital, lo cual es controvertido y depende de los niveles de madurez de la tecnología. La literatura científica expone diversos niveles de madurez del gemelo digital, con un aumento exponencial de complejidad entre ellos. En particular, se muestra aquí la propuesta de la *Institución de la Ingeniería y Tecnología Británica* (IET) [5], que los clasifica según se muestra en la Tabla 1.

En la actualidad, se puede decir que el nivel de madurez de la mayoría de las aplicaciones de gemelo digital que se encuentran en la práctica están en nivel 3 o menor. Los niveles 4 y 5 de gemelo digital son los que actualmente están en desarrollo en la mayoría de proyectos de investigación e innovación de los que tenemos conocimiento.

Otro de los aspectos importantes a considerar en relación con el nivel de madurez de la tecnología, y de muy importante consideración en el sector de las infraestructuras, es la

---

<sup>2</sup>Téngase en cuenta que una infraestructura es un sistema de ingeniería que, desde el punto de vista del modelado físico-matemático, puede verse desde distintas ópticas: desde la óptica del comportamiento de los materiales, desde la de la estabilidad e integridad geométrica, desde la de la operación y explotación, etc.

---

<b>Nivel</b>	<b>Característica</b>	<b>Descripción</b>
0	Captura de la realidad	Obtención de forma precisa y completa de la geometría del escenario físico. El resultado son nubes de puntos.
1	Modelado 2D/3D	Creación de superficies, polígonos e idealmente objetos cerrados en 3D que representen la realidad.
2	Gemelo digital como modelo 3D con información enriquecida y con semántica	Vinculación de los objetos 3D con bases de datos y dotación de semántica a éstos (p.ej. BIM). Se abre la posibilidad de ejecutar simulaciones numéricas/físicas y responder a preguntas del tipo “¿Qué pasa si...?”
3	Gemelo digital enriquecido con datos de sensores en tiempo real del gemelo físico	Se obtienen en tiempo real datos del entorno del gemelo físico, y se muestran en el virtual. Además, estos datos sirven para analizar el comportamiento.
4	Integración e interacción bidireccional de los gemelos	El gemelo físico puede variar su comportamiento guiado por lo aprendido en su gemelo digital.
5	Funcionamiento y mantenimiento autónomo de los gemelos	Los gemelos digitales aprenden y evolucionan aprendiendo del gemelo físico, siendo capaces de reaccionar a anomalías, realizar tareas de mantenimiento, etc.

---

Cuadro 1: Nivel de madurez de la tecnología de gemelo digital según la IET [1].

escala de aplicación. Los gemelos digitales de nivel 1 a 3 que actualmente hay disponibles en la tecnología (civil e industrial, sobre todo) abarcan la escala real o próxima a la real (mediante pilotos o demostradores). En los casos de nivel 4 y 5, la escala de aplicación suele ser reducida a demostradores de laboratorio o a pilotos experimentales simulados

---

en entornos controlados parecidos al real. No obstante, no abundan proyectos de investigación ni innovación que desarrollen gemelos digitales sobre entes físicos reales de gran complejidad y extensión. Este es uno de los aspectos puestos de manifiesto en una tesis doctoral leída y dirigida en el seno de nuestro grupo de investigación iPMLab [6], en la que se hace hincapié en la necesidad de investigar más sobre la integración total de la tecnología, incluida la integración entre diversos gemelos digitales contextuales, en casos reales de grandes infraestructuras. El motivo, lejos del mero purismo conceptual, reside en que el efecto escala y el entorno real influyen sobremanera en múltiples aspectos de la toma de decisiones en la gestión de infraestructuras. Por tanto, la generación y obtención de datos para la creación de modelos digitales que tomen decisiones sobre la infraestructura deben conocer la realidad operacional de la misma mediante el entrenamiento con datos reales. En este sentido, podemos destacar el proyecto europeo liderado desde el grupo de investigación iPMLab, BUILDCHAIN (*Building knowledge book in the blockchain distributed ledger. Trustworthy building life-cycle knowledge graph for sustainability and energy efficiency* <https://buildchain-project.eu>), financiado mediante el programa Horizon-CL4-Twin-Transition-01 de Horizonte Europa (Unión Europea), coordinado por la Universidad de Pisa (Italia). BUILDCHAIN está desarrollando un gemelo digital de nivel 4 a escala real, usando para ello el edificio del Rectorado de la Universidad de Granada (Hospital Real), entre otros edificios piloto distribuidos en otros países europeos.

#### **4.2. Tecnologías predictivas y de pronóstico inteligente**

Las tecnologías predictivas y de pronóstico, comúnmente conocidas según sus siglas en inglés PHM en referencia a *Prognostics and Health Management*, se ocupan de cuantificar el comportamiento futuro de un componente o subsistema en base a su estado actual conocido mediante monitorización en tiempo real, cuantificando adecuadamente la incertidumbre de dicha predicción [7]. Este proceso se lleva a cabo tomando como base los datos disponibles sobre el historial de comportamiento, modelos dinámicos de evolución

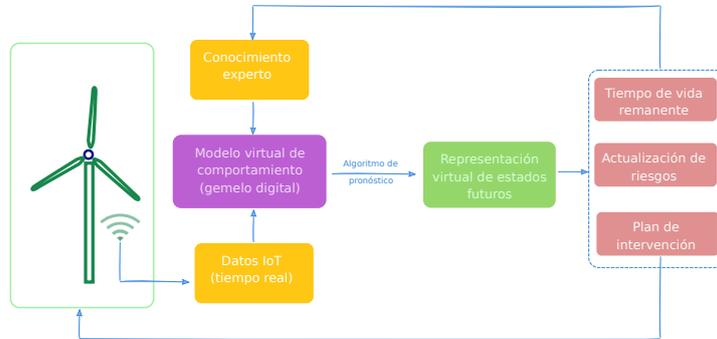


Figura 1: Representación conceptual de la tecnología PHM ejemplificada sobre una turbina eólica.

