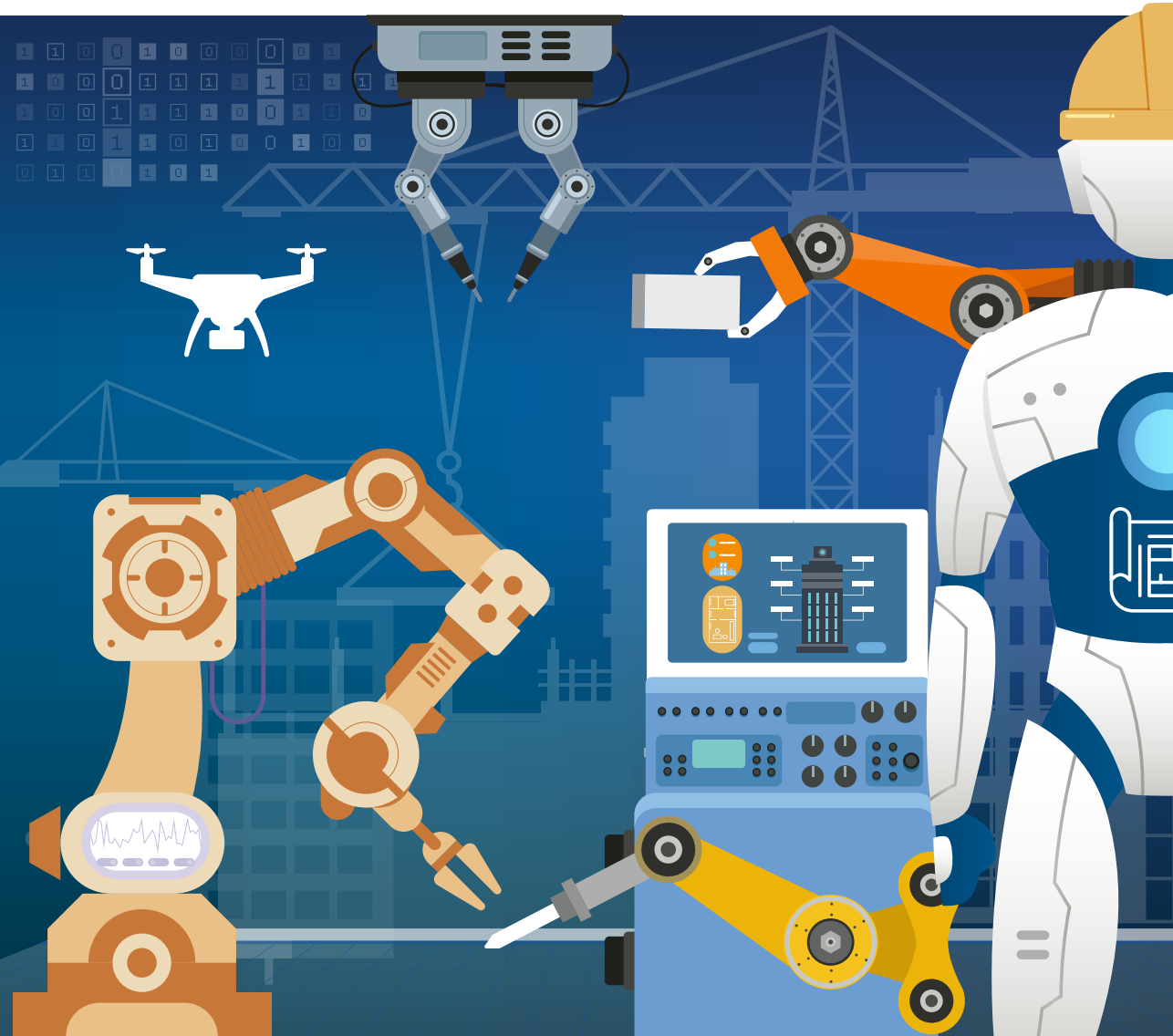




# Libro Blanco de Robótica en la Construcción

## HACIA UN MAYOR IMPACTO TECNOLÓGICO DEL SECTOR



Co-editores:



Plataforma  
Tecnológica  
Española de  
Robótica

Con el patrocinio de:



ISBN: 978-84-09-83382-5

# PRÓLOGO

El vertiginoso avance tecnológico marca un antes y un después para el desarrollo del sector de la construcción y para la sociedad en general. Estamos viviendo una transformación en todos los procesos involucrados que permiten construir mejor, más rápido, más seguro y sostenible. Los avances en Inteligencia Artificial (IA), robótica inteligente, nuevos materiales y las comunicaciones globales, entre otros, hacen cambiar los paradigmas de una década a otra.

Son numerosos los estudios que destacan a la robótica como tecnología emergente en la industria de la construcción. El último informe de la *International Federation of Robotics* (IFR)<sup>1</sup> sobre las 5 tendencias globales de la robótica para 2025 destaca la construcción como un área prioritaria de aplicación. Constantemente están apareciendo nuevas empresas con nuevos productos que van desde robots específicamente diseñados y aplicados en la construcción hasta sensores y actuadores de altas prestaciones, y software específico.

La industria de la construcción española no puede quedar ajena a este cambio y necesita liderar estos avances para generar un mayor impacto en el sector. La competencia y el mercado global hacen necesario un cambio de rumbo que incluya necesariamente la robótica inteligente, entendida en un sentido amplio, como elemento fundamental de desarrollo. Por ello, este Libro Blanco pretende hacer una revisión del actual estado del arte y servir de foro de discusión y guía tanto para las empresas constructoras, usuarias de estas tecnologías, como para las nuevas empresas tecnológicas que tengan como objetivo nuestro sector.

**Pedro Fernández**  
Presidente de PTEC

**Jorgina Díaz**  
Presidenta de HispaRob

**Carlos Balaguer**  
Coordinador del Libro Blanco

---

<sup>1</sup> Top 5 Global Robotics Trends 2025, International Federation of Robotics reports, January 2025.

# ÍNDICE

|  |           |
|--|-----------|
| Prólogo  | 1         |
| Índice   | 2         |
| Lista de acrónimos                                   | 4         |
| Resumen ejecutivo                                    | 6         |
| Summary  | 8         |
| <b>1. Introducción</b>                               | <b>10</b> |
| <b>2. Impacto socioeconómico</b>                     | <b>12</b> |
| 2.1. Estadísticas del sector                         | 12        |
| 2.2. Aumento de productividad y calidad              | 13        |
| 2.3. Mejora de la seguridad, salud y medioambiente   | 14        |
| 2.4. Normativa aplicada                              | 16        |
| 2.5. Regulación laboral y roboética                  | 18        |
| <b>3. Áreas de aplicaciones de la robótica</b>       | <b>19</b> |
| 3.1. Industrialización y prefabricación modular      | 19        |
| 3.2. Edificación                                     | 21        |
| 3.3. Obra civil                                      | 24        |
| 3.4. Inspección y mantenimiento                      | 27        |
| 3.5. Clasificación y separación de residuos          | 30        |
| 3.6. Transporte y logística                          | 33        |
| <b>4. Tecnologías robóticas para la construcción</b> | <b>36</b> |
| 4.1. Plataformas robóticas                           | 36        |
| 4.1.1. Robots móviles                                | 36        |
| 4.1.2. Manipuladores móviles                         | 37        |
| 4.1.3. Robots controlados por cables                 | 38        |
| 4.1.4. Robots caminantes: humanoides y cuadrúpedos   | 39        |
| 4.1.5. Robots escaladores                            | 40        |
| 4.1.6. Exoesqueletos y sistemas vestibles            | 41        |
| 4.1.7. Vehículos Aéreos no-Tripulados (UAV)          | 42        |
| 4.1.8. Robots marinos y submarinos                   | 43        |

|   |           |
|---|-----------|
| 4.2. Sistemas de percepción                             | 45        |
| 4.2.1. Visión artificial                                | 45        |
| 4.2.2. Sensores basados en láser                        | 46        |
| 4.2.3. Sensores de imagen sin línea directa de visión   | 47        |
| 4.2.4. Sensores de fuerza/par y tacto                   | 48        |
| 4.2.5. Sistemas de posicionamiento global e IMU         | 50        |
| 4.2.6. Sensores para ensayos no destructivos            | 51        |
| 4.2.7. Integración de la información sensorial          | 52        |
| 4.2.8. Redes de sensores                                | 53        |
| 4.3. Control de robots                                  | 54        |
| 4.3.1. Arquitecturas de control                         | 54        |
| 4.3.2. Programación de robots                           | 57        |
| 4.3.3. Navegación de robots                             | 58        |
| 4.3.4. Simuladores de robots                            | 59        |
| 4.3.5. Interacción humano-robot                         | 61        |
| 4.3.6. Robots autónomos vs teleoperados                 | 62        |
| 4.3.7. Integración con sistemas BIM y GIS               | 63        |
| 4.4. Automatización de la construcción                  | 65        |
| 4.4.1. Robotización de la maquinaria                    | 65        |
| 4.4.2. Fabricación aditiva                              | 66        |
| 4.4.3. Gemelo Digital                                   | 67        |
| 4.4.4. Realidad Virtual y Aumentada                     | 69        |
| 4.4.5. Redes de telecomunicación                        | 70        |
| <b>5. Inteligencia Artificial, Datos y Robótica</b>     | <b>72</b> |
| 5.1. Inteligencia Artificial                            | 72        |
| 5.2. Los datos  | 76        |
| 5.3. IA, Datos y Robótica aplicados a la construcción   | 79        |
| <b>6. Oportunidades y futuro tecnológico del sector</b> | <b>85</b> |
| 6.1. Oportunidades                                      | 85        |
| 6.2. Formación  | 87        |
| 6.3. I+D en robótica en la construcción                 | 90        |
| <b>7. Conclusiones</b>                                  | <b>94</b> |
| <b>8. Participantes</b>                                 | <b>95</b> |
| 8.1. Entidades  | 95        |
| 8.2. Colaboradores                                      | 96        |
| 8.3. Patrocinadores                                     | 96        |
| <b>Anexo I: Casos de uso</b>                            | <b>97</b> |

# LISTA DE ACRÓNIMOS

|                |   |
|----------------|---|
| <b>ADRA</b>    | <i>AI, Data, Robotics Association</i> (Asociación de IA, Datos, Robótica)   |
| <b>AGV</b>     | <i>Automated Guided Vehicle</i> (Vehículo de Guiado Automático)   |
| <b>AMR</b>     | <i>Autonomous Mobile Robot</i> (Robot Móvil Autónomo)   |
| <b>ANN</b>     | <i>Artificial Neural Network</i> (Redes Neuronales Artificiales)  |
| <b>ATEX</b>    | <i>Atmosphères Explosibles</i> (Atmósferas Explosivas)  |
| <b>ATS</b>     | <i>Autonomous Transportation Systems</i> (Sistemas de Transporte Autónomo)  |
| <b>AUV</b>     | <i>Autonomous Underwater Vehicle</i> (Vehículo Submarino Autónomo)  |
| <b>BIM</b>     | Building Information Modeling   |
| <b>BLE</b>     | <i>Bluetooth Low Energy</i> (Bluetooth de Bajo Consumo)   |
| <b>CCD</b>     | <i>Charge Coupled Device</i> (Dispositivo de Carga Acoplada [para cámaras])   |
| <b>CDPR</b>    | <i>Cable-Driven Parallel Robot</i> (Robot Paralelo Accionado por Cable)   |
| <b>CPD</b>     | Centros de Procesamiento de Datos   |
| <b>DE-UTL</b>  | <i>Deep-ensemble Unsupervised Transfer-Learning</i> (Aprendizaje por Transferencia no Supervisado de Conjunto Profundo) |
| <b>DL</b>      | <i>Deep Learning</i> (Aprendizaje Profundo)   |
| <b>DPP</b>     | <i>Digital Product Passport</i> (Pasaporte Digital de Producto)   |
| <b>DRL</b>     | <i>Deep Reinforcement Learning</i> (Aprendizaje Profundo por Refuerzo)  |
| <b>ECST</b>    | <i>European Credit Transfer System</i> (Sistema Europeo de Transferencia y Acumulación de Créditos [universidad])       |
| <b>FMS</b>     | <i>Fleet Management Systems</i> (Sistemas de Gestión de Flotas)   |
| <b>GAI</b>     | Generative AI (IA Generativa)   |
| <b>GIS</b>     | <i>Geographic Information System</i> (Sistema de Información Geográfica)  |
| <b>GNSS</b>    | <i>Global Navigation Satellite System</i> (Sistema Global de Navegación por Satélite)                                   |
| <b>GPR</b>     | <i>Ground Penetrating Radar</i> (Radar de Penetración Terrestre)  |
| <b>GPS</b>     | <i>Global Positioning System</i> (Sistema de Posicionamiento Global)  |
| <b>HMI</b>     | <i>Human-Machine Interface</i> (Interfase Hombre Máquina)   |
| <b>HRC</b>     | <i>Human-Robot Collaboration</i> (Colaboración Humano-Robot)  |
| <b>HRI</b>     | <i>Human-Robot Interaction</i> (Interacción Humano-Robot)   |
| <b>I&amp;M</b> | <i>Inspection and Maintenance</i> (Inspección y Mantenimiento)  |
| <b>IA</b>      | Inteligencia Artificial   |
| <b>IAAS</b>    | <i>Infrastructure as a Service</i> (Infraestructura como Servicio)  |
| <b>ICT</b>     | <i>Information and Communication Technologies</i> (Tecnologías de la Información y la Comunicación [TIC])               |
| <b>IFC</b>     | <i>Industry Foundation Classes</i> (Clases Fundamentales para la Industria)   |
| <b>IIoT</b>    | <i>Industrial Internet of Things</i> (Internet Industrial de las Cosas)   |
| <b>IMU</b>     | <i>Inertial Measurement Unit</i> (Unidad de Medición Inercial)  |
| <b>IoC</b>     | <i>Internet of Construction</i> (Internet de la Construcción)   |

|              |  |
|--------------|--|
| <b>IoT</b>   | <i>Internet of Things</i> (Internet de las Cosas)  |
| <b>ISO</b>   | <i>International Organization for Standardization</i> (Organización Internacional de Normalización)        |
| <b>ITS</b>   | <i>Intelligent Transportation System</i> (Sistemas Inteligentes de Transporte)                             |
| <b>LBM</b>   | <i>Large Behaviors Model</i> (Modelo Grande de Comportamiento)   |
| <b>LIDAR</b> | <i>Light Detection and Ranging</i> (Detección y Medición de Luz [láser])                                   |
| <b>LLM</b>   | <i>Large Language Model</i> (Modelo Grande de Lenguaje)  |
| <b>LOC</b>   | <i>Learning-based Optimal Configuration</i> (Configuración Óptima basada en el Aprendizaje)                |
| <b>LSTM</b>  | <i>Long Short-Term Memory</i> (Memoria a Largo y Corto Plazo)  |
| <b>ML</b>    | <i>Machine Learning</i> (Aprendizaje Máquina)  |
| <b>NDT</b>   | <i>Nondestructive Testing</i> (Ensayo no destructivo)  |
| <b>NLOS</b>  | <i>Non-line-of-sight</i> (Sin Línea de Visión)   |
| <b>PID</b>   | <i>Proportional-Integral-Derivative</i> (Proporcional-Integral-Derivativo [controlador])                   |
| <b>PSO</b>   | <i>Particle Swarm Optimization</i> (Optimización por Enjambre de Partículas)                               |
| <b>RA</b>    | Realidad Aumentada   |
| <b>RAC</b>   | <i>Robotics and Automation in Construction</i> (Robótica y Automatización en la Construcción)              |
| <b>RAMI</b>  | <i>Reference Architectural Model Industrie</i> (Modelo Arquitectónico de Referencia de la Industria [4.0]) |
| <b>R-CNN</b> | <i>Region Based Convolutional Neural Network</i> (Red Neuronal Convolutiva basada en Regiones)             |
| <b>RL</b>    | <i>Reinforcement Learning</i> (Aprendizaje por Refuerzo)   |
| <b>RNN</b>   | <i>Recurrent Neural Network</i> (Red Neuronal Recurrente)  |
| <b>ROS</b>   | <i>Robot Operating System</i> (Sistema Operativo Robótico)   |
| <b>ROV</b>   | <i>Remotely Operated Vehicle</i> (Vehículo Operado Remotamente [submarino])                                |
| <b>RV</b>    | Realidad Virtual   |
| <b>SLAM</b>  | <i>Simultaneous Localization and Mapping</i> (Localización y Modelado Simultáneos)                         |
| <b>TBM</b>   | <i>Tunnel Boring Machine</i> (Tuneladora)  |
| <b>ToF</b>   | <i>Time-of-Flight</i> (Tiempo de Vuelo [cámara])   |
| <b>TRL</b>   | <i>Technology Readiness Level</i> (Nivel de Madurez Tecnológica)   |
| <b>UAV</b>   | <i>Unmanned Aerial Vehicle</i> (Vehículo Aéreo no Tripulado)   |
| <b>US</b>    | <i>Ultrasonidos</i> (Ultrasonidos)   |
| <b>USBL</b>  | <i>Ultra-Short Base Line</i> (Línea de Base Ultra Corta [sonar])   |
| <b>V2X</b>   | <i>Vehicle to Vehicle</i> (Vehículo a Vehículo [comunicación])   |
| <b>WSN</b>   | <i>Wireless Sensor Network</i> (Red Inalámbrica de Sensores)   |

# RESUMEN EJECUTIVO

La robótica es uno de los pilares indiscutibles de la actual 4ª revolución industrial. Su evolución está permitiendo una transición desde la tradicional robótica industrial, centrada fundamentalmente en los sectores del automóvil y manufacturero, hacia la robótica avanzada en nuevas aplicaciones tales como servicios, asistencia, medicina, educación, agricultura y otros. El término “Robótica y Automatización en la Construcción” (*Robotics and Automation in Construction – RAC*), creado a finales de la década de los 90 del siglo pasado por las principales empresas constructoras japonesas, tenía como justificación “la transición de un proceso totalmente manual al sistema automatizado que permita aumentar la productividad” y, a la vez “mejorar el control de calidad”.

Más recientemente se acuña el termino Construcción 4.0<sup>3</sup> que refleja la tendencia de la industria de la construcción de integrar los últimos avances tecnológicos en la industria manufacturera, especialmente la robótica, los sistemas ciber-físicos y el mundo digital bajo un mismo paraguas. Se trata de plantearse la pregunta de si las edificaciones y las infraestructuras se podrían construir como los coches, siguiendo los preceptos de una producción manufacturera. En la actualidad estamos viviendo un nuevo paradigma, que une la robótica con la Inteligencia Artificial (IA) y permite contar con robots inteligentes que podrán ser introducidos con gran éxito en nuevos sectores tales como la construcción.

Mientras la construcción es una de las industrias con un alto nivel de aportación al PIB español, del orden del 5,3 %<sup>4</sup>, su nivel de robotización y automatización se puede estimar bajo. Por ello, se considera estratégica la introducción de las nuevas tecnologías robóticas inteligentes en el sector que permitan mejorar, por un lado, la productividad, calidad y la eco-sostenibilidad de la construcción, y por otro mejorar las condiciones de trabajo y aumentar la seguridad laboral. Estas tecnologías deben ser adoptadas por las empresas españolas de manera urgente para mantener su nivel de competitividad y hacer frente a una creciente competencia de otras regiones del mundo.

---

<sup>2</sup> Carlos Balaguer and Mohamed Abderrahim, *Robotics and Automation in Construction*, IntechOpen, 2008.

<sup>3</sup> Anil Sawhney, Michael Riley, Javier Irizarry (Eds.), *Construction 4.0: An Innovation Platform for the Built Environment*, Routledge, 2020.

<sup>4</sup> Peso del sector de la construcción en el PIB de España 2005-2023, Statista, 2025.

La introducción de la robótica en la construcción debe efectuarse desde el conocimiento y asimilación de esas tecnologías que necesariamente pasa por la formación del personal técnico y directivo actual, y por la incorporación de talento joven. Además, y siguiendo el ejemplo de otras industrias como la aeronáutica, en la construcción actual se precisan equipos multidisciplinares que aborden los problemas desde diferentes puntos de vista. A los tradicionales equipos de ingenieros y técnicos del sector de la construcción (ingenieros de caminos, ingenieros civiles, arquitectos, etc.) se deberían incorporar expertos en robótica, automatización, digitalización, ingeniería de datos, informática, IA, etc. Además, este cambio de ciclo tecnológico necesita el apoyo al emprendimiento e intra-emprendimiento mediante la creación de nuevas *spin-off* y *start-ups* tecnológicas.

La robótica inteligente se distingue por desarrollar sistemas total o parcialmente autónomos en una diversidad de aplicaciones como la edificación, obra civil, e inspección y mantenimiento. Los robots empleados pueden ser de diferente tipología, manipuladores, robots móviles terrestres, marinos y aéreos (drones), robots escaladores y humanoides, pero todos ellos comparten muchas tecnologías comunes como la navegación, manipulación y la toma de decisión, todo ello en tiempo-real. El término anglosajón *field robotics*, empleado para esta robótica, define muy bien el entorno de trabajo de la construcción que es altamente desestructurado. Por ello, éstos deben contar con potentes sistemas sensoriales para el modelado del entorno, visión artificial, láseres, georradars, sistemas de integración BIM (*Building Information Modeling*) o similar, así como con herramientas integradas de IA.

El objetivo de este Libro Blanco es ser un documento de referencia sobre estas tecnologías, tanto para las empresas (grandes y PYMEs) y las administraciones públicas y organismos de financiadores de la innovación, como para los centros de I+D. Se pretende que el lector entienda la temática, sin excesivos tecnicismos, y sepa distinguir entre lo que hoy en día es posible y lo que pertenece al campo de la ciencia ficción. Por otro lado, se apuntan tendencias futuras de la robótica inteligente que permitan mejor planificar las acciones estratégicas de las empresas.

Además, se pretende que el texto sirva de punto de partida para una discusión abierta que permita proponer nuevas actuaciones y analizar los condicionantes de la aplicación de la robótica inteligente en la construcción. Por otro lado, numerosos expertos presentan los resultados de varios proyectos, tanto nacionales como internacionales, que ilustran los últimos avances.

Por último, pero por ello no menos importante, hay que destacar que este Libro Blanco ha sido elaborado por un equipo conjunto de la Plataforma Tecnológica Española de la Construcción (PTEC) y la Plataforma Tecnológica Española de Robótica (HispaRob) que agrupan a más de 200 empresas del sector tanto de la construcción como de robótica y tecnologías asociadas, así como de centros de I+D y universidades.

# SUMMARY

Robotics is one of the undisputed pillars of the current 4th Industrial Revolution. Its evolution is enabling a transition from traditional industrial robotics, focused primarily on the automotive and manufacturing sectors, to advanced robotics in new applications such as services, assistance, medicine, education, agriculture, and others. The term "Robotics and Automation in Construction" (RAC), introduced in the late 1990s by leading Japanese construction companies, was justified by "the transition from a completely manual process (in construction) to an automated system that increases productivity" and, at the same time, "increases quality control."

More recently, the term "Construction 4.0" was coined, reflecting the trend in the construction industry to integrate the latest technological advances in manufacturing, especially robotics, cyber-physical systems, and the digital world, under a single umbrella. It raises the question of whether buildings and roads could be built like cars, following the precepts of manufacturing production. We are currently experiencing a new paradigm that unites robotics with Artificial Intelligence (AI) and allows for the development of intelligent robots that can be successfully introduced into new sectors such as construction.

While construction is one of the industries with a high contribution to Spanish GDP, around 5,3 %, its level of robotization and automation can be estimated to be low. Therefore, the introduction of new intelligent robotic technologies in the sector is considered strategic. These technologies, on the one hand, will improve productivity, quality, and the eco-sustainability of construction, and, on the other, improve working conditions and increase workplace safety. Spanish companies must urgently adopt these technologies to maintain their competitiveness and face growing competition from other regions of the world.

The introduction of robotics in construction must be based on the knowledge and assimilation of these technologies, which necessarily involves the training of current technical and managerial personnel and the recruitment of young talent. Furthermore, and following the example of other industries such as aeronautics, current construction requires multidisciplinary teams that approach problems from different perspectives. Traditional teams of road engineers and technicians should be joined by experts in robotics, automation, digitalization, data engineering, computer science, AI, etc. Furthermore, this shift in the technological cycle requires support for entrepreneurship and intrapreneurship through the creation of new technological spin-offs and startups.

Intelligent robotics is characterized by the development of fully or partially autonomous systems in a variety of applications such as building erection, civil engineering, and inspection and maintenance. The robots used can be of different types—manipulators, mobile robots, marine, and aerial robots (drones), climbing robots, and humanoids—but they all share many common technologies such as real-time navigation, manipulation, and decision-making. The term "field robotics," used for this robotics, perfectly defines the highly unstructured construction work environment. Therefore, these systems must have powerful sensory systems for environmental modeling, computer vision, láseres, ground-penetrating radars, BIM (Building Information Modeling) integration systems, or similar, as well as integrated AI tools.

The objective of this White Paper is to be a reference document on these technologies, both for companies (large and SMEs), public administrations, funding agencies, and R&D centers. The aim is for the reader to understand the topic without excessive technical jargon and to distinguish between what is possible today and what belongs to the realm of science fiction. Furthermore, future trends in intelligent robotics are outlined to better plan companies' strategic actions.

Also, the text is intended to serve as a starting point for an open discussion that will allow for the proposal of new actions and the analysis of the conditions for the application of intelligent robotics in construction. Numerous experts also present the results of several national and international projects that illustrate the latest advances.

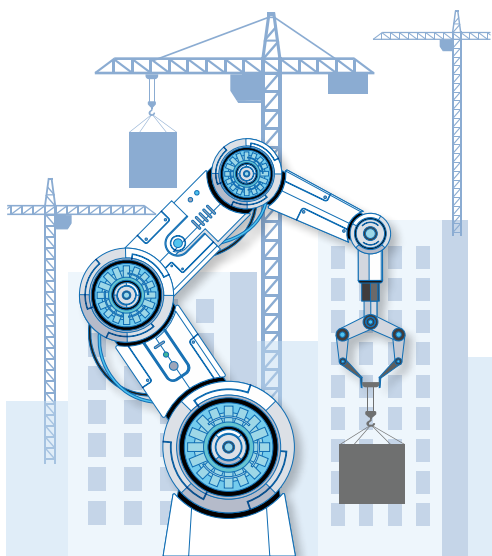
Last but not least, it should be noted that this White Paper was prepared by a joint team from the Spanish Construction Technology Platform (PTEC) and the Spanish Robotics Technology Platform (HispaRob), which brings together more than 200 companies from the construction, robotics, and associated technologies sectors, as well as R&D centers and universities.

# 1. INTRODUCCIÓN

El Libro Blanco está estructurado en varios capítulos que pretenden abarcar la totalidad de la problemática desde la concepción del proyecto constructivo hasta la demolición y valorización de residuos de las edificaciones u obras civiles. El enfoque es abordar la robotización y la automatización de la construcción teniendo en cuenta todo el ciclo de vida de la obra. El documento presenta tanto el estado del arte de las tecnologías de la robótica inteligente como las aplicaciones más avanzadas, todo ello desde el punto de vista de los usuarios, sin ahondar en los aspectos técnicos que se podrán consultar en la bibliografía referenciada.

Como se ha señalado, el documento va dirigido principalmente a las empresas del sector de la construcción para poder planificar su desarrollo futuro con la incorporación de las nuevas tecnologías robóticas. Tanto la dirección como los departamentos técnicos podrán tener una visión global del conjunto en un texto resumido. Pero también, puede ser de gran utilidad para las empresas de robótica que pretendan adaptar sus productos a las particularidades del sector dado que las especificidades de este tipo de aplicaciones son importantes, en entornos al aire libre y no estructurados, manipulación de grandes y voluminosas cargas, bajo nivel de repetitividad en las características de las obras, etc.

El capítulo 2 está dedicado al impacto socioeconómico de la robótica en el sector de la construcción. Se analizan los principales beneficios directos e indirectos (productividad, competitividad, calidad, empleo de mayor cualificación, seguridad) así como los aspectos más delicados a tener en cuenta (formación y educación continua, aceptabilidad de la robótica, roboética, relación humano-robot). Por otro lado, se analiza el impacto de la robotización en el sector que conllevaría a nuevos modelos de negocio alineando a los diferentes actores participantes (*stakeholders*) con la filosofía de *win-to-win*. Todo ello debe ser llevado a cabo por equipos multidisciplinares que empleen técnicas de ingeniería concurrente y trabajo en grupo (*teamworking*).



El capítulo 3 está dedicado a las principales áreas de aplicación de la robótica que se dividen en edificación (residencial, comercial y oficinas), obra civil (carreteras, vías férreas, puentes, túneles), inspección y mantenimiento (periódico y por demanda), clasificación y separación de residuos (ecosostenible, respetuoso con el ambiente), transporte (reducción de la congestión y del CO<sub>2</sub>) y entornos críticos (centrales eléctricas, granjas solares y eólicas). En línea con el recientemente anunciado PERTE del plan de vivienda se hace una especial atención a la problemática de la construcción industrializada, prefabricada y modular.

El capítulo 4, que es el grueso del documento, describe las tecnologías robóticas para la construcción. Se inicia con la descripción de las plataformas robóticas (robots móviles, drones, exoesqueletos, etc.) muchas de las cuales no son comerciales y han sido desarrolladas *ad hoc*. Se pretende que el lector entienda la diferencia entre el uso de un sistema robótico específico y las posibles actuaciones cooperativas entre diferentes tipos de robots. A continuación, se incide en los sistemas de percepción que permiten modelar el entorno (cámaras, láseres) para obtener información de las variables físicas de los procesos (tacto, fuerza). De crucial importancia es la integración de la información sensorial para poder ser fusionada inteligentemente en sistemas multisensoriales.