(si se conocen), y la información procedente de los sensores, usando para ello algoritmos de estadística computacional e IA como los *filtros Bayesianos de partículas* [8] o modelos de aprendizaje máquina [9]. Dentro de ese paradigma, la monitorización constituye un pilar básico pues proporciona el conjunto de medidas sobre el cual se fundamentan y actualizan las predicciones. La Figura 1 muestra una ilustración esquemática de la tecnología PHM para mayor claridad.

La tecnología de pronóstico es un elemento central de la *Gestión de Inteligente Activos Físicos* [10], cuyo objetivo final es la predicción del tiempo de vida remanente del activo en base a una estimación de sus estadios actuales y futuros de degradación. En su aplicación a territorios e infraestructuras inteligentes, la tecnología PHM resulta clave para gestionar de forma anticipada y sostenible el envejecimiento de infraestructuras, al tiempo que se garantiza la adaptabilidad ante las nuevas condiciones climáticas.

De forma sucinta, la tecnología PHM puede ser clasificada en tres grandes bloques en base al motor de predicción [11]:

**Basada en modelos**, utiliza modelos basados en la física de la degradación o el comportamiento del sistema hasta el fallo.

**Basada en datos**, se fundamenta en la detección de anomalías en base a los datos

---

de monitorización y el aprendizaje automático de patrones para predecir estados futuros del sistema.

**Pronóstico híbrido**, combina modelos físicos y análisis de datos, integrando ambos enfoques para mejorar la precisión predictiva.

La elección del método depende de la disponibilidad y calidad de los datos, así como de la viabilidad de modelar físicamente la evolución del activo. Los métodos basados en modelos, generalmente modelos físicos de comportamiento y evolución, son los más precisos y permiten producir los mayores horizontes de predicción [8]. No obstante, no siempre se dispone de modelos que reproduzcan la física del comportamiento del sistema, y si se conocen, el coste computacional puede ser prohibitivo. Existen casos de éxito sobre pronóstico basado en modelos en aplicaciones de fatiga de material aeronáutico [12] y en baterías de litio [13] en los que los comparecientes han contribuido, obteniéndose horizontes de predicción muy elevados. No obstante, tales casos de uso se enmarcaron en el entorno de proyectos de investigación o demostradores piloto. Por otro lado, los modelos basados en datos están en auge debido al aumento de la sensorización basada en IoT y la analítica avanzada [14]. Sin embargo, en aplicaciones a infraestructuras y territorios inteligentes, el pronóstico basado en datos presenta riesgos tecnológicos importantes como la dificultad de sensorización de todas las variables de estado, la desconexión con el conocimiento experto, y la dificultad de predecir patrones de largo plazo no contemplados por los datos, como los producidos por el cambio climático. Por tal motivo, los modelos predictivos híbridos están ganando relevancia al combinar la predictibilidad y adaptabilidad de los modelos físicos con el análisis de datos, mitigando sus limitaciones [9]. Nótese que la tecnología PHM puede verse como parte de la tecnología de gemelos digitales, aunque limitada y focalizada a los aspectos meramente predictivos y de aprendizaje de modelos. De hecho, el auge de los proyectos relacionados con el gemelo digital está acelerando su desarrollo al permitir la simulación ciberfísica de activos, integrando datos de sensores

---

con modelos físicos para optimizar la toma de decisiones anticipadas [6].

El impacto de esta tecnología en las infraestructuras radica en su idoneidad para el aseguramiento de la fiabilidad a largo plazo, y en particular, para la gestión predictiva de la explotación, puesto que permite anticipar decisiones estratégicas sobre el reemplazo de elementos críticos antes de que se produzca su fallo. De forma especial, esta tecnología es clave para sistemas críticos no mantenibles, o sea, aquellos sistemas cuyo riesgo por fallo es elevado, pero que no son intervenibles durante el tiempo de vida u operación del activo. En cualquier caso, es importante remarcar que el despliegue de esta tecnología en la práctica de la ingeniería civil es muy limitado, pese a que metodológicamente no presenta riesgos importantes. Los comparecientes no conocen ningún caso de estudio o demostrador implantado a escala real en el ámbito de las infraestructuras civiles. Los casos conocidos están en el ámbito aeroespacial, y en algunos casos, en la industria energética, en particular, en la industria eólica, aunque a nivel de proyectos de investigación o innovación<sup>3</sup>. Una posible explicación del escaso despliegue de la tecnología PHM en infraestructuras radica en lo que nosotros identificamos como las principales limitaciones técnicas de la misma, que son la durabilidad de la monitorización y su integración con el sistema físico. Respecto a la durabilidad, se menciona el hecho de que los sistemas de monitorización (que son sistemas electrónicos compuestos por redes de sensores, adquirentes de datos y cómputo local) tienen un tiempo de vida y obsolescencia mucho menor que el de la propia infraestructura. Ello hace que tales sensores suelen dejar de funcionar correctamente en el tiempo en que justamente la infraestructura empieza a degradar, que es cuando más útiles son. Por otro lado, la integración de la sensórica con el objeto físico es otro de los retos, pues en múltiples ocasiones, la sensórica interfiere con la geometría o con su funcionalidad. Se pone como ejemplo el caso de la monitorización de plataformas marinas, o de obras marítimas (sometidas a agentes altamente abrasivos) donde la ubicación de sensores

---

<sup>3</sup>Véase el proyecto europeo WINDMILL: *Smart Monitoring, Inspection and Life-Cycle Assessment of Wind Turbines*, Ref.: 679843.