El apartado del control de robots se centra en la forma de controlar y programar los robots en el entorno de la construcción, que es muy diferente a otros sectores como puede ser el del automóvil. En este caso, las interfases gráficas de programación y la interacción humano-robot son analizados, sobre todo teniendo en cuenta el nivel técnico de los usuarios. La parte de automatización de la construcción está dedicada a presentar las tecnologías de producción modular robotizada de las factorías de prefabricación, incluyendo novedosas técnicas de robótica colaborativa, impresión 3D y Gemelo Digital. El apartado de gestión de datos de la construcción es de especial importancia incorporado las tecnologías de *Big Data* y *Data Analytics*, así como las tecnologías BIM y todo lo relacionado con la computación en la nube (*Cloud Computing*) y telecomunicaciones tipo 5G/6G. Finalmente, el apartado de IA aplicada a la construcción introduce herramientas de diferentes tipos de aprendizaje con redes neuronales (*Machine Learning* y *Deep Learning*) y los mecanismos de toma de decisión.

El capítulo 5 está dedicado al futuro de la robótica en la construcción con especial hincapié en tres aspectos fundamentales: la I+D, la formación y las oportunidades para el sector. Se destacan las principales líneas de investigación atendiendo a los programas tanto nacionales como europeos (*Horizon Europe*) y de cooperación internacional. Este conocimiento es esencial para entender hacia dónde se dirige la tecnología y como va a cambiar la construcción. Por otro lado, se presentan los planes formativos universitarios, fundamentalmente a nivel de máster, que forman a los expertos en la materia. Sin esta formación difícilmente se podrá avanzar en la consolidación de la robótica en la construcción. Finalmente se destacan las enormes oportunidades que se abren para las empresas españolas en esta carrera tecnológica y comercial.

El Libro Blanco finaliza con un Anexo que presenta los casos de uso más destacados, la mayoría de ellos como resultados de proyectos tanto de investigación como de transferencia tecnológica. Los desarrollos pertenecen a diferentes niveles de madurez (TRL) pero reflejan importantes realidades de la aplicación de la robótica en la construcción.

## 2. IMPACTO SOCIOECONÓMICO

### 2.1. Estadísticas del sector

El sector de la construcción en España es uno de los más importantes con un aporte a la economía superior al 5 % del PIB según el INE<sup>5</sup>. El último informe del Observatorio de la Construcción<sup>6</sup> destaca que el sector genera 1.461.889 millones de euros (2023) con un crecimiento interanual del 10,6 % y un empleo directo de 871.689 personas (2023). Las previsiones para los próximos años son bastante buenas, destacando el ITeC que “no está del todo claro si el sector tendrá suficiente capacidad productiva para atender al extra de demanda, pero si esa amenaza no se materializa, vemos factible que el sector mantenga estos ritmos de crecimiento también en 2026 (4 %) y 2027 (3,5 %)”.

Por sectores se destaca la edificación residencial, que tuvo un crecimiento del 2,8 % en 2024 con un cambio de ritmo en 2025. Para el periodo 2025-2027 se prevé un crecimiento anual en una banda del 5 al 6 %. El comportamiento del mercado no residencial presenta diferencias sustanciales con respecto al residencial, habiendo tenido un ligero receso del -1 % en 2024, con modestas mejoras para el periodo 2025-2027, de entre el 1 y el 2,5 %. Finalmente, en obra civil parece que la demanda aún no se ha agotado, con un crecimiento del 3,1 % en 2024, manteniendo una velocidad parecida en el 2025 del orden de 2,7 % y una proyección para 2026-2027 del 2,4 %.

Todo ello confirma la fortaleza del sector de la construcción que cuenta con 90.652 empresas (2023)<sup>8</sup>. La mayoría de estas son empresas de pequeño tamaño, con una actividad local y especializada en algún tipo de obra, dando lugar a una oferta altamente fragmentada. No obstante, en las primeras posiciones del mercado destacan los grandes grupos que cotizan en bolsa, con una alta penetración en mercados internacionales y en el negocio de obra civil. Globalmente, las siete empresas españolas con presencia en el ranking mundial del top 100 crecen por encima de la media, un 16 % por ingresos frente al 3,4 % del sector a nivel global (8 % en moneda local), lo que consolida a España en la sexta posición a nivel global por detrás de China, Japón, EE. UU., Francia y Corea del Sur<sup>9</sup>.

No obstante, el informe del Observatorio de la Construcción (2023) destaca que “una de las principales conclusiones fue que la construcción era uno de los sectores menos digitalizados de la economía, aunque se encontraba en vías de transformación y estaba avanzando en la incorporación de tecnologías digitales<sup>10</sup>”. Aunque el sector de la construcción es el que menos especialistas TIC emplea (7 %), la contratación de estos expertos ha aumentado respecto a años anteriores en 1,7 puntos, especialmente en la pequeña y mediana empresa. La robótica inteligente, apoyada por los últimos avances de la IA, y la automatización son dos de las tecnologías claves para la transformación del sector que las empresas deberían apoyar para mejorar su competitividad.

<sup>5</sup> “Spain”, INE, consultado en marzo de 2025.

<sup>6</sup> Informe sobre el sector de la construcción, Observatorio de la Construcción, 2024.

<sup>7</sup> Sumario del informe Euroconstruct, ITeC - Instituto de Tecnología de la Construcción, diciembre de 2024.

<sup>8</sup> Observatorio Sectorial DBK, 2024.

<sup>9</sup> Global Powers of Construction, Deloitte, July 2024.

<sup>10</sup> El sector de la Construcción y las TIC, Observatorio de la Construcción, 2023

## 2.2. Aumento de productividad y calidad

Las dos grandes ventajas de la robotización del sector de la construcción son el aumento de la productividad y de la calidad de sus productos (componentes, materiales, elementos elaborados y semielaborados, edificios, carreteras, etc.) y de sus procesos (planificación y seguimiento de las distintas fases de la obra). En múltiples tareas, como albañilería, atadura de barras de acero, soldadura, demolición, ensamblado de estructuras, inspección de obra, etc. la robótica no solamente reduce el tiempo de las operaciones y aumenta su calidad, acercándola a las de la industria manufacturera, sino que también permite reducir la intervención humana, muchas veces subjetiva, y dedicar a los operarios a tareas de mayor valor añadido.

Estudios recientes confirman que el uso de robots colaborativos (*cobots*) en entornos de la construcción en las tareas como pre-fabricación, manipulación de materiales o ensamblado incrementa la productividad en un 35 %<sup>11</sup>. Además, reduce sustancialmente la tasa de error humano, trabajando los robots junto a los operarios en lugar de reemplazarlos. Una encuesta a 50 empresas constructoras mostró que los robots inteligentes redujeron los errores de toma de decisiones en un 40 % en comparación con los sistemas automatizados tradicionales.

Otros beneficios potenciales de los sistemas RAC (*Robotics and Automation in Construction*) son<sup>12</sup>:

- ♦ **Personalización y flexibilidad:** las tecnologías robóticas avanzadas permiten procesos de fabricación ágiles y flexibles. Los robots se pueden programar y reconfigurar rápidamente para adaptarse a los requisitos de producción cambiantes y manejar diversos diseños, tamaños y materiales de productos, adaptándose a las necesidades y demandas de los clientes.
- ♦ **Toma de decisiones basada en datos:** los sistemas de automatización generan grandes cantidades de datos que se pueden analizar en tiempo-real. Los gerentes pueden aprovechar estos datos para monitorizar y optimizar los procesos, identificar ineficiencias y tomar decisiones basadas en datos.

A pesar de sus numerosos beneficios, la robotización y la automatización plantean ciertos desafíos que deben ser abordados para garantizar su adopción exitosa<sup>13</sup>:

- ♦ **Coste inicial:** La inversión en tecnología robótica y en equipamiento asociado puede ser elevada, lo que representa una barrera para las PYMEs.
- ♦ **Capacitación:** La implementación de estas tecnologías requiere que los trabajadores adquieran nuevas habilidades o contratar especialistas en robótica.
- ♦ **Integración tecnológica:** Es necesario garantizar que las nuevas herramientas se integren de manera eficiente con los sistemas y procesos existentes.

<sup>11</sup> Muhammad Ali Musarat et al., Substitution of workforce with robotics in the construction industry: A wise or witless approach, *Journal of Open Innovation: Technology, Market, Complexity*, vol. 10, nº4, 2024.

<sup>12</sup> The Revolution of Construction Robotics: Automating the Construction Industry, Mercurious Developments, <https://www.mercuriousdevelopments.com/2023/06/20/construction-robot-revolution2023>.

<sup>13</sup> La tendencia de automatización en el sector de la construcción, *Constructivo*, febrero 2025.

## 2.3 Mejora de la seguridad, salud y medioambiente

Según el último informe del Instituto Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo (INSST) “el sector de actividad con mayor índice de incidencia fue Construcción<sup>14</sup>”. Aunque estando claro que la construcción no es comparable a otras industrias donde los trabajos se realizan en entornos cerrados y más controlados, las administraciones públicas, las empresas y los agentes sociales están tomando todas las medidas necesarias para reducir este preocupante nivel de siniestrabilidad: revisión de la legislación vigente, nuevas normativas, control más exhaustivo, etc.

Por otro lado, está demostrado que la robótica y la automatización reducen sustancialmente los accidentes, mejorando la calidad del trabajo y la salud de sus empleados. La robótica en la industria de la construcción puede utilizarse para realizar tareas peligrosas, reduciendo los riesgos de accidentes laborales. Las empresas de robótica y tecnología automotriz presumen de cómo sus robots hacen que los entornos de las obras sean más seguros. Según estudios recientes “el daño a la salud de los trabajadores en la mayoría de las operaciones de construcción robótica fue inferior al 40 % del de las operaciones manuales tradicionales<sup>15</sup>”.

La Organización Internacional de Normalización (ISO) ha desarrollado y publicado las normas técnicas de seguridad ISO/TS 15066 que proporcionan las pautas para operaciones seguras de robots en entornos controlados. Aunque el entorno de la construcción es también controlado, pero con muy baja repetitividad (cada obra es un prototipo diferente), se pueden destacar las pautas más aplicables al sector<sup>16</sup>:

- ♦ **Parada monitorizada:** los robots se detienen cuando se detectan humanos, con diferentes clasificaciones de seguridad.
- ♦ **Limitación de potencia y fuerza:** los robots limitan la fuerza que ejercen para minimizar las lesiones de los operarios humanos.
- ♦ **Control de la velocidad:** los robots ajustan (reducen) la velocidad en función de la proximidad humana.

Dado que la mayoría de los robots en la construcción son semiautónomos se plantea una necesidad en la seguridad adicional en la interacción humano-robot. En este sentido las recomendaciones son claras: contar con interfases amigables de interacción, implementar canales de comunicación bidireccionales entre los robots y los humanos, tener en cuenta aspectos psicológicos y reducir el estrés durante la interacción y, por supuesto, mejorar la formación de los operarios que usan robots<sup>17</sup>.

---

<sup>14</sup> Informe Anual de Accidentes de Trabajo en España: Datos 2023, Instituto Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo (INSST) del Ministerio de Trabajo y Economía Social, 2024.

<sup>15</sup> Chong Chen et al., Analysis of the impact of construction robots on workers' health, Building and Environment, vol. 225, 2022.

<sup>16</sup> Transforming Construction: Automation and Robotics for a Safer Future, US Center for Disease Control and Prevention, 2024.

<sup>17</sup> Marvin H. Cheng et al., Safe Operations of Construction Robots on Human-Robot Collaborative Construction Sites, ISARC, Lille, France, 2024.

Otro importante beneficio de la robótica y la automatización en la construcción es la mejora de las condiciones medioambientales en las obras, que en la construcción tradicional cuenta con numerosas dificultades. La tendencia actual es seguir la metodología japonesa *Lean* (optimización de las actividades) creando lo que se denomina *Lean Construction*<sup>18</sup> cuyo objetivo, entre otros, es minimizar los “desechos” (無駄 *muda*): en el transporte, en los almacenes, en los tiempos de espera, en los materiales, en las emisiones, etc. Todo esto lleva a la necesidad de un exhaustivo diseño, planificación, control y seguimiento de las obras con herramientas automáticas de gestión de obras *Lean* (*Lean Project Delivery System*). La combinación de *Lean* y robótica permite reducir hasta un 32 % los residuos que llegan a los vertederos<sup>19</sup>.

---

Al mismo tiempo, se está mejorando la tecnología robótica para que los propios robots sean más eficientes energéticamente. Hay que tener en cuenta que la mayoría de los robots actuales son eléctricos, con lo que consiguen una importante disminución de la huella de carbono en comparación con la maquinaria tradicional. La tendencia actual es<sup>20</sup>:

- » **Utilización de nuevos materiales avanzados:** la fibra de carbono o aleaciones ligeras ofrecen mayor resistencia sin el peso adicional; la reducción de la masa se traduce directamente en menos potencia necesaria para el movimiento, lo que puede mejorar significativamente la eficiencia energética.
- » **Gestión eficaz de la energía:** incluye nuevos modos de espera/suspensión de los robots que reduzcan el consumo, utilización de batería con una alta densidad de almacenamiento, incorporación de tecnologías de recolección de energía que puedan proporcionar una fuente de energía complementaria para el robot.
- » **Implementación de software inteligente:** algoritmos de control optimizado para un bajo consumo de energía, no abusar de los sistemas de aprendizaje que consumen mucha energía, optimizar los algoritmos de movimientos con criterios energéticos, mejor gestión térmica del hardware, etc.

---

<sup>18</sup> Lauri J. Koskela et al., *The foundations of lean construction*, in *Design and Construction: Building in Value*, Oxford, UK; Butterworth-Heinemann, Elsevier, 2002.

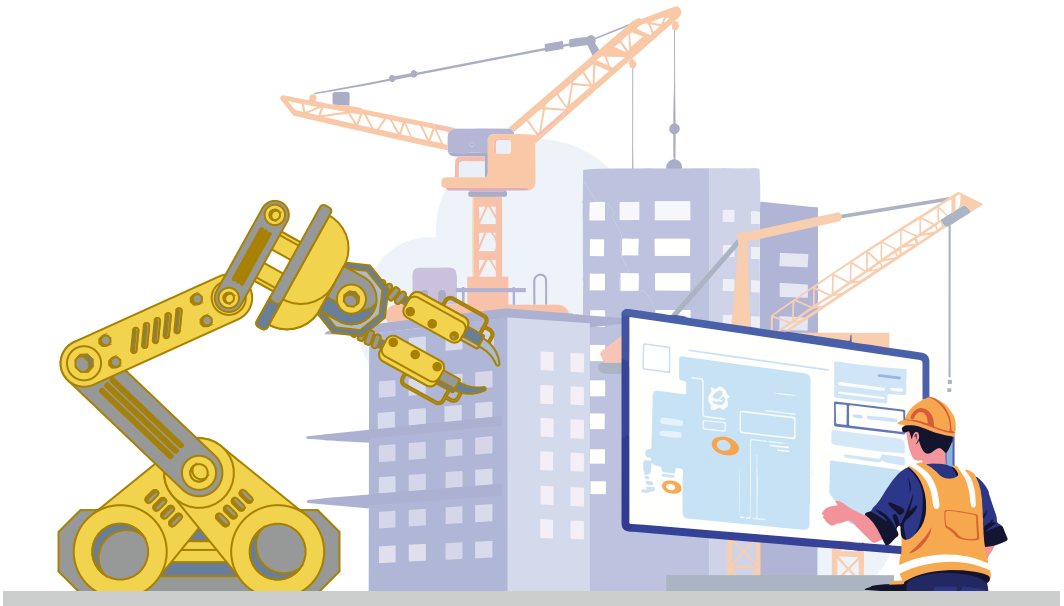
<sup>19</sup> Robotics and automation for sustainable construction, <https://www.pbctoday.co.uk/news/digital-construction-news/construction-technology-news/robotics-and-automation-for-sustainable-construction/147014/>, consultado en marzo 2025.

<sup>20</sup> ¿Cómo se puede hacer que el diseño de su robot sea más eficiente desde el punto de vista energético?, <https://www.linkedin.com/advice/1/how-can-your-robot-design-made-more-energy-efficient-6bybf?lang=es&originalSubdomain=es>, consultado en marzo 2025.

## 2.4. Normativa aplicada

Las normativas aplicadas a la robótica en general y, específicamente, a la robótica en la construcción abarcan numerosas normas y reglamentos que deben ser aplicados tanto en el desarrollo de los robots como en su aplicación. Seguir estas regulaciones no solo garantizará la seguridad en el entorno de trabajo, sino que también optimizará la eficiencia de las operaciones y mejora la competitividad de las empresas. A continuación, se va a citar las normativas más importantes tanto del sector de la construcción como del de robótica.

Uno de los reglamentos clave para la robótica en la construcción es el Reglamento (UE) 2023/1230, relativo a las máquinas<sup>21</sup> y por el que se derogan la Directiva 2006/42/CE del Parlamento Europeo y del Consejo y la Directiva 73/361/CEE del Consejo. Este nuevo reglamento aborda por primera vez los riesgos derivados de las tecnologías digitales emergentes para garantizar un funcionamiento seguro de las máquinas, reforzando especialmente los requisitos técnicos aplicables a robots colaborativos y robots móviles terrestres autónomos.



<sup>21</sup> Reglamento (UE) 2023/1230 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 14 de junio de 2023.

Una de las normas más relevantes del sector de robótica es la ISO/TS 15066<sup>22</sup>, que especifica los requisitos de seguridad para los sistemas de robots industriales, especialmente los colaborativos, asegurando un entorno de trabajo seguro para los operadores humanos. Esta norma complementa las normas ISO 10218-1 e ISO 10218-2, que cubren el diseño y el uso seguro de robots industriales colaborativos. Para los robots móviles autónomos, la norma ISO 17757<sup>23</sup> es crucial. Esta norma proporciona los requisitos de seguridad para las máquinas autónomas y semiautónomas utilizadas en operaciones de movimiento de tierras, minería subterránea y de superficie. Cubre tanto el hardware como el software de las máquinas autónomas y garantiza que operen de manera segura en esos entornos desafiantes.

En cuanto a la interacción entre robots móviles y sistemas de gestión, la norma ISO 23725<sup>24</sup> se enfoca en las interfaces necesarias para coordinar los Sistemas de Gestión de Flotas (*Fleet Management Systems - FMS*) y los Sistemas de Transporte Autónomo (*Autonomous Transportation Systems - ATS*). Esto es particularmente relevante en la minería a cielo abierto, donde los dámpers autónomos y los sistemas de control necesitan comunicarse de manera eficiente para gestionar la información de producción.

Para los UAV (*Unmanned Aerial Vehicles*), coloquialmente denominados “drones”, que también se están utilizando en la construcción, el Reglamento Delegado (UE) 2019/945<sup>25</sup> establece las reglas necesarias para el diseño, fabricación y operación de los sistemas aéreos no tripulados. Esto permite que los drones se integren de manera segura en el espacio aéreo europeo, garantizando su uso adecuado en diversas aplicaciones del sector. Por otro lado, la norma ISO 21384-3<sup>26</sup> define los requisitos para que las operaciones de UAV se realicen de forma segura. Incluye aspectos críticos como el comando y control, que son vitales para que los drones operen con seguridad en las obras.

Respecto a las comunicaciones la norma ISO/CD 21423<sup>27</sup> se enfoca en los protocolos de comunicación que permiten la interoperabilidad entre diferentes sistemas de robots móviles autónomos industriales. Esto es importante cuando se utilizan robots de diferentes proveedores en una misma obra, asegurando que puedan trabajar en conjunto sin problemas de compatibilidad.

Por último, es importante destacar que la implementación de estas normativas no debe verse como una barrera, sino como una oportunidad para mejorar la seguridad, la eficiencia y la competitividad del sector de la construcción. El cumplimiento de los reglamentos y normas técnicas garantiza que las empresas puedan aprovechar al máximo el potencial de la robótica, minimizando riesgos y optimizando sus procesos. A medida que estas tecnologías continúan avanzando, es esencial que el marco normativo evolucione en paralelo para asegurar una integración responsable y efectiva en las obras.

---

<sup>22</sup> ISO/TS 15066:2016, Robots and robotic devices. Collaborative robots.

<sup>23</sup> ISO 17757:2019, Earth-moving machinery and mining. Autonomous and semi-autonomous machine system safety.

<sup>24</sup> ISO 23725:2024, Autonomous system and fleet management system interoperability.

<sup>25</sup> Reglamento Delegado (UE) 2019/945 de la Comisión, de 12 de marzo de 2019.

<sup>26</sup> ISO 21384-3:2023, Unmanned aircraft systems. Part 3: Operational procedures.

<sup>27</sup> ISO/CD 21423:2022, Robotics. Autonomous mobile robots for industrial environments. Communications and interoperability.

## 2.5. Regulación laboral y roboética

La robotización plantea múltiples retos de índole social, laboral y ético, muchos de los cuales todavía no están reglados. El Parlamento Europeo<sup>28</sup> ha reconocido que la robotización de sectores como la construcción necesita de nuevas regulaciones relacionadas con la normalización del uso de la robótica y la IA, del control del flujo de datos y de los derechos de privacidad de las personas. La robótica, en particular la colaborativa, que comparte espacio de trabajo con los operarios, aparte de los problemas de seguridad respaldados por las correspondientes normas técnicas, puede llevar a crear una afectación de derechos fundamentales. Los robots recogen datos de sus propios movimientos, pero también de las órdenes de los operarios, sus imágenes y emociones, lo que puede limitar su espacio de intimidad. Es cierto igualmente que estos datos pueden ayudar a mejorar el funcionamiento de los robots y prevenir futuros fallos. Por ello, se debe regular con sumo cuidado la recopilación y el uso de datos en la interacción humano-robot.

Un tema de suma importancia, sobre todo en sistemas autónomos, es la responsabilidad ante posibles daños a los operarios, a las infraestructuras y a los propios robots. A efectos de la posible generación de responsabilidad civil, estos daños pueden ser de naturaleza corporal, material o inclusive psicológico/psicofísico. Según la regulación del Parlamento Europeo<sup>29</sup>, se distinguen dos posibles responsables: el "operador inicial", quien define de forma continuada las características de la tecnología, proporciona datos y presta el servicio de apoyo esencial para su funcionamiento y "operador final", quien ejerce un grado de control sobre un riesgo asociado a la operación y el funcionamiento del sistema. Con el fin de delimitar claramente la cuota de responsabilidad de los posibles sujetos intervinientes o excluir la responsabilidad de alguno de ellos, sería conveniente dotar a los sistemas robóticos de tecnología que permita archivar información en caso de accidentes o defectos (*logging by design*).

Otro aspecto novedoso es la roboética<sup>30</sup>, una nueva área de estudio de la robótica que analiza las relaciones entre los robots y los humanos desde el punto de vista sociológico. Su importancia es aún mayor cuando existe una fuerte interacción física y psicológica humano-robot. En el caso de robots autónomos, que toman decisiones por sí mismos, estas deben ser responsables con las leyes y la ética del entorno en donde operan. Por ello, el desarrollo de nuevos robots y aplicaciones debería tener en cuenta todos estos aspectos para mejorar la aceptabilidad social y laboral de los robots. Entre las cuestiones que se plantean están las relacionadas con la implicación cultural de la robotización, el papel social de los robots autónomos en la sociedad, nuestra dependencia de ellos, si los robots podrían tener "conciencia", "emociones", "personalidad" o si nos pueden "engañar". Las respuestas a estas cuestiones están abiertas y requieren de un profundo análisis interdisciplinar de filósofos, sociólogos, ingenieros y juristas.

---

<sup>28</sup> Resolución del Parlamento Europeo, de 12 de febrero de 2019, sobre una política industrial global europea en materia de inteligencia artificial y robótica, 2018/2088(INI), 2018.

<sup>29</sup> Resolución del Parlamento Europeo, de 20 de octubre de 2020, sobre el régimen de responsabilidad civil en materia de inteligencia artificial, 2020/2014(INL), 2020.

<sup>30</sup> G. Veruggio, The birth of roboethics, IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 2005.

## 3. ÁREAS DE APLICACIONES DE LA ROBÓTICA

### 3.1. Industrialización y prefabricación modular

La industrialización y prefabricación en el sector de la construcción se refiere al uso de técnicas avanzadas de fabricación de elementos modulares constructivos en entornos controlados (generalmente en factorías especializadas fuera de obra), que luego son transportados y ensamblados en el lugar de construcción. La robótica juega un papel crucial en esta transformación, mejorando la eficiencia, precisión y seguridad en todo el proceso.

La prefabricación se centra en componentes modulares, como cerramientos exteriores, paredes, ventanas, columnas, escaleras, u otros elementos estructurales, y se lleva a cabo empleando técnicas de la automatización inteligente de las industrias más avanzadas, como la del automóvil. En algunos casos se prefabrican elementos constructivos completos como pueden ser baños o cocinas, lo que añade la complejidad de ensamblado manufacturero de precisión de diferentes elementos (lavabos, inodoros, grifería) a semejanza del ensamblado del automóvil en las cadenas de producción. Estas factorías funcionan bajo el concepto de producción flexible (*flexible automation*) que aúna la producción en masa con la disponibilidad de una gran variedad de productos. De esta manera se cumple la demanda, pero respetando la variedad de diseños arquitectónicos.

Es de gran importancia que los elementos a fabricar sean diseñados de manera modular y estén pensado para un fácil ensamblado en obra mediante conectores o anclajes. Pero dado el bajo nivel de estandarización de la construcción, fabricar elementos modulares para ser ensamblados en obra es complejo. Se están haciendo importantes esfuerzos en el desarrollo e introducción de esos estándares tanto a nivel nacional como internacional. Al imponerse el uso de modelos digitales en los proyectos y exigir que los entregables se presenten en formato IFC (*Industry Foundation Classes*) se facilita la modularización de la prefabricación. Un claro ejemplo es la prefabricación bajo herramienta colaborativas y abiertas como el OpenBIM<sup>31</sup> o similares.

Según el Informe McGraw sobre Prefabricación y Modularización<sup>32</sup> el 85 % de los profesionales de la industria de la construcción han utilizado algún tipo de prefabricación en algún proyecto. Por otro lado, el informe de Matthew Kimpton<sup>33</sup> resalta que los beneficios de la prefabricación en edificación permiten reducir el ciclo de la construcción un 63 %, con una reducción de coste del 35 %. Las ventajas de este tipo de industrialización en la construcción se pueden resumir

---

<sup>31</sup> The International Home of OpenBIM (<https://www.buildingsmart.org/about/openbim>), consultado en enero 2025.

<sup>32</sup> Prefabrication and Modularization: Increasing Productivity in the Construction Industry, McGraw Hill Construction, 2011.

<sup>33</sup> Matthew Kimpton, How Prefabrication is Changing Construction for the Better, 2013, (<https://www.mercuriousdevelopments.com/2023/09/25/prefabrication-construction>), consultado en enero 2025.

en: i) alta calidad de producción al tratarse de entornos fabriles, ii) incremento de la eficiencia al poder contar con varias líneas simultaneas de prefabricación, iii) reducción de costes dada producción masiva, iv) reducción de los desperdicios y vertidos con la consecuente reducción de la huella de carbono, y v) mejora de la sostenibilidad del proceso al poder usar materiales más ecológicos. No obstante, también hay que tener en cuenta las posibles desventajas: a) coste y complejidad del transporte a obra con posible daño de los elementos, b) limitación de catálogo de módulos prefabricados, y c) necesidad de una buena coordinación entre la factoría y la construcción en obra.

Los robots más utilizados en la prefabricación van desde robots manipuladores industriales, utilizados en otras industrias y adaptados al ámbito de la construcción, que permiten tareas como manipulación de elementos, robots de soldadura de bastidores modulares y proyección de paneles con mezclas de fibras, y robots de pórtico, grúas robotizadas que permiten el traslado de módulos voluminosos en fabrica, hasta sistemas más sofisticados como los robots colaborativos que permiten la ejecución de tareas colaborativas entre los operarios humanos (cableado, ensamblado de piezas complejas) y robots para impresoras 3D de gran tamaño que permiten la fabricación de piezas complejas, que de otra manera no se podrían producir, y de una sola vez.

Como ejemplos destacados hay que citar en primer lugar, a la empresa japonesa Shikisue<sup>34</sup> que ha sido pionera en la fabricación automatizada de módulos completos prefabricados para edificios residenciales y que adoptó la tecnología de la industria del automóvil. Incluye líneas de montaje y acabado bajo la planificación de diseños BIM, así como un alto nivel de colaboración humano-robot en el ensamblado de elementos comunes. Su factoría más moderna, situada en Tailandia, cuenta con un alto nivel de robotización con capacidad para la producción de 1.000 edificios al año. Por otro lado, la empresa canadiense de prefabricación modular *Intelligent City* ha logrado un ahorro del 15 % en el coste total de construcción utilizando robots industriales, lo que ha permitido reducir los tiempos en obra un 38 % y reducido los desechos en un 30 %. La aplicación de soldadura robotizada de la empresa sueca Skanska ha mejorado la calidad, la productividad y la seguridad de los operarios al automatizar la fabricación de armaduras de refuerzo de acero en la obra.

Otro ejemplo innovador es el pabellón de investigación ICD/ITKE 2013-14, desarrollado por la Universidad de Stuttgart<sup>35</sup>, que se basa en el concepto de construcción ligera biológica. Demuestra cómo el desarrollo de procesos integrados de prefabricación modular para estructuras de alta complejidad arquitectónica pueden ser realizados de manera industrializada. La empresa MX3D con sede en los Países Bajos, utiliza la impresión 3D robótica para la fabricación de estructuras metálicas prefabricadas con complejas nervaduras tridimensionales. A nivel nacional podemos citar a Porcelanosa que ha automatizado su proceso de fabricación de baños prefabricados Monobaths, asegurando altos estándares de calidad y precisión.

---

<sup>34</sup>Shikisue: Housing Company, <https://www.sekisuichemical.com/about/outline/segment/housing>, consultado en marzo de 2025.