---

solo es sostenible y viable si están integrados o embebidos en el material, confiriendo así una protección natural de los mismos. Aspectos de este tipo han sido investigados en el proyecto de investigación ENHANCE (*European training Network in intelligent prognostics and Health management in composite structures* <https://h2020-enhanceitn.eu>), financiado por el programa Excellent Science - Marie Skłodowska-Curie (H2020), dirigido y coordinado por el Prof. Manuel Chiachío en la Universidad de Granada. Se debe mencionar que el enfoque del citado proyecto estuvo centrado en aplicaciones aeronáuticas y de energía eólica, aunque se obtuvieron resultados y conclusiones sobre PHM exportables a al sector infraestructuras. Existen además notables desarrollos tecnológicos sobre sensores para PHM tales como miniaturización, resiliencia y adaptabilidad a ambientes agresivos, conectividad e integración dentro de entornos de IoT, etc., lo cual supone una oportunidad importante para desarrollos futuros.

En conclusión, puede decirse que el estado de la tecnología actual permite desarrollar soluciones de pronóstico que ofrecen interoperabilidad para gestionar los datos procedentes de los sensores junto con el conocimiento experto acumulado durante años de gestión del ciclo de vida de las infraestructuras. La aparición de la metodología BIM [15, 16] que permite integrar y clasificar los datos de las infraestructuras en capas funcionales de información y gestión, junto a la publicación de normas como la ISO 10303 y la ISO 15926 ha propiciado un impulso de la actividad académica en esta disciplina y un cambio de paradigma en la gestión del pronóstico del tiempo de vida de nuestras infraestructuras.

### **4.3. Ciudades y territorios inteligentes**

La gestión del territorio enfrenta desafíos en la distribución de personas y recursos, el uso del suelo y la sostenibilidad urbana. El rápido crecimiento de las ciudades, el envejecimiento de sus infraestructuras críticas, y la creciente demanda de servicios (energía, agua, transporte, datos) han convertido a las ciudades en oportunidades clave para el desarrollo tecnológico.

---

El concepto de *Ciudad Inteligente* surge como respuesta a estas necesidades, promoviendo un uso más eficiente y sostenible del territorio. Más allá de mejorar servicios, busca optimizar el potencial del territorio en términos espaciales, sociales y económicos. La tecnología digital juega un papel esencial en esta transformación, permitiendo una mejor prestación de servicios, atendiendo a territorios desfavorecidos y fomentando nuevos modelos de negocio. En el concepto de *Ciudad Inteligente*, también ampliamente conocido como *Smart City*, entran en juego diversas tecnologías que interactúan en un entorno complejo, marcado por un alto volumen y volatilidad de datos. La rapidez con la que se generan y pueden aprovecharse estos datos es uno de los principales retos de la Ciudad Inteligente.

Los *Territorios Inteligentes* (Smart Territories) representan la evolución natural de las Ciudades Inteligentes, ampliando el enfoque de aplicación de tecnologías disruptivas más allá del ámbito urbano. No solo las ciudades pueden beneficiarse de la digitalización y la innovación tecnológica, sino también los espacios rurales. Según la Fundación Centro Tecnológico de la Información y la Comunicación (CTIC)<sup>4</sup>, más del 80 % de los municipios españoles son rurales, ocupando el 72,8 % de la superficie del país y albergando al 20 % de la población. Mientras tanto, el 80 % restante reside en ciudades, lo cual representa un reto territorial y de movilidad importante [1]. El desarrollo de los Territorios Inteligentes se posiciona como un objetivo de Innovación Social, alineado con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de las Naciones Unidas. El objetivo de las tecnologías de IA en este contexto consiste en aplicar modelos innovadores en el desarrollo territorial, diseñando estrategias y soluciones tecnológicas que incrementen la movilidad sostenible y la competitividad, potencien las capacidades de desarrollo y las oportunidades de las personas, y promuevan un entorno más inclusivo, diverso y sostenible.

En España, el *Plan Nacional de Ciudades Inteligentes* fue lanzado por el Ministerio de

---

<sup>4</sup>Centro Tecnológico de la Información y la Comunicación <https://www.fundacionctic.org/es/retos/territorios-inteligentes>

---

Energía, Turismo y Agenda Digital para apoyar a las entidades locales en su transformación hacia Ciudades, Destinos y Territorios Inteligentes. Para su implementación, en 2015 se aprobó la norma AENOR CTN 178 de Ciudades Inteligentes [17], que define requisitos, directrices, indicadores y herramientas para el desarrollo de comunidades inteligentes, aplicables a cualquier entidad local. Este marco normativo se concreta en 30 normas que abarcan áreas como eficiencia energética, movilidad, gestión del agua, plataformas digitales urbanas y destinos turísticos inteligentes. Esta norma la consideramos fundamental en el ámbito de la Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos en su contribución a la Ciudad o Territorio Inteligente.