<sup>35</sup>ICD-ITKE Pabellón de Investigación 2013-14 / ICD-ITKE Universidad de Stuttgart, <https://www.archdaily.cl/cl/624517/icd-itke-pabellon-de-investigacion-2013-14-icd-itke-universidad-de-stuttgart>, consultado en marzo de 2025.



*Factoría robotizada de prefabricación de módulos completos para edificios residencial (Sekisui Heim)*



*Vista del pabellón modular de investigación (ICD/ITKE)*

La robótica en la industrialización y prefabricación está revolucionando el sector de la construcción, mejorando la eficiencia, calidad y sostenibilidad de los proyectos. Las empresas que adoptan esta tecnología reducen sustancialmente el tiempo en la obra lo que les permite ser más competitivos y sostenibles. La robótica también ofrece la posibilidad de desarrollar nuevas habilidades en la industria de la construcción local al mejorar los métodos, la calidad y la productividad. Por todo ello, se puede afirmar que la industrialización y prefabricación modular representa una gran oportunidad para las empresas constructoras españolas, sobre todo para las PYMEs, de transformar su modelo de negocio a través de las nuevas tecnologías.

## 3.2. Edificación

El problema de la vivienda es uno de los más acuciantes en España habiendo subido, aunque por debajo de la media de la UE, un 46,7 % en los últimos 8 años (periodo 2015-2023)<sup>36</sup> con una importante disminución de la oferta. Entre los principales factores están el aumento de los costes de la construcción, la dificultad de acceso a las hipotecas, falta de suelo urbanizable, la falta de empleo calificado y el bajo nivel tecnológico de la edificación. En este sentido, la robótica puede ayudar a construir edificios “más rápido, más asequible y con menos residuos”<sup>37</sup>.

Las principales aplicaciones de la robótica en la edificación se pueden clasificar en cuatro grandes grupos que cubren el ciclo completo de vida de los edificios: diseño, construcción, mantenimiento y rehabilitación o demolición. Tratar estas cuatro fases desde una perspectiva común de la robotización permite un enfoque integral que reduce tiempos, el impacto medioambiental, aumenta la productividad y mejora la calidad del empleo.

<sup>36</sup> El aumento del coste de la vivienda en la Unión Europea, Parlamento Europeo, 2024, <https://www.europarl.europa.eu/topics/es/article/20241014STO24542/el-aumento-del-coste-de-la-vivienda-en-la-union-europea>, consultado en julio de 2025.

<sup>37</sup> Will Robots Solve The Housing Crisis?, Mike Knight Technology, 2025.

La robótica de la edificación está estrechamente ligada a nuevos enfoques de la arquitectura que permiten diseños más creativos con novedosas estructuras y formas, utilizando construcción modular y sistemas automáticos de ensamblado, diseño de mobiliario embebido, etc. La tendencia es la edificación dirigida por el diseño (*design-driven*) teniendo en cuenta la robotización y la automatización de su construcción, siempre bajo conceptos y formatos tipo BIM. El trabajo colaborativo entre ingenieros y arquitectos permite, por un lado, conocer las herramientas robóticas y los modelos de la prefabricación automatizada y, por otro lado, las necesidades arquitectónicas del edificio. La *Association for Robots in Architecture*<sup>38</sup>, a través de su conferencia bienal ROBJARCH, agrupa a profesionales e investigadores de ambos campos con la perspectiva de que los robots cambien la arquitectura ayudando a diseñar y construir edificios de una nueva manera.

La construcción de edificios incluye numerosas fases como el movimiento de tierra y preparación del terreno, transporte de materiales, cimentación, construcción modular, impresión 3D, levantamiento de la estructura, cerramiento exterior, acabado interior, etc. La mayoría de estas fases se describen en otros apartados de este documento mientras éste se centrará en las tres últimas donde la aplicación de la robótica es prioritaria y de gran valor añadido. Según el tipo de edificio el levantamiento de la estructura de los edificios se divide en tres grandes grupos: estructura metálica, hormigón armado y con ladrillos/bloques. En todos los casos se requiere la manipulación de voluminosos y pesados objetos, así como de sistemas inteligentes de ensamblado.

En el caso de la estructura metálica los robots y las grúas robotizadas se utilizan para tareas de transporte de elementos, ensamblado de vigas, soldadura, preparación de elementos constructivos, etc. La mayoría de las aplicaciones se hacen *in situ* dando lugar al concepto de fábrica que se transporta a pie de obra (*field factory*<sup>39</sup>). Los manipuladores móviles equipados con brazos robóticos pueden ayudar al montaje de estructuras armadas complejas. Este es el caso de uno de los desarrollos de la empresa MESH, *spin-off* de la ETH de Zúrich<sup>40</sup>, que ha desarrollado un robot que permite, a partir de los planos BIM, crear complejas formas curvas que manualmente sería muy costoso fabricar. El manipulador coge, dobla, posiciona y suelda las barras metálicas produciendo estructuras armadas masivamente.

En el caso de estructuras de hormigón son varias las aplicaciones robóticas como encofrado/desencofrado, marcaje y trazado, detección de grietas, transporte y posicionamiento de piezas de hormigón, etc. En el caso de la distribución uniforme del hormigón para disminuir peso y prevenir daños estructurales de edificios por grietas la empresa surcoreana Itone ha desarrollado el robot Conit Runner<sup>41</sup>, que permite una navegación inteligente sin colisiones (utilizando tecnología láser) sobre cemento húmedo para dejar finas estrías a lo largo de la superficie minimizando el uso de barras de refuerzo igualando de esta manera la productividad de 8 operarios.

---

<sup>38</sup> Association for Robots in Architecture, <https://robotsinarchitecture.org>, consultado en marzo de 2025.

<sup>39</sup> Automate your home building, <https://auar.io>, consultado en marzo de 2025.

<sup>40</sup> Robots assemble reinforcing steel, ETH Zurich, 2025, <https://ethz.ch/en/news-and-events/eth-news/news/2025/06/eth-spin-off-mesh-automates-reinforcement-work.html>, consultado en julio 2025.

<sup>41</sup> Concrete indentations Forming Robot Conit Runner <https://itone.kr/conitranner/index.html>, consultado en julio de 2025.

Para la estructura de edificios con bloques o ladrillos se han desarrollado varios sistemas robotizados que permiten colocar ladrillos de manera rápida y precisa. El robot de la empresa australiana Fastbrick Robotics<sup>42</sup> (FBR) permite la colocación de bloque de 600 mm x 400 mm x 300 mm con un peso hasta 45 kg y un alcance de 32 m. Varios son los problemas que plantean este tipo de robots que se solucionan con técnicas de control inteligente: operar en condiciones climáticas adversas (con lluvia y viento de hasta 60 km/h), precisión en la colocación de los bloques/ladrillos (usando estaciones láser de seguimiento se alcanza 0,5 mm), velocidad de los movimientos (productividad de hasta 360 bloques por hora), la unión de los bloques (con mortero especial que suministra el propio robot), etc.

Punto y aparte, son las aplicaciones robóticas para cerramiento de fachadas en donde la manipulación desde interior de paneles o cristales pesados se convierte en un cuello de botella. La mayoría de los sistemas son teleoperados con diferentes niveles de autonomía. Las características principales de estos robots es la alta maniobrabilidad en espacios reducidos y la alta precisión de colocación de paneles. En la mayoría de estas aplicaciones se estima una reducción del tiempo de colocación del orden del 50 %.

La tendencia en edificación es crear entornos inteligentes en obra con robots, grúas automatizadas (autónomas o semiautónomas) y sistemas de transporte controlados. El proyecto gubernamental chino TENDFINE, iniciado en 2022, integra varias tecnologías innovadoras como operación autónoma y teleoperada de grúas de torre mediante IA y conexión 5G, grúas sin operarios embarcados y gobernadas remotamente por voz, modelado 3D de la obra con sensores láser y GPS, prevención de colisiones usando fusión multisensorial (láser/visión/fuerza), coordinación de flotas de grúas para trabajo cooperativo, etc.<sup>43</sup> De esta manera, se incrementan la productividad, la eficiencia y la seguridad de los operarios en obra.

Para poder implementar este tipo de entornos altamente conectados se empieza a emplear el concepto de IoC (*Internet of Construction*), adaptación del concepto de IoT (*Internet of Things*) a la edificación. El proyecto alemán IoC<sup>44</sup> aborda la problemática y las estrategias para la edificación digital en red y cubre los procesos de producción desde la prefabricación hasta la intralingüística y el montaje en la obra. Es importante destacar que el proyecto se ha integrado bajo el modelo RAMI (*Reference Architectural Model Industrie*) de la Industria Conectada 4.0. Las pruebas se hacen en una infraestructura permanente de investigación, que puede ser usada por terceros, del *Reference Construction Site* de la Universidad de Aquisgrán en el campus de Melaten.

Una de las fases más costosas y largas en la edificación es el acabado interior, que incluye tareas como albañilería, alicatado, colocación de paneles, pintura, cableado eléctrico, fontanería, etc. Son numerosas las empresas que ofrecen soluciones para estas tareas. Los robots, además, permiten un alto nivel de personalización como por ejemplo un enyesado interactivo o pinturas diferentes.

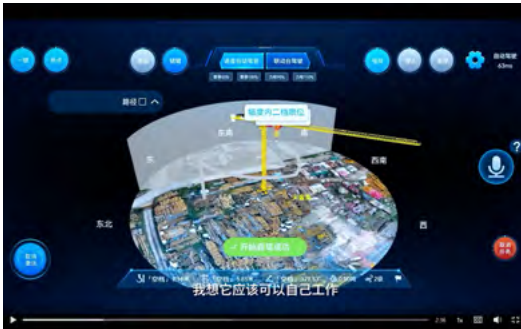
<sup>42</sup> Shuttle Block Delivery System, <https://www.fbr.com.au/view/hadrian>, consultado en julio de 2025.

<sup>43</sup> TendFine: Industry-Defining Breakthroughs in Intelligent Tower Crane Systems, [https://www.linkedin.com/posts/http-www-thsoft-cc\\_constructiontech-smartcranes-buildingautomation-activity-7331212812490301441-YpQR/](https://www.linkedin.com/posts/http-www-thsoft-cc_constructiontech-smartcranes-buildingautomation-activity-7331212812490301441-YpQR/), consultado en marzo de 2025.

<sup>44</sup> Sigrid Brell-Cokcan, et al., (Eds.), IoC - Internet of Construction, Springer Vieweg Wiesbaden, 2024.

La Universidad de Sherbrooke en Canadá utiliza el robot Husky de la empresa Clearpath para la colocación personalizada de paneles de yeso con gran precisión (0,19 mm) usando avanzados sistemas de visión<sup>45</sup>.

La última fase del ciclo de vida de los edificios es la rehabilitación y demolición bajo el concepto de la economía circular: reciclaje, reusabilidad de elementos, etc. Se estima una demanda de 300.000 empleos en la Unión Europea para 2030 en la renovación de fachadas de edificios. El recientemente finalizado proyecto alemán MAXX – *Mobile Assembly X-System*<sup>46</sup> permite el montaje y manipulación automatizados de paneles de fachadas para la rehabilitación de edificios. Una de sus características destacadas es su colaboración totalmente automatizada entre el robot de KUKA y la grúa Jekko mediante tecnología 5G, controlando sus movimientos para elevar la plataforma.



*Obra de edificación cooperativa con una flota de grúas torre semiautónomas (TENDFINE)*



*Robot Hadrian X de construcción de edificios con bloques (Fastbrick Robotics)*

### 3.3. Obra civil

El objetivo de la introducción de sistemas robotizados en obra civil se centra en mejorar la eficiencia, precisión y seguridad en la ejecución de proyectos de infraestructura. Se busca transformar las actividades tradicionales, como la topografía del terreno, el movimiento de tierras, la pavimentación, la construcción de carreteras, puentes y túneles, demoliciones, entre otros, mediante soluciones robotizadas y automatizadas que permitan reducir costes, optimizar tiempos, ser más sostenible y minimizar riesgos laborales. El informe del *Royal Institute of Technology in Stockholm (KTH)*<sup>47</sup> divide las aplicaciones de la robótica en obra civil en tres grandes áreas: carreteras, puentes y túneles. En España, estas tres infraestructuras alcanzan un 70 % de toda la obra civil según datos del INE de 2022.

<sup>45</sup> Philippe D'Amours et al., Drywall finishing with collaborative robot arm in off-site construction, International Symposium on Automation Robotics in Construction (ISARC 2025), Montreal (Canada), 2025.

<sup>46</sup> MAXX, <https://construction-robotics.de/en/maxx-mobile-assembly-x-system>, consultado en marzo 2025.

<sup>47</sup> Madeleine Hoeft et al., Construction Automation and Robotics in Infrastructure, Technical report KTH, 2022.

Por otro lado, desde el punto de vista tecnológico la robotización y automatización de la construcción en obra civil se divide básicamente en dos vertientes: desarrollo/utilización de robots especializados para sus múltiples tareas y la automatización de la maquinaria existente convirtiéndola en robotizada. En ambos casos, el entorno de trabajo es altamente no-estructurado y al aire libre lo que acuña el término de robots de campo (*field robotics*)<sup>48</sup>. Estas particularidades hacen mucho más difícil el control de los robots y sobre todo el modelado del entorno, que es dinámico y puede ser fácilmente cambiante. De aquí que los sistemas robóticos en obra civil son generalmente caros y necesitan de un entrenamiento especializado de los operarios.

En el área de construcción de carreteras, el uso de sistemas robóticos es altamente beneficioso tanto en eficiencia de los procesos y calidad de los acabados como en un alto nivel de seguridad. Las aplicaciones se pueden clasificar en tres grandes grupos: apoyo al diseño, la construcción en sí misma y el mantenimiento eficiente. En el primer grupo, diseño, el uso de sistemas BIM permite no solamente un diseño 3D digital de las carreteras sino también una planificación y conexión, en muchos casos en tiempo-real, con los robots y sistemas automatizados implicados en la construcción. Adicionalmente, la integración del BIM con sistemas GIS (*Geographic Information System*) permite tener en cuenta la información georreferenciada (topografía del terreno) lo que ayuda enormemente a mejorar la planificación de la obra en 4D y la preparación de la logística de todos los recursos (maquinas, materiales, personas).

Una eficaz implementación del GIS se complementa con el uso de UAV (*Unmanned Aerial Vehicle*, llamados coloquialmente drones), que permiten tomar imágenes y otro tipo de datos (vegetación, fauna, oclusiones, etc.) del terreno justo antes de la construcción. Un ejemplo de esta técnica pueden ser los desarrollos del Centro Avanzado de Tecnologías Aeroespaciales (CATEC) en Sevilla, que cuenta con varios sistemas de mapeo de superficies para la construcción. Los últimos trabajos plantean una coordinación de los UAV con vehículos terrestres para mejorar la calidad de estos mapas. Además, la integración del BIM y GIS con los mapas de los UAV permite analizar, usando técnicas de IA, una serie de atributos que en el futuro permitirán que las carreteras sean inteligentes: interacción con su entorno, seguridad en función del tiempo y la generación de energía renovable.