En 2017, el *Plan Nacional de Territorios Inteligentes* amplió este enfoque considerando la diversidad de necesidades en distintos tipos de territorios. Este documento subraya la importancia de coordinar la intervención municipal con la integración de servicios tecnológicos para optimizar costes y mejorar la capacidad de respuesta de las administraciones. A nivel andaluz, conocemos la existencia del Plan de Acción AndalucíaSmart 2020 (PAAS2020), con actuaciones destacadas como la elaboración del *Libro Blanco AndalucíaSmart*, y el impulso del *Andalucía Smart LAB*. En cualquier caso, tanto las iniciativas nacionales como las autonómicas mencionadas indican un importante vector de apoyo institucional a la digitalización del territorio, pese a que el grado de avance, a nivel de realizaciones, aún es escaso.

Respecto a tecnologías, el despliegue de Territorios Inteligentes requiere la integración de los siguientes elementos básicos:

**Redes de sensores**, para monitorización de múltiples parámetros del territorio, entre los que destacan: movilidad, tráfico y señalización, usos sociales, consumos energéticos, contaminación y parámetros ambientales. Actualmente existe tecnología madura de sensórica para la medición de, al menos, los parámetros indicados anteriormente, pese a que cuentan con la misma limitación comentada más arriba: el periodo de obsolescencia (tanto física como a nivel software) de la sensórica es

---

mucho menor que el de los activos que monitorizan, generando un problema extra de *mantenimiento de la capa digital*.

**Tecnología de transmisión**, generalmente mediante Internet de las Cosas (IoT), para posibilitar el flujo de datos desde los sensores hasta los centros de datos. Actualmente existen soluciones integradas de sensores junto a sistemas electrónicos de adquisición y transmisión para medición y digitalización de múltiples parámetros territoriales. Se remarca aquí el hecho de que los Territorios Inteligentes se caracterizan por un flujo de datos muy relevante, cuya transmisión y gestión en servidores requiere de metodologías avanzadas. El 5G es, en ese aspecto, una de las tecnologías habilitadores de mayor relevancia para los Territorios Inteligentes. También destacan las tecnologías de computación en el nodo (*edge computing*), y de federación de datos (*data federation*). El primer caso consiste en realizar parte de la computación en el propio nodo donde se genera el dato, reduciendo la transmisión solo a la información relevante para el análisis, habiendo sido ya procesada y filtrada previamente en el nodo. La federación de datos, por su parte consiste en la creación de una base de datos federada que mapea los nodos donde se generan los datos y envía los modelos o meta-datos que precisan al propio nodo, minimizando, e incluso anulando en algunos casos, la transmisión de datos en crudo al servidor.

**Plataformas de provisión de servicios**, también conocidas como *Service Delivery Platform* (SDP), proporcionan un servicio unificado de acceso, gestión y desarrollo de operaciones para el usuario final, permitiendo la interoperabilidad de datos y la seguridad de los mismos. Estas plataformas generalmente alojan los algoritmos de IA y los modelos digitales que convengan, según la aplicación. Destacamos en este punto el proyecto Smart Citizen<sup>5</sup>, iniciado en 2015 y mencionando en el libro [1], como ejemplo de interconexión de datos basado en geolocalización, hardware

---

<sup>5</sup>Smart Citizen <https://smartcitizen.me>

---

libre (Arduino) y software libre (C++ de código abierto). Su objetivo es fomentar la participación ciudadana mediante la recopilación, análisis y acción sobre datos participativos, construyendo una comunidad virtual en torno al concepto de Ciudadano Inteligente. Para ello, Smart Citizen Platform actúa como solución de *frontend* y *backend* para la ingesta, almacenamiento e interacción con datos públicos, con un enfoque en aplicaciones de detección de multitudes. La plataforma usa una API documentada soportada por el repositorio europeo de ciencia en abierto Zenodo<sup>6</sup>, a través de la cual los datos pueden gestionarse mediante herramientas accesibles, promoviendo un modelo de ciudad inteligente transparente y participativo. Hoy día existen proveedores de servicios para el diseño de plataformas de Territorio Inteligente, aunque con enfoques muy contextualizados a usos concretos (medioambiente, tráfico, movilidad, etc.).

Desde nuestro punto de vista, el impacto de la Ciudad y Territorio Inteligente en el sector de las infraestructuras radica en la integración y coordinación de la información generada por la propia Ciudad Inteligente (consumos, ocupación del viario urbano, tráfico urbano, etc.) con los gemelos digitales contextuales de las infraestructuras críticas que dan soporte a la ciudad (embalses, centrales energéticas, torres de telecomunicaciones, y vías de comunicación). Mediante una adecuada integración de dichos gemelos digitales se posibilita una gestión holística y optimizada de las infraestructuras en su conjunto. Por ejemplo, sería posible prever de forma anticipada el refuerzo y la ampliación del número de carriles de un puente de acceso a una ciudad en función del pronóstico de ocupación de viario y tráfico urbano predicho por la Ciudad Inteligente, y en base a los datos medidos de salud estructural del puente. Del mismo modo, podrían optimizarse las reservas de los depósitos de cabecera en las redes de distribución de agua potable de las ciudades en función de la demanda que predice el gemelo digital del sistema de distribución y de los usos sociales y territoriales predichos por la Ciudad Inteligente (por ejemplo, celebración

---

<sup>6</sup>Zenodo <https://zenodo.org>

---

de grandes eventos que incrementan la población localmente).

Otro de los aspectos de mayor impacto de la Ciudad y Territorio Inteligente radica en la capacidad de optimización para la renovación del parque de vivienda. Numerosas ciudades europeas están inmersas en procesos de renovación de un parque de viviendas considerablemente envejecido, así como su adaptación a las nuevas condiciones climáticas. La reconstrucción total del parque de viviendas no es viable, por motivos que resultan obvios. Por lo que existen numerosas iniciativas para la optimización de la renovación profunda de grandes poblaciones de viviendas, algunas de ellas enmarcadas en convocatorias europeas de colaboración público-privada para proyectos de innovación<sup>7</sup>. En este sentido, el uso del BIM a nivel ciudad, junto a la información generada por la Ciudad Inteligente permitirá seleccionar las mejores estrategias de intervención (aislamiento térmico, acústico, refuerzos estructurales, etc.)<sup>8</sup>.

Para concluir este apartado, se menciona un aspecto de relevancia que supone una barrera de desarrollo de los Territorios Inteligentes, como es la ciberseguridad. Tal y como se comenta más arriba, la Ciudad Inteligente y los Territorios Inteligentes son generadores de datos masivos, muchos de ellos en tiempo real. Tales datos constituyen, en algunos casos, fuentes de información muy sensibles sobre movilidad, usos, preferencias personales, actos administrativos, parámetros ambientales, consumos, etc., por lo que suelen ser foco del cibercrimen. La ciberseguridad constituye, pues, un elemento indisoluble de la integración tecnológica de la Ciudad y Territorio Inteligente.

#### 4.4. Mantenimiento Predictivo

El mantenimiento predictivo engloba una serie de técnicas que integran el estudio y simulación de las operaciones de mantenimiento junto a la evaluación actual y predicha de

---

<sup>7</sup>Véanse las convocatorias del programa europeo *HORIZON-CL5-2024-D4-02-05*

<sup>8</sup>Se remarca aquí la existencia de una guía técnica europea para la adaptación de edificios ante el cambio climático. Ver <https://climate-adapt.eea.europa.eu/en/metadata/guidances/eu-level-technical-guidance-on-adapting-buildings-to-climate-change>

---

los activos mantenibles, mediante técnicas PHM. A diferencia del mantenimiento correctivo, el mantenimiento predictivo busca adelantarse al fallo de manera que se alargue la vida útil de los activos y se reduzca el tiempo de inactividad de estos. El mantenimiento predictivo tiene sus raíces en el desarrollo de la tecnología y el avance de las herramientas de diagnóstico, la automatización y la IA. En sus inicios, se basaba principalmente en enfoques preventivos que comenzaron a utilizar instrumentos de medición y otros dispositivos para monitorizar el estado de ciertos modos de fallo de los equipos, creando modelos digitales sobre la condición de los mismos. Posteriormente se comenzaron a introducir los primeros sensores para realización de predicciones de pronóstico. Los posteriores avances en la computación, junto a la eclosión de las aplicaciones de la IA están teniendo un gran efecto en el mantenimiento predictivo, ya que permiten la evaluación de grandes cantidades de datos recolectados por los sistemas de sensorización y su uso integrado dentro de sistemas expertos de toma de decisiones.

De nuevo, la tecnología de mantenimiento predictivo debe entenderse como una integración de tecnologías, más que una tecnología en sí, compuesta por los siguientes elementos básicos:

**Detección e identificación automática de anomalías**, para identificar patrones inusuales o atípicos en un conjunto de datos que pueden indicar la presencia de eventos inesperados o aparición de modos de fallo. Engloba una amplia gama de algoritmos que van desde el estudio de estadísticos para identificar valores que se desvían significativamente de la norma, hasta métodos más sofisticados como *k-means*, máquinas de soporte vectorial (SVM), modelos LOF (Local Outlier Factor), redes neuronales autoencoder, redes adversariales, filtros de Kalman o de partículas, etc. Estos algoritmos constituyen en sí mismos modelos digitales de autodiagnóstico ante la aparición de uno o varios modos de fallo. Para ello, se ha abundado anteriormente sobre la necesidad de datos, por lo cual suele requerir de un sistema de sensores que monitorice la condición del activo. Alternativamente, se puede realizar

---

detección e identificación automática de anomalías usando datos de inspección y mantenimiento obtenidos sin la intervención directa de redes de sensores, así como mediante bases de datos históricos sobre aparición de modos de fallo. En estos casos, se utilizan metodologías de estadística computacional para modelar la dinámica evolutiva de procesos dinámicos. Entre ellos destacan: modelos de media móvil (series temporales), modelos Weibull, procesos de Markov, procesos Gaussianos, y los modelos de difusión, cuyo uso depende del tipo de proceso y de la calidad y cantidad de datos. No obstante, la eficacia en éste último caso es menor y restringe el abanico de algoritmos de IA que puedan usarse.