El segundo grupo, el de la construcción de carreteras, es sin duda el más complejo y, a su vez, el más beneficiado con la robotización y automatización. Las tareas de movimiento de tierras, pilotaje, compactación, asfaltado, etc. requieren de numerosa maquinaria y transporte masivo de materiales. Las excavadoras autónomas o semi-autónomas (guiadas), convertidas en sistemas robotizados, permiten excavar terrenos con una precisión superior a la obtenida por medios manuales. Están equipadas con numerosos sensores de visión, distancia y fuerza que permiten una excavación masiva y precisa 24/7. Los equipos de pilotaje robóticos pueden programarse para localizar y perforar agujeros con gran precisión y en tiempos muy cortos<sup>49</sup>. La empresa californiana BuiltRobotics es un buen ejemplo del pilotaje inteligente con sistemas de visión artificial y gestión de datos del proceso en tiempo-real con computación en la nube y/o en el borde (*Cloud and Edge computing*).

<sup>48</sup> Bruno Siciliano, Oussama Khatib (Eds.), *Handbook of Robotics*, Springer-Verlag, 2016.

<sup>49</sup> The impact of automation and robotics on civil engineering construction processes, McNeil Engineering, posted 2022.

El proceso de construcción del firme requiere de maquinaria de precisión que se automatiza para que realice un cálculo predictivo de la densidad del suelo para una estimación óptima de la compactación, lo que conlleva minimizar el número de pasadas. La coordinación y la intercomunicación constante de las compactadoras, asfáltadoras y demás máquinas involucradas permite una optimización del proceso global<sup>50</sup>. Algunos sistemas son totalmente autónomos mientras otros son todavía manuales. Esto implica tener unas arquitecturas de control con diferentes niveles de autonomía, que normalmente lleva a contar con un operario experto usando las técnicas de supervisión humana (*human-in-the-loop*).

Los puentes constituyen importantes estructuras que permiten la conectividad y el transporte con una estimación de aproximadamente 17.000 puentes solo en la red de carreteras estatales. Para una construcción más automatizada de puentes se requiere un diseño adaptado a ello, sobre todo en lo relacionado con el transporte y ensamblado de sus partes. Los métodos de construcción de puentes modernos comúnmente utilizados incluyen el de lanzamiento de tramo completo y prefabricado, el método de apuntalamiento avanzado, el método de voladizo equilibrado, el método de lanzamiento incremental y el método de segmentos prefabricados<sup>51</sup>. Todos ellos necesitan utilizar grúas altamente automatizadas conectadas con sistemas topográficos inteligentes. Por otro lado, la robótica puede ayudar a atar barras de acero, uno de los procesos más críticos en la construcción de un puente. La empresa norteamericana Brayman Construction ha desarrollado un robot de pórtico Tybot que puede expandirse hasta 40 metros de ancho para detectar automáticamente con un brazo robótico intersecciones para atar barras de acero, ahorrando tanto en tiempo y coste de la construcción como reduciendo considerablemente las lesiones de los operarios.



UAV para el control de calidad y mantenimiento de carreteras en coordinación con un vehículo terrestre (CATEC)



Excavadora autónoma para pilotaje en granjas inteligentes 24/7 (Builtrobotics)

<sup>50</sup> Gerad Goger and Tobias Bisenberger, Digitalization in infrastructure construction – Developments in construction operations, *Geomechanik und Tunnelbau*, 13(2), 165-177, 2020.

<sup>51</sup> Nang-Fei Pan, Fuzzy AHP approach for selecting the suitable bridgeconstruction method, *Automation in construction*, 17(8), 958-965, 2008.

Las particularidades de la construcción de túneles, sobre todo para el transporte por carretera y ferrocarril, son que necesitan de un pesado equipamiento de perforación y la obra es subterránea, con todos los inconvenientes que ello representa (espacio limitado, oscuridad, gran cantidad de material a desalojar, etc.). Los métodos más utilizados son los de perforación y voladura, siendo las perforadoras TBM (*Tunnel Boring Machines*) las más utilizadas. Las actuales TBM han conseguido un muy alto nivel de automatización que incluye no solamente la perforación si no también el apuntalamiento y recubriendo de los túneles. Los puntos limitativos de las actuales TBM son el precio, la necesidad de un guiado más preciso y con menos paradas, y la posible extensión a cavidades no circulares. La empresa alemana Herrenknecht, una de las líderes del mercado, plantea nuevos sistemas de guiado inteligente pensados especialmente para áreas urbanas que protejan los inmuebles colindantes. Respecto al método de voladura, la empresa sueca Atlas Copco cuenta con máquinas altamente automatizada que introducen sistemas de Adición de varillas (*Rod Adding System*) que aumentan la velocidad de la perforación, y la seguridad de la operación.

Por otro lado, para perforaciones de diámetros pequeños (hasta 300 mm) en entornos metropolitanos y para no abrir zanjas en ciudades se utilizan maquinas perforadoras robóticas autónomas que trazan automáticamente su trayectoria y esquivan los obstáculos subterráneos que puedan aparecen (rocas, ríos, tuberías, etc.) mediante el uso de georradars instalados por delante del robot. El robot BADGER<sup>52</sup> es un buen ejemplo para instalar cables eléctricos y de fibra óptica subterránea, así como pequeñas tuberías de agua y gas.

### 3.4. Inspección y mantenimiento

La inspección y el mantenimiento (I&M) de infraestructuras civiles representa una gran actividad económica con una estimación del mercado mundial del orden de 450.000 millones de euros<sup>53</sup>. Abarca múltiples tipos de infraestructuras como las de transporte (carreteras, túneles, ferroviarias, puertos), edificaciones (edificios, aeropuertos, estaciones), energía (petroquímicas, estaciones eléctricas y nucleares, gaseoductos, presas), suministro de agua, etc. El alto coste de estas infraestructuras favorece la aplicación de tareas de mantenimiento y, de esta manera, extender su vida útil. El envejecimiento y la gran densidad de las infraestructuras civiles que necesitan de una atención especial es un problema creciente. Por ejemplo, 58.700 grandes presas en todo el mundo se construyeron entre 1930 y 1970. Bien conocidos es el colapso en 2018 del puente Morandi en Génova que, según los datos oficiales, tuvo una inversión en mantenimiento que superó los costes de construcción, pero no fue suficiente para prevenir el accidente causado por la fractura de un componente del viaducto.

Empezando por la I&M de carreteras hay que señalar que, aunque en España fue en décadas más recientes, la mayor parte de la red de carreteras europea se construyó entre 1960 y 1970 y se diseñó para una vida útil de 50 años. En los próximos años serán necesarias grandes intervenciones en

<sup>52</sup> Panagiotis Vartholomeos, et al., Modeling, Gait Sequence Design, and Control Architecture of BADGER Underground Robot, IEEE Robotics and Automation Letters, vol. 6, Issue, 2, 2021.

<sup>53</sup> euRobotics, Inspection & Maintenance Topic Group, <https://eu-robotics.net/inspection-maintenance-topic-group>, consultado en febrero de 2025.

su mantenimiento. Los principales objetivos de una moderna I&M de carreteras son: aumentar la eficiencia, reducir el riesgo para los trabajadores, garantizar que la infraestructura civil esté operativa y alto nivel de cooperación trabajador-robots.

Con estas premisas las tendencias actuales, como en el reciente proyecto europeo OMICRON<sup>54</sup>, se pueden resumir en: i) sistema cooperativo robótico de inspección con vehículos autónomos terrestres y UAV, formando flotas de inspección, ii) mantenimiento predictivo de las carreteras creando un Gemelo Digital de carreteras (*Road Digital Twin*) que ayude a una mejor planificación de la intervención y iii) intervención inteligente con tráfico rodante desarrollando plataformas robóticas con manipuladores embarcados en camiones.

La I&M de túneles presenta varias particularidades diferenciadoras: ausencia/debilidad de señal GPS (*Global Positioning System*) y de comunicaciones 4G/5G, espacio de trabajo limitado y recubrimiento estructural, en su mayoría, de hormigón. Todo ello, hace necesario la adopción de nuevas técnicas que permitan una intervención eficaz bajo suelo. Los defectos que deben ser detectados se resumen en: estructuras de hormigón (descamación, agrietamiento, desconchado, desprendimientos, eflorescencias, manchas, delaminación y fugas), en estructuras de acero (corrosión, grietas, pandeos, falla de la capa protectora) y en estructuras de mampostería (piezas desplazadas, agrietadas, rotas, aplastadas, faltantes, mortero, alineación, fugas).

El proyecto europeo RoboSpect<sup>55</sup> propone soluciones innovadoras de I&M como: i) un manipulador móvil autónomo de gran tamaño, hasta 10 m, para acceder a toda la superficie de grandes túneles y que sea capaz de navegar autónomamente, ii) un sistema de detección de pequeños defectos, hasta 1-2 cm, basado en cámaras, entrenadas con imágenes reales y sintéticas usando técnicas de *Deep Learning* y iii) un sistema de ultrasonidos para el análisis de propagación de los defectos, generalmente grietas, y su clasificación según el nivel de peligrosidad. En algunas soluciones se emplean, como sistemas complementarios los UAV (drones) aunque el tráfico rodante, sobre todo de camiones, durante la I&M, crea muchas turbulencias en el interior del túnel, lo que hace muchas veces impracticable el vuelo.



*Inspección de carreteras con sistemas cooperativos formados por vehículos terrestres autónomos y UAV (OMICRON, CEMOSA, coordinador)*



*Manipulador móvil para inspección de túneles de transporte por carretera de hormigón sin corte del tráfico rodante (RoboSpect, UC3M/Robotnik)*

<sup>54</sup>OMICRON EU project, <https://omicronproject.eu>, consultado en marzo de 2025.

<sup>55</sup>RoboSpect EU project, <https://cordis.europa.eu/project/id/611145>, consultado en marzo de 2025.

Para la inspección de vías férreas se suelen utilizar sistemas de visión embarcados en vagones o plataformas especializadas. Un nuevo enfoque presenta el consorcio InspectRAIL<sup>56</sup>, que propone un robot móvil que se desplaza por la catenaria para verificar las condiciones tanto de la vía como de la catenaria misma. En los puntos de apoyo "salta" los aisladores y sigue navegando por el siguiente segmento de la catenaria. Está equipado con un LIDAR (*Light Detection and Ranging*) que permite tomar imágenes aéreas 3D para detectar objetos indeseables y, además, medir la reflectividad de la superficie de las vías para mejorar la inspección.

En el caso de la I&M de puentes existen numerosas soluciones basadas en UAV que inspeccionan la superficie desde el exterior y son capaces, en algunos casos, de colocar sensores mediante brazos manipuladores. La dependencia de la climatología, sobre todo viento y lluvia, y la relativamente corta vida de las baterías son aspectos a tener en cuenta. Pero para un mantenimiento, sea rutinario o integral, se necesitan robots de mayor envergadura y más estables. La empresa francesa Structure et Réhabilitation<sup>57</sup> ha desarrollado un sistema semiautónomo basado en un vehículo con sistema de estabilización y un brazo robótico especial, con despliegue sobre el parapeto de 2,5 m con secciones verticales y horizontales de hasta 7 m cada una, todo ello para la reparación de puentes de hormigón.

Para las infraestructuras energéticas las soluciones son más diversas debido a la naturaleza de las mismas. Las aplicaciones más comunes son: i) limpieza de paneles solares con robots móviles dado que la suciedad superficial reduce significativamente su eficacia, ii) reparación de los bordes de las palas de los aerogeneradores con robots escaladores que permiten un lijado y aplicación de masilla reparadora de manera uniforme, iii) inspección del interior de tuberías en las plantas de generación de electricidad (convencionales y nucleares) mediante robots móviles, con operación remota y potente sistema sensorial (visión, ultrasonidos) para prevenir roturas, iv) inspección y vigilancia de gaseoductos y oleoductos terrestres mediante UAV, con ubicación en sitios de difícil acceso para una detección temprana de fugas mediante cámaras térmicas, etc.

Punto y aparte es la inspección de las plataformas marinas petrolíferas y de las plantas de energía solar flotante (*offshore*). En este caso se trata principalmente de aplicar robótica submarina que inspeccionen las infraestructuras sumergidas con una navegación marina que presenta múltiples complicaciones: ausencia de señales GPS y 4G/5G, turbulencias que dificultan la estabilidad, fuertes corrientes marinas que impide una buena navegación y visibilidad reducida. La empresa española IQUA Robotics<sup>58</sup> ha desarrollado el AUV (*Autonomous Underwater Vehicle*) Girona500 que permite una navegación autónoma en profundidades de hasta 500 m. Una de sus aplicaciones es la inspección de granjas eólicas marinas *offshore* y en especial de sus cimientos sumergidos para la protección contra erosión mediante mapeo de su estado.

---

<sup>56</sup> InspectRAIL EU project, <https://community.rimaneetwork.eu/6847/InspectRAIL-2OC>, consultado en marzo 2025.

<sup>57</sup> Baptiste Sutter et al., A semi-autonomous mobile robot for bridge inspection, *Automation in Construction*, vol. 91, 2018.

<sup>58</sup> IQUA Robotics, <https://iquarobotics.com>, consultado en marzo de 2025.

No obstante, el mayor reto en la I&M robótica lo constituyen las plantas petroquímicas. Son instalaciones muy complejas y de máxima seguridad que están sujetas a degradación (al estar al aire libre), a la corrosión de tuberías y a trabajos de gran riesgo para los operarios. Para una inspección desde el terreno se empiezan a utilizar robots cuadrúpedos como el ANYmal de la empresa suiza Anybotics<sup>59</sup> que permite automatizar las inspecciones y aumenta la OEE (eficacia general del equipo) en zonas ATEX (*ATmosphères EXplosibles*) y no ATEX. Otra tendencia es utilizar sistemas multi-robot cooperativos para una inspección multiobjetivo. El proyecto HYFLIERS<sup>60</sup> para inspección de tuberías propone un robot híbrido consistente en una plataforma móvil (con ruedas de sujeción magnética a la tubería), con hélices inclinadas para mejorar la maniobrabilidad y ayudar a la estabilidad en la tubería, y un equipo sensorial basado en ultrasonidos para un análisis no destructivo.

### 3.5. Clasificación y separación de residuos

La combinación del crecimiento demográfico mundial y la rápida urbanización está dando lugar a un número cada vez mayor de proyectos de construcción. El sector de la construcción desempeña un papel clave en el crecimiento económico, pero también tiene un impacto significativo en el medio ambiente. El sector de la construcción representa el 38 % de todas las emisiones mundiales de gases de efecto invernadero y más del 40 % del consumo de recursos primarios<sup>61</sup>. En esta situación, adoptar los principios de la economía circular<sup>62</sup> se está convirtiendo en una regla de crecimiento en el sector. La economía circular se basa en los principios de eliminación de residuos y de la contaminación, manteniendo los productos y materiales en uso y regenerando los sistemas naturales. Todo ello, nos lleva a una importante apuesta de la robótica por los temas de clasificación y separación de residuos, que representan las últimas fases del modelo de la economía circular.

El primer problema que se plantea es la recogida por robots de los residuos que se encuentran esparcidos por toda la obra. Para determinado tipo de residuos de pequeño tamaño (tornillos, pilas, agarraderas, guantes, etc.) se usan robots móviles que acuden bajo demanda a los lugares necesarios. La empresa española IntecRobots ha desarrollado sus robots para reciclar residuos con uno o varios contenedores de basura con capacidad de 40 kg. De esta manera los operarios no tienen que ir al punto de reciclado, los robots van hacia ellos indicando que contenedor es para cada residuo. Para residuos de mayor tamaño, lo normal es transportarlos sin clasificación en grandes volquetes para su posterior tratamiento en estaciones especializadas. Algunos desarrollos experimentales proponen robots móviles con brazos para la identificación en obra de los residuos y su correcta clasificación y

---

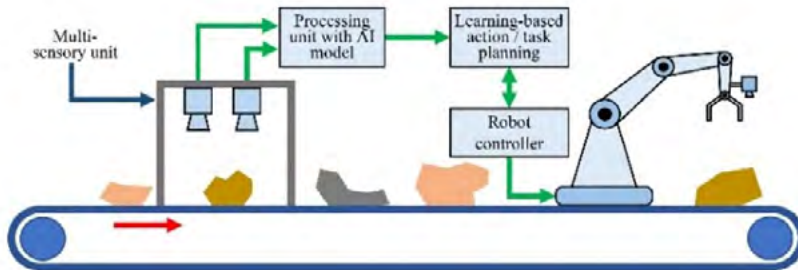
<sup>59</sup> Robotic inspection for chemicals industries, <https://www.anybotics.com/industries/robotic-inspection-for-chemicals>, consultado en marzo de 2025.

<sup>60</sup> HYFLIERS EU project, <https://www oulu.fi/hyfliers>, consultado en marzo de 2025.

<sup>61</sup> The circular economy: An opportunity for the buildings and construction sector, PricewaterhouseCoopers, 2023.

<sup>62</sup> Economía circular en la construcción: Impacto y beneficios de la nueva Ley de Residuos, Rebuild, 2024.

almacenamiento en su contenedor<sup>63</sup>. El robot está equipado con un LIDAR y dos cámaras de profundidad con una IMU (*Inertial Measure Unit*) integrada, que permiten una resolución de localización de los residuos de 3 cm en un rango de 100 m.



Esquema básico de un sistema de clasificación de residuos con robots e IA (Dodampegama)

La mayoría de las actuales plantas de valorización de residuos de la construcción disponen de equipos de tratamiento de un nivel tecnológico insuficiente para garantizar calidades que satisfagan las demandas de la economía circular. No obstante, se empiezan a incorporar nuevos sistemas robóticos con múltiples sensores integrados con software con IA. Una configuración básica de una moderna planta de reciclado está compuesta por<sup>64</sup>: i) una cinta transportadora, por donde van circulando los residuos, ii) un sistema sensorial, basado en cámaras con procesamiento artificial de imágenes, iii) un sistema de toma de decisión con IA para clasificación de objetos en la cinta y iv) un brazo robótico de separación de residuos con una alta capacidad de manipulación en movimiento. Esta arquitectura se está utilizando por la empresa finlandesa ZenRobotics que posibilita, en algunas obras, recuperar hasta 8 tipos de materiales distintos aumentando la tasa de recuperación de un 12 %, debido a que se reciclan materiales nuevos que no se valorizaban anteriormente.

Desde 2024, la Unión Europea implementará una nueva regulación que requiere que casi todos los productos vendidos en la UE cuenten con un Pasaporte Digital de Producto (*Digital Product Passport - DPP*)<sup>65</sup>. El pasaporte digital tiene en cuenta todos los niveles de la cadena de suministro, revelando que las etapas iniciales son las menos digitalizadas. Por lo tanto, los principales ámbitos de investigación se focalizan en rastrear atributos de estas etapas, en la integración de la identificación, en la gestión automatizada de activos respaldados por IA, así como en la generación y lecturas de formatos que permitan la transferencia de información<sup>66</sup>. Es importante contar con bases de datos especializadas a las cuales se pueda acceder de manera automatizada como la de Ökobaudat y la del ITeC.

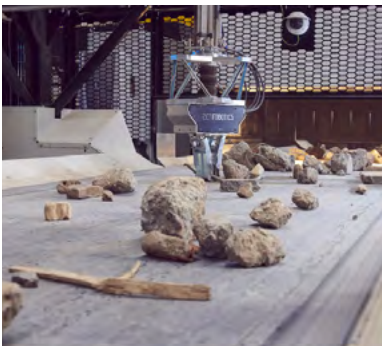
<sup>63</sup> Xinxing Chen et al., Robot for automatic waste sorting on construction sites, *Automation in Construction*, vol. 141, 2022.

<sup>64</sup> Shanuka Dodampegama et al., Revolutionizing construction and demolition waste sorting: Insights from artificial intelligence and robotic applications. In *Resources, Conservation and Recycling*, Elsevier, vol. 202, 2024.

<sup>65</sup> EU's Digital Product Passport: Advancing transparency and sustainability, <https://data.europa.eu/en/news-events/news/eus-digital-product-passport-advancing-transparency-and-sustainability>, consultado en marzo 2025.

<sup>66</sup> Sultan Çetin et al., Data requirements and availabilities for material passports: A digitally enabled framework for improving the circularity of existing buildings, *Sustainable Production and Consumption*, vol. 40, 422–437, 2023.

Para una mejor caracterización de los residuos (cumpliendo la DPP) y poder clasificarlos adecuadamente, se necesita una combinación de varios sensores y algoritmos de IA que permitan identificar las composiciones físicas y químicas del material y flujos del residuo. Con esta información se podrá trazar, predecir e inferir las características necesarias para tratar adecuadamente los residuos. Tecnalía ha desarrollado el sistema TRAZIA<sup>67</sup>, de este tipo que aumenta significativamente la cantidad de información que actualmente reciben los diferentes agentes de la cadena de valor sobre los materiales analizados, en comparación con técnicas tradicionales de análisis en laboratorio. Se trata de un sistema, que usando sensores multimodales espectrales, cámaras de visión y algoritmia de aprendizaje profundo es capaz de trazar y predecir múltiples características de recursos materiales como su morfología, color, tamaño o composición química para incrementar la trazabilidad de información. Así, las empresas mejoran la toma de decisiones respecto a la reutilización y reciclaje los materiales aumentando el control de calidad de estos. Además, este proceso aumenta en un 20 % la productividad empresarial.



*Sistema robótico de clasificación y separación de residuos (ZenRobotics)*



*Equipo TRAZIA para para la caracterización de productos y flujos de residuos (Tecnalía)*

La generación de residuos en los procesos de demolición merece un análisis especial dado que representan más de un tercio de todos los residuos generados en la Unión Europea. Contienen una amplia variedad de materiales, como hormigón, ladrillos, madera, vidrio, metales y plástico. La clasificación de grandes cantidades de hormigón *in situ* no presenta grandes problemas y son transportados en camiones a plantas de reciclado. Los problemas surgen cuando hay que identificar en obra pequeños objetos de difícil separación posterior. Son varios los experimentos realizados, pudiendo destacar el implementado en Hong Kong con robots móviles manipuladores, tipo excavadoras, para la búsqueda en obra de clavos y tornillos en los procesos de demolición<sup>68</sup>. La clave está en el uso de técnicas de R-CNN (*Region Based Convolutional Neural Networks*) para la visión artificial, más rápidas para encontrar en terreno irregular clavos y tornillos dispersos en tiempo-real. Los resultados han sido muy prometedores con una cobertura del área de 2.036 m del 100 % y un tiempo medio de 4 seg por giro del robot.

<sup>67</sup> Lanzamos un sistema de IA para revalorizar materiales, <https://www.tecnalia.com/noticias/sistema-ia-revalorizar-materiales>, consultado en marzo de 2025.

<sup>68</sup> Zeli Wang et al., Construction waste recycling robot for nails and screws: Computer vision technology and neural network approach, *Automation in Construction*, vol. 97, 2019.

## 3.6. Transporte y logística

El uso de la robótica inteligente en el transporte y la logística se centra en dos aspectos básicos: i) transporte de materiales, tierra, desechos y equipamiento por carretera o similar, basado en tecnología de vehículos autónomos y ii) logística en obra para gestión del almacenaje y movimiento de materiales, basada en tecnología de robots móviles. En ambos casos las principales ventajas se pueden resumir en<sup>69</sup>:

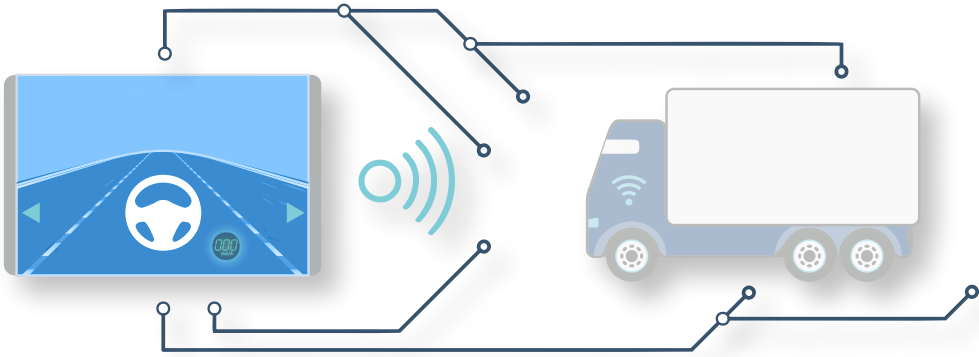
- ♦ **Mayor eficiencia:** son sistemas que pueden trabajar de manera continua en modo 24/7 con habilidades de multitarea, guiado tanto en carretera como campo a través y con mantenimiento predictivo.
- ♦ **Aumento de la seguridad:** el transporte de cargas pesadas puede reducir el riesgo de lesiones para los trabajadores; además, disminuye la necesidad de que los trabajadores operen en entornos peligrosos.
- ♦ **Reducción de costes:** a pesar de las grandes inversiones iniciales necesarias estos sistemas tienen un bajo coste operativo a medio-largo plazo y optimizan el uso de los recursos; además se reducen los desperdicios durante el transporte.
- ♦ **Mayor calidad de servicios:** las tareas se realizan con una alta precisión tanto en la geolocalización como en el tiempo de entrega, minimizando los errores de entrega; además *mejora* la organización de la obra.
- ♦ **Sostenibilidad:** se reducen los desperdicios de material, tiempos muertos y uso de energía de los vehículos contribuyendo a la agenda verde de la construcción; además el uso de vehículos eléctricos cumple con la construcción respetuosa con el medioambiente.

A pesar de estas ventajas hay que resolver varios temas que plantea el uso de robots en la construcción: cuestiones regulatorias y de seguridad, necesidad de desarrollar estándares específicos para el uso de robots en la construcción, ciberseguridad de los datos y en el control de los vehículos, integración de las tecnologías robótica con sistemas manuales y formación de los empleados para el uso de sistemas autónomos.

---

<sup>69</sup> Autonomous Construction Vehicles: The Way to the Future, Pinnacle IIT, 2025.

En la parte de transporte de materiales por carreteras, sobre todo de gran tonelaje, cada vez más se emplean camiones o volquetes autónomos. Se trata de aplicaciones de corto alcance, tanto de movimiento de tierra como de minería al aire libre, estando en desarrollo el transporte de larga distancia. La tecnología empleada es similar a la de los coches autónomos (fusión sensorial, guiado GPS, comunicaciones inteligentes), con la salvedad de que son menos estables dinámicamente al transportar grandes cargas. Daimler Truck<sup>70</sup> está investigando en camiones con un nivel elevado de autonomía (4 sobre 5), aunque lo que ofrece en el mercado son vehículos con autonomía de nivel 2 (parcial), lo que significa que el vehículo es semiautónomo, al poder el conductor soltar el volante durante 30 segundos y el vehículo seguir circulando.



Por otro lado, está la gestión de flotas de vehículos y su coordinación con otra maquinaria de construcción. Así, la empresa sueca de camiones Scania está introduciendo una flota de 11 camiones autónomos de corta distancia para minería. La empresa está terminando las pruebas en el área minera más grande del mundo en Pilbara (Australia)<sup>71</sup>. Son camiones 8x4 de 40 toneladas que utilizan sistemas multisensoriales (LIDAR, radar, visión, GPS) y un sistema de comunicación inalámbrica de corta distancia V2X (*Vehicle to Vehicle*) para comunicación entre vehículos autónomos, que a su vez mejora la seguridad vial. Por otro lado, la cooperación de vehículos autónomos y maquinaria se centra en la coordinación de excavadoras y camiones para el movimiento de tierras. De esta manera, se crea un ecosistema excavadora-camión-terreno que funciona de manera coordinada mediante comunicaciones inalámbricas y sensores del terreno (LIDAR de largo alcance).

<sup>70</sup> Camiones autónomos: ¿A favor o en contra?, <https://pro.michelin.es/blog/articles/autonomous-trucks-for-or-against>, consultado en marzo 2025.

<sup>71</sup> Los camiones autónomos empiezan a comercializarse: Scania abre la recepción de pedidos para el segmento minero, Scania news, 2024.

En la parte de logística en obra y en almacenes, el transporte de materiales es una actividad crítica en cualquier proyecto de construcción y el uso de robots autónomos y vehículos guiados automatizados (*Automated Guided Vehicle - AGV*) puede facilitar el transporte eficiente de materiales dentro de la obra<sup>72</sup>. La empresa española Robotnik ha desarrollado, dentro del proyecto europeo COBOLLEAGUE, un robot móvil colaborativo para el transporte autónomo de materiales en exteriores de las obras de construcción. El robot está enfocado a la navegación autónoma en exteriores, que se caracterizan por ser terrenos irregulares y por tener una gran variedad de obstáculos estáticos y dinámicos. Se trata de una base móvil modular todoterreno de alta movilidad diseñada para el transporte de cargas de hasta 200 kg. El robot es capaz de generar un mapa de su entorno y localizarse y navegar en él de forma fiable y segura, siendo capaz de realizar tareas de transporte a corta distancia o tareas de transporte de última milla<sup>73</sup>. Como resultado se ha conseguido, en pruebas piloto, una reducción del 7 % del coste y tiempo del transporte a un precio moderado del orden de 17.000 € y mejor asignación de recursos humanos.



*Camión autónomo Scania en una mina en la región de Pilbara (Australia)*



*Robot autónomo para transporte de materiales en obra (Robotnik/Eurecat)*

Punto y aparte son los UAV (drones) para transporte de materiales ligeros y herramientas tanto en interiores (almacenes o dentro de la obra) como en exteriores (al aire libre en zonas de difícil acceso). En las aplicaciones de almacenes, las tareas más comunes son búsqueda de artículos difíciles de localizar, inspección de la parte superficial de las estanterías, acceso a áreas de almacenaje estrechas, transporte de mercancías, etc. La empresa española Mecalux, líder en almacenes automatizados, plantea las siguientes aplicaciones: entrega de pedidos de bajo peso, aunque para ello se requieren los correspondientes permisos de vuelo, monitorización de los almacenes inspeccionando las estanterías y naves, gestión de inventarios de modo rápido y seguro mediante cámaras y etiquetas RFID (*Radio-frequency Identification*). Por otro lado, el uso de UAV al aire libre se ha incrementado notablemente en los últimos años, aunque la legislación actual sigue teniendo su talón de Aquiles de la legislación y igual que el reducido peso que pueden transportar<sup>74</sup>.