**Modelo digital del proceso de mantenimiento.** Predecir los eventos de mantenimiento requiere, por un lado, de la predicción de la evolución de la condición de los activos y de la aparición de anomalías (mediante tecnología PHM), y por otro, de la simulación de la acción de mantenimiento o reparación que se disponga. Parece claro que la intervención que se realiza sobre un activo influye en la respuesta futura del mismo, no solo debido a calidad de la intervención, sino también en cuanto al tiempo dedicado en la propia intervención, recursos, etc. Lo que diferencia el mantenimiento predictivo de la tecnología de pronóstico (PHM) es precisamente la capacidad de predecir no solo la evolución de la fiabilidad del activo mantenible, sino también la propia operación de mantenimiento en sí, con objeto de prever la necesidad de recursos y repuestos, predecir de forma precisa los tiempos de parada, aprovisionamientos financieros, etc. Todo lo anteriormente citado forman el espacio de parámetros que usan los algoritmos de optimización y toma de decisiones del mantenimiento predictivo, como se explicará en el siguiente punto. Dentro de los modelos de simulación del mantenimiento, la literatura científico-técnica ofrece una amplia gama que va desde modelos simples basados en estadísticos de intervención, a modelos de simulación de dependencias funcionales como las cadenas de Markov, redes Bayesianas, diagramas de decisión binarios, y árboles de decisiones

---

[18] (aparte de los modelos basados en aprendizaje máquina, en caso de disponer de datos suficientes sobre operación y mantenimiento). Dentro de los modelos digitales de mantenimiento destacan los basados en grafos de eventos dinámicos [19], puesto que han demostrado ser una herramienta muy potente para modelizar el comportamiento de sistemas complejos pudiendo incorporar las no-linealidades operacionales que tienen lugar en la realidad del mantenimiento. En este aspecto, pueden referirse los desarrollos realizados por los comparecientes en varias publicaciones recientes relacionadas con los proyectos europeos ENHANCE, y BUILDCHAIN [20, 21].

**Algoritmos de optimización y de toma de decisiones**, que usan las predicciones del modelo digital de mantenimiento junto a la información de contexto (disponibilidad de recursos, previsión financiera, costes, etc.) para la recomendación de la acción óptima a adoptar en función de la predicción de comportamiento. Generalmente se usan métodos de optimización metaheurística (como los algoritmos genéticos, algoritmos de enjambre, recocido simulado, o por *colonia de hormigas*), o más recientemente, métodos basados en agentes IA. Éstos últimos, y particularmente los algoritmos basados en aprendizaje por refuerzo profundo, generan de forma automática una base para la toma de decisiones de mantenimiento a modo de sistema experto autoadaptativo, siendo de gran de interés para el mantenimiento predictivo. En este apartado, destacamos los algoritmos de Redes de Petri inteligentes, desarrollados para mantenimiento predictivo en el seno del grupo de investigación iPMLab [22], que combinan modelos dinámicos de eventos Booleanos junto a aprendizaje reforzado para la predicción del mantenimiento junto a la toma de decisiones óptima.

**Plataformas de provisión de servicios.** Similarmente al caso de la Ciudad Inteligente, el mantenimiento predictivo no es útil sin una plataforma que integre las variables de monitorización y predicción, la visualización de los eventos de mante-

---

nimiento futuro, la toma de decisiones, así como su materialización en órdenes de trabajo concisas. Estas plataformas deben permitir la integración de fuentes de datos ciberfísicos (del propio sistema de monitorización y de los procesos cibernéticos) y externos, garantizando la seguridad y la interoperabilidad de los datos recolectados. Las plataformas de provisión de servicios de mantenimiento predictivo han evolucionado durante los últimos años, pasando de ser middleware de comunicaciones funcionales, a plataformas especializadas dependientes del dominio y que proporcionan servicios avanzados. Más recientemente cabe destacar la exploración de tecnologías conversacionales de plataforma en varios proyectos de innovación en marcha a nivel nacional y europeo. Para ello, se emplean tecnologías de estructuración de la base de datos y los modelos de mantenimiento mediante grafos de conocimiento, sobre los cuales actúan modelos de lenguaje IA para su interacción vía lenguaje natural. Ello proporciona una interacción humanizada, lógica, contextual y comprensible para el operario de mantenimiento, que da soporte a los despliegues más técnicos sobre variables de mantenimiento y de condición de los activos.

Tras una lectura de los componentes básicos de la tecnología de Mantenimiento Predictivo, puede observarse el impacto de la IA sobre la ingeniería de mantenimiento, como campo de conocimiento de la Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos. Como se indicó más arriba en este documento, el reto actual de la ingeniería de infraestructuras consiste no solo en construirlas de forma más eficiente y sostenible, sino en conservar y mantener el ecosistema construido bajo parámetros óptimos de sostenibilidad y eficiencia. La incorporación de las tecnologías anteriormente mencionadas en el campo del mantenimiento de infraestructuras es cada vez más acusada e incluso puede decirse que existen iniciativas de innovación muy destacadas con un nivel de madurez tecnológica próxima a mercado. Por otro lado, quisiéramos remarcar aquí la habitual tendencia de llamar Gemelo Digital a la tecnología de Mantenimiento Predictivo bajo el nombre de *Gemelo Digital de Mantenimiento Predictivo*. En general, un desarrollo de Mantenimiento Predictivo podría

---

inscribirse bajo un esquema tecnológico de Gemelo Digital siempre y cuando haya un modelo digital y captura de la realidad física del sistema mantenido, y se requiera de una tecnología de interacción entre el sistema digital y físico en tiempo real (o casi en tiempo real) mediante monitorización de variables mantenibles junto a otras variables del entorno. No obstante, tales atributos no son per se necesarios para el Mantenimiento Predictivo, ni a veces, convenientes, puesto que requieren de despliegues tecnológicos más costosos. En primer lugar, requieren de bases de datos y comunicaciones más complejas para posibilitar la transmisión de datos del Gemelo Digital (más genéricos y de ámbito general). Además, necesitan una mayor capacidad computacional para albergar los algoritmos de Mantenimiento Predictivo junto al modelo digital de Gemelo Digital (más complejo y de mayor volumen de información).

## **5. Conclusión: retos y oportunidades bajo el espectro normativo**

La utilización de sistemas de IA ha demostrado tener potencial suficiente para mejorar el ecosistema de infraestructuras, tanto las de nueva construcción como el parque de infraestructuras construido. El impacto va más allá de la mera gestión digital de los activos físicos, implicando mejoras (sociales, económicas y medioambientales) respecto al uso del territorio y sus recursos. Existen múltiples oportunidades de aplicación que resultan de cruzar el potencial tecnológico existente en IA junto a las necesidades que subyacen en el sector, algunas de las cuales ya han sido remarcadas en la Sección 4 de este texto. La Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos, como profesión dedicada desde sus inicios a la vertebración del territorio, ya hace suyos los retos que implica la digitalización y la IA en aplicación de las infraestructuras, mediante la declaración de competencias específicas, tal y como se ha indicado en la Sección 3. No obstante, merece la pena hacer una discusión sobre otro de los retos importantes a los que nos enfrentamos en relación a la regulación de la IA. Precisamente, de forma muy reciente, el Gobierno de España ha

---

dado luz verde al *Anteproyecto de Ley de Gobernanza de la Inteligencia Artificial (IA)*, según una reciente noticia fechada en este mismo mes de marzo de 2025 en la página web del Ministerio para la Transformación Digital y la Función Pública<sup>9</sup>. Este anteproyecto de ley propone legislación nacional de acuerdo al Reglamento Europeo de Inteligencia Artificial <sup>10</sup>, ya en vigor y aplicable, de forma general, a partir del 2 de agosto de 2026<sup>11</sup>. El citado reglamento establece el marco jurídico para el desarrollo, la introducción en el mercado, y la puesta en servicio de sistemas de AI en los diferentes sectores económicos y las actividades sociales. Si se profundiza en el reglamento sobre lo referido al sector de las infraestructuras se observan los siguientes aspectos a remarcar:

- El Art. 3, en su Apartado 49 clasifica como 'incidente grave' a cualquier incidente o defecto de funcionamiento de un sistema de IA que, directa o indirectamente, tenga como consecuencia una alteración grave e irreversible de la gestión o el funcionamiento de infraestructuras críticas.
- El Art. 55 del reglamento establece que los sistemas de IA son clasificados como de **alto riesgo** en su uso como componentes de seguridad para la gestión y el funcionamiento de infraestructuras digitales críticas, del tráfico rodado y del suministro de agua, gas, calefacción y electricidad. El artículo menciona que los componentes destinados a ser utilizados exclusivamente con fines de ciberseguridad no deben considerarse componentes de seguridad, sino que la seguridad debe recaer en la propiamente adoptada sobre los sistemas de control de la presión del agua o los sistemas de control de las alarmas contra incendios en los centros de computación en la nube, etc. La mayor parte de las aplicaciones de la IA en infraestructuras están destina-

---

<sup>9</sup>[https://digital.gob.es/comunicacion/sala-de-prensa/comunicacion\\_ministro/2025/03/2025-03-11.html](https://digital.gob.es/comunicacion/sala-de-prensa/comunicacion_ministro/2025/03/2025-03-11.html).

<sup>10</sup>Reglamento (UE) 2024/1689 del Parlamento Europeo y Del Consejo de 13 de junio de 2024 por el que se establecen normas armonizadas en materia de inteligencia artificial y por el que se modifican los Reglamentos (CE) n.o 300/2008, (UE) n.o 167/2013, (UE) n.o 168/2013, (UE) 2018/858, (UE) 2018/1139 y (UE) 2019/2144 y las Directivas 2014/90/UE, (UE) 2016/797 y (UE) 2020/1828.

<sup>11</sup>Excepto por las salvedades anunciadas en su Art. 113.

---

das al control de la seguridad, fiabilidad, operatividad y mantenimiento, y pueden clasificarse de alto riesgo.

- El Art. 110 versa sobre los **riesgos sistémicos**, como los procedentes de los efectos negativos del uso de la IA en relación con accidentes graves, perturbaciones de sectores críticos y consecuencias graves para la salud y la seguridad públicas, cualquier efecto negativo real o razonablemente previsible sobre los procesos democráticos y la seguridad pública y económica o la difusión de contenidos ilícitos, falsos o discriminatorios. Dentro de estos riesgos sistémicos menciona expresamente el caso de la **seguridad ciberfísica**, como la capacidad de controlar e interceptar sistemas físicos para interferir en el funcionamiento de infraestructuras críticas.

El Art. 155 establece el marco de **condiciones exigibles a los proveedores de servicios IA para aplicaciones de alto riesgo**, como las de contar con un sistema de vigilancia poscomercialización del sistema IA, u obligación de establecer un canal de comunicación con las autoridades pertinentes ante cualquier incidente grave asociado al uso de sus sistemas de IA.

En consecuencia, se necesita un marco jurídico, armonizado con el de la Unión Europea, que establezca unas normas locales en materia de IA para impulsar el desarrollo, la utilización y la adopción en las infraestructuras, ciudades y gestión del territorio. Particularmente, el Art. 9 indica que deben establecerse normas armonizadas aplicables a la introducción en el mercado, la puesta en servicio y la **utilización de sistemas de IA de alto riesgo** en consonancia con el Reglamento.