<sup>72</sup> Thomas Bock and Thomas Linner, *Robot-Oriented Design: Design and Management Tools for the Deployment of Automation and Robotics in Construction*, Cambridge University Press, 2016.

<sup>73</sup> ESMEERA (European SMEs Robotics Applications) consortium, COBOLLEAGUE project, <https://www.esmera-project.eu/2019/05/23/cobolleague>, consultado en marzo 2025.

<sup>74</sup> Javier Irizarry and Dayana Bastos Costa, D. B., *Exploratory study of potential applications of unmanned aerial systems for construction management tasks*, *Journal of Management in Engineering*, 32(3), 2016.

## 4. TECNOLOGÍAS ROBÓTICAS PARA LA CONSTRUCCIÓN

### 4.1. Plataformas robóticas

#### 4.1.1. Robots móviles

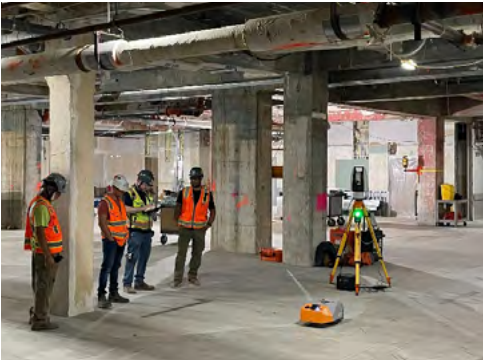
*Un robot móvil es un robot con capacidad de moverse inteligentemente (navegar) en diferentes superficies de su entorno, normalmente planas, con diferentes sistemas de locomoción, normalmente ruedas.*

La aplicación de los robots móviles en la construcción es amplia y variada. Desde el punto de vista de control se dividen en sistemas teleoperados, semiautónomos y autónomos. En el primer caso es un operador humano quien comanda el robot a distancia mientras en los dos últimos casos el robot cuenta con un sistema sensorial, que le permite una navegación en modo totalmente autónomo (sin intervención humana) o semi-autónoma (con supervisión humana: *human-in-the-loop*). Los sensores embarcados más comunes son cámaras de visión y térmicas, LIDAR, GPS, etc. Respecto a los algoritmos inteligentes de navegación el más utilizado es el SLAM (*Simultaneous Localization and Mapping*), que construye el mapa del entorno y se localiza mientras navega.



Desde el punto de vista de las aplicaciones, los robots móviles se dividen en dos grupos, de interiores y de exteriores. Los de interiores cuentan con una locomoción más sencilla, normalmente cuatro ruedas en diferentes configuraciones, mientras los de exteriores cuentan con una locomoción más potente de ruedas u orugas, siendo normalmente sus cargas útiles más elevadas. Entre los robots de interiores se puede destacar los AGV (*Automated Guided Vehicle*) que se emplean normalmente en almacenes o plantas de prefabricación (entorno estructurado) siguiendo caminos preestablecidos o robots autónomos AMR (*Autonomous Mobile Robot*) que navegan en los interiores de la obra. La empresa estadounidense Dusty Robotics<sup>75</sup> implementa el concepto de *FieldPrinter* que permite ejecutar tareas de seguimiento en obras directamente desde modelos digitales (*BIM-to-robot*).

<sup>75</sup> Dusty Robotics, <https://www.dustyrobotics.com/about>, consultado en marzo de 2025.



*Un robot móvil implementando el concepto de FieldPrint en el interior de un edificio en construcción (Dusty Robotics)*

Para robots móviles de exteriores se suelen usar plataformas más robustas para el transporte autónomo de cargas, inspección de infraestructuras o generación de mapas. En este caso, los robots ejecutan de manera autónoma rutas preprogramadas (o pueden ser teleoperados en tiempo-real desde un sitio remoto) y usan sus sensores de percepción para fabricar una reconstrucción digital de los sitios (*Robot to BIM*). Este mapa 3D, tratado por una IA adicional, permite ejecutar tareas de seguimiento de obras, inventarios, detección de errores, etc. Los datos se comunican con el BIM para poder tomar acciones correctivas, como en el caso de la empresa Naska.AI<sup>76</sup>.

## 4.1.2. Manipuladores móviles

***Un manipulador móvil es un sistema con capacidad de moverse como un robot móvil y a la vez tiene embarcado uno o varios brazos que le permiten ejecutar tareas de manipulación.***

El uso de sistemas robóticos que combinan plataformas móviles y brazos manipuladores está cada vez más extendido en la construcción. Presentan una importante ventaja de poder situar el extremo del brazo en cualquier punto de la obra para realizar operaciones de manipulación. Se distinguen dos tipos de sistemas de control: i) control separado de ambas partes de tal manera que el robot móvil funciona independientemente del brazo, de hecho son dos controladores separados y ii) control coordinado (y centralizado) de ambos sistemas que permite desplazarse por el terreno a la vez que se mueve el brazo. En este último caso, el controlador es mucho más complejo ya que debe abordar problemas de singularidad cinemática (posiciones del robot que puede alcanzar con varias configuraciones, por ejemplo, brazo a la izquierda o brazo a la derecha).

Por otro lado, cada vez más, se emplean manipuladores colaborativos (*cobots*) que cuentan con la ventaja de una interacción segura humano-robot en el mismo espacio de trabajo. A diferencia de los manipuladores industriales tradicionales, los *cobots* cuentan con un sistema de control que tiene en cuenta (en tiempo-real) las fuerzas y momentos que se producen sobre el robot para, o bien tomar acciones que eviten una colisión con el operador humano, o bien, al revés, ser fácilmente físicamente guiados por el operador. Son manipuladores pensados para trabajos colaborativos en los que parte de las tareas se realizan por el robot autónomamente y parte en colaboración.

<sup>76</sup>Naska.AI, <https://naska.ai/company/>, consultado en marzo de 2025.

Las últimas tendencias apuntan a que se incorporan varios brazos a las plataformas móviles para pasar de una mono-manipulación a una bi-manipulación<sup>77</sup>. La destreza del robot aumenta sustancialmente al poder realizar operaciones complejas como abrir/cerrar recipientes o válvulas, intercambiar herramientas, etc.



Manipulador móvil de taladrado y atornillado autónomo  
(nLink Robotics)

Como ejemplo se puede mencionar a la empresa noruega nLink Robotics<sup>78</sup> que ha desarrollado un manipulador móvil para el taladrado en los techos, sitios de difícil acceso para los operarios humanos. El robot realiza un mapa del entorno, navega autónomamente al lugar definido en el plano, identificara de manera inteligente la estructura del techo con láser visible y finalmente realiza el taladrado y, si es necesario el atornillado. De esta menara puede realizar hasta 500 taladrados al día sin producir polvo.

### 4.1.3. Robots controlados por cables

**Un robot controlado por cables es un robot cuyos actuadores están formados por varios cables donde unos extremos se enrollan alrededor de tambores movidos por motores mientras los otros extremos mueven al elemento final del robot.**

Un robot paralelo, también conocido como robot *delta*, es un tipo de robot manipulador que se caracteriza por tener varios eslabones conectados a una estructura central, formando una configuración en forma de paralelogramo. El robot paralelo controlado por cables (*Cable-Driven Parallel Robot - CDPR*)<sup>79</sup> está pensado para entornos de trabajo muy grandes, donde los eslabones rígidos se sustituyen por cables flexibles. La propiedad particular de los cables proporciona varias ventajas, que incluyen espacios de trabajo más grandes una mayor relación carga útil-peso y menores costes de fabricación, en comparación con los robots de enlaces rígidos. No obstante, como desventaja hay que tener en cuenta que los cables solo pueden ser accionados por tensión positiva para mantener su forma en línea recta, en lugar de compresión negativa.

<sup>77</sup> TIAGo++, the robot you need for bi-manual tasks, <https://pal-robotics.com/blog/tiago-bi-manual-robot-research>, consultado en marzo de 2025.

<sup>78</sup> Drilly - the first mobile drilling robot, <https://www.nlinkrobotics.com/projects/drilly-mobile-drilling-robot>, consultado en marzo de 2025.

<sup>79</sup> Sen Qian et al., A Review on Cable-driven Parallel Robots. Chinese Journal of Mechanical Engineering, vol. 31, nº 66, 2018.

Un típico CDPR está compuesto por tres partes: 1) una plataforma fija donde se colocan los motores y los tambores enrolladores de cables, 2) una plataforma móvil que representa el elemento final del robot en donde se coloca la pinza o el instrumento que realiza la operación y 3) varios cables que son los que mueven la plataforma móvil. Al cambiar la longitud de los cables se modifica la posición y orientación del elemento final, situándolo en el lugar deseado. El robot se considera sub-actuado si la posición y orientación de su elemento final está determinada solo por su gravedad. Mientras que, si la posición y orientación están totalmente determinadas por las longitudes de los cables, el CDPR es óptimamente actuado o sobre-actuado.

Como ejemplo representativo se puede citar el CDPR denominado Hephaestus<sup>80</sup> para varias aplicaciones de la construcción como desplazamiento a lo largo de la fachada de edificios de una cabina que aloja dos utillajes: uno es un brazo robótico que lleva a cabo la instalación de los módulos del muro cortina (colocación de los anclajes) y otro que recoge los módulos del muro cortina y los lleva hasta su posición final. El robot cuenta con un módulo de conexión al sistema BIM del edificio. Los ensayos han demostrado factible instalar un módulo de muro cortina de 6 metros del alto por 1,5 metros de ancho en espacios de 100 x 100 m, cubriendo con amplio margen muchas de las configuraciones de edificios actuales sin reducir la precisión necesaria para instalar este tipo de fachadas.



*El robot Hephaestus controlado por cables para la instalación de módulos del muro cortina (Tecnalia, coordinador)*

#### 4.1.4. Robots caminantes: humanoides y cuadrúpedos

***Un robot caminante (con patas) es aquel cuya locomoción viene dada por un sistema de patas. Un humanoide cuenta con una locomoción bípeda, inspirado en los humanos, mientras un cuadrúpedo, con cuatro patas, se inspira en los animales.***

La robótica bio-inspirada es tendencia y se abre camino entre los robots especializados para determinadas tareas al ofrecer soluciones mucho más generales. Además, incluyen un sistema de locomoción diferenciador basado en patas, en vez de ruedas. La gran ventaja de este tipo de robots es que no necesitan la adaptación del entorno de trabajo, que está pensado para los humanos y adaptado a su morfología. Los dos exponentes de esta tendencia son los robots humanoides (bípedos) y los cuadrúpedos. El actual boom de este tipo robots, llamado la segunda ola de humanoides, sobre todo por la irrupción de varias empresas chinas que han reducido por diez los precios (sí, ha leído bien, en 10 veces), hace muy atractivo este tipo de robots para la construcción.

<sup>80</sup> Hephaestus EU Project, <https://www.hephaestus-project.eu>, consultado en marzo de 2025.

Aunque la locomoción con patas ofrece numerosas ventajas (subir/bajar escaleas, desplazarse en terrenos irregulares, etc.) su control es complejo, sobre todo lo que se refiere a la estabilidad de cuerpo entero. Indudablemente, la estabilidad de los cuadrúpedos (cuatro patas) es mucho mejor que la de los humanoides bípedos (dos patas). Este hecho hace que estén apareciendo varias empresas y productos con aplicaciones directas a la construcción como, por ejemplo, el robot cuadrúpedo Go2 de la empresa china Unitree, que está diseñado para aplicaciones autónomas al aire libre<sup>81</sup> tipo inspección, mapeo del entorno, rescate, manipulación y mantenimiento con un brazo asociado, detección de fugas o incendios, etc.



*El humanoide ATLAS cooperando con un operario humano en una obra (Boston Dynamics)*

La empresa estadounidense Boston Dynamics cuenta con un piloto de aplicación de su humanoide Atlas para la construcción<sup>82</sup>. Se parte de un entorno con andamios en donde el robot ayuda al operario humano en su trabajo manual. Un trabajador dice en voz alta que olvidó sus herramientas, pulsa un dispositivo y Atlas entra en acción: agarra una tabla de madera, la usa para salvar un espacio entre él y el trabajador, toma una bolsa de herramientas y se la lanza hábilmente. Para maniobrar en entornos el robot utiliza cámaras en su cabeza que funcionan de forma “muy similar” a los ojos humanos. Por otro lado, la técnica de control predictivo permite al robot predecir cómo deberá cambiar su movimiento para la próxima acción.

## 4.1.5. Robots escaladores

***Un robot escalador se define por poder moverse de forma segura sobre cualquier superficie vertical (paredes, techos, superficies curvas) venciendo la gravedad además de su propio peso.***

Los robots escaladores (también denominados trepadores) tienen la habilidad de navegar por superficies verticales, adhiriéndose o agarrándose a ellas, lo que les hace únicos para numerosas aplicaciones en entornos de difícil acceso en donde los operarios u otro tipo de robots no pueden acceder. Sus principales aplicaciones en la construcción son inspección, mantenimiento y construcción en infraestructuras tipo fachadas de edificios, puentes, tolvas, tanques de almacenamiento, etc. Las tareas son varias y van desde limpieza de superficies (por ejemplo, cristales) hasta el control de estado de corrosión (puentes metálicos).

<sup>81</sup> How can quadruped robots help the power industry upgrade?, Industrial an inspection applications, <https://www.unitree.com/industry/electricity>, consultado en marzo de 2025.

<sup>82</sup> Boston Dynamics showcases humanoid robot in mock construction site, 2023, <https://www.boston.com/news/technology/2023/01/19/boston-dynamics-humanoid-robot-atlas-construction-site>, consultado en marzo de 2025.

El punto más crítico de estos robots es la adhesión segura a la superficie para no caer. Se utilizan generalmente cuatro métodos de adhesión<sup>83</sup>: i) magnética con electroimanes, buena solución en superficies ferromagnéticas, aunque pesada, ii) por vacío mediante ventosas, ligero y fácil de controlar, aunque presenta el problema del suministro de aire comprimido, iii) por succión utilizando ventiladores/hélices, alta fuerza de agarre, pero ruidoso y con poca estabilidad y iv) por agarre directo mediante pinzas/garras, utilizado en estructuras con muchas vigas. En cualquier caso, un robot escalador debe ser ligero y proporcionar una gran fuerza de sujeción. La navegación de este tipo de robots se realiza con técnicas mixtas, mientras cada elemento de locomoción (oruga, pata) controla de manera independiente su sujeción (control distribuido), el movimiento de todo el robot usa el enfoque biomimético reflexivo que permite al robot adaptarse a diferentes condiciones de la superficie (control centralizado).



Robot escalador ROMERIN para inspección de infraestructuras (UPM)<sup>84</sup>

Los robots escaladores se pueden utilizar en la inspección de infraestructuras de difícil acceso. ROMERIN es un robot modular con patas (normalmente cuatro) equipadas con ventosas que le permiten adherirse a diferentes tipos de superficies para moverse en entornos complejos