En este sentido, emerge uno de los principales retos que identificamos como urgentes sobre la adopción de la IA en nuestro sector. El papel de la Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos en cuanto a la IA no debe limitarse solo a los aspectos técnicos y de desarrollo tecnológico, sino también a asegurar que tales soluciones se diseñan y despliegan bajo el marco normativo nos aplica por ser considerados, en general, como sector de aplicación

---

de IA de alto riesgo.

El segundo reto que emerge de esta discusión es respecto a la formación en IA, aspecto ya introducido en el apartado 3.2. Resulta urgente interpelar a las administraciones y organismos responsables para actualizar, con carácter urgente, los programas formativos de las titulaciones con competencias reconocidas en IA, y particularmente, las titulaciones que impliquen aplicaciones señaladas por el Reglamento Europeo como de alto riesgo. Tal es el caso de la Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos. Nuestras universidades deben asegurar que los titulados tengan las habilidades necesarias para ejercer las competencias digitales y en IA que ya reconoce nuestro sector (ver Sección 3.1), y además, deben asegurar que los egresados están capacitados para ejercerlas con el nivel de responsabilidad que suponen nuestras aplicaciones IA, clasificadas de alto riesgo, en muchos de los casos.

Para finalizar, concluimos este texto de comparecencia remarcando el enorme potencial de las tecnologías digitales y la IA en la Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos. Estamos, sin duda, en el umbral de una nueva era en la ingeniería de infraestructuras, donde la digitalización y la sostenibilidad serán los vectores principales del desarrollo futuro, y cambiarán nuestra forma de diseñar, construir y conservar nuestras infraestructuras.

---

## Referencias

- [1] Rosana Montes et al. *Inteligencia Artificial y tecnologías digitales para los ODS*. Spain's Royal Academy of Engineering: Madrid, Spain, 2021.
- [2] Canales y Puertos Colegio de Ingenieros de Caminos. *Reglamento de Certificación y Acreditación Profesional del Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos*. Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, 2009.
- [3] Canales y Puertos Colegio de Ingenieros de Caminos. *Catálogo de Competencias profesionales de los Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos*. Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, 2023.
- [4] Manuel Chiachío et al. «Structural digital twin framework: Formulation and technology integration». En: *Automation in Construction* 140 (2022), pág. 104333.
- [5] S. Evans et al. *Digital Twins for the Built Environment*. Inf. téc. Institution of Engineering y Technology (IET), 2019.
- [6] María Megía Cardenoso. *Digital Twins in Civil Engineering: Conceptual Framework and Real-World Implementations*. Universidad de Granada, 2024.
- [7] Charles R Farrar y Nick AJ Lieven. «Damage prognosis: the future of structural health monitoring». En: *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* 365.1851 (2007), págs. 623-632.
- [8] Juan Chiachio-Ruano, Manuel Chiachio-Ruano y Shankar Sankararaman. *Bayesian Inverse Problems: Fundamentals and Engineering Applications*. CRC, 2023.
- [9] Juan Fernández et al. «Training of physics-informed Bayesian neural networks with ABC-SS for prognostic of Li-ion batteries». En: *Computers in Industry* 155 (2024), pág. 104058.

- 
- [10] Antonio Jesús Guillén López et al. «Prognostics and health management in advanced maintenance systems». En: *Advanced Maintenance Modelling for Asset Management*. Springer, 2018, págs. 79-106.
- [11] Piero Baraldi et al. «Model-based and data-driven prognostics under different available information». En: *Probabilistic Engineering Mechanics* 32 (2013), págs. 66-79.
- [12] Juan Chiachío et al. «Condition-based prediction of time-dependent reliability in composites». En: *Reliability Engineering & System Safety* 142 (2015), págs. 134-147.
- [13] Matthew Daigle y Chetan S Kulkarni. «End-of-discharge and end-of-life prediction in lithium-ion batteries with electrochemistry-based aging models». En: *AIAA Infotech@ aerospace*. 2016, pág. 2132.
- [14] Samir Khan y Takehisa Yairi. «A review on the application of deep learning in system health management». En: *Mechanical Systems and Signal Processing* 107 (2018), págs. 241-265.
- [15] Salman Azhar. «Building information modeling (BIM): Trends, benefits, risks, and challenges for the AEC industry». En: *Leadership and management in engineering* 11.3 (2011), págs. 241-252.
- [16] Aaron Costin et al. «Building Information Modeling (BIM) for transportation infrastructure—Literature review, applications, challenges, and recommendations». En: *Automation in Construction* 94 (2018), págs. 257-281.
- [17] Comité Técnico de Normalización de AENOR. *Las Normas para las Ciudades Inteligentes. Informe de situación*. Asociación Española de Normalización y Certificación. 2015.
- [18] Hongzhou Wang, Hoang Pham et al. *Reliability and optimal maintenance*. Vol. 14197. Springer, 2006.

- 
- [19] Tadao Murata. «Petri nets: Properties, analysis and applications». En: *Proceedings of the IEEE* 77.4 (1989), págs. 541-580.
- [20] Manuel Chiachío et al. «Plausible Petri nets as self-adaptive expert systems: A tool for infrastructure asset monitoring». En: *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering* 34.4 (2019), págs. 281-298.
- [21] Manuel Chiachío et al. «A new paradigm for uncertain knowledge representation by Plausible Petri nets». En: *Information Sciences* 453 (2018), págs. 323-345.
- [22] Ali Saleh et al. «Self-adaptive optimized maintenance of offshore wind turbines by intelligent Petri nets». En: *Reliability Engineering & System Safety* 231 (2023), pág. 109013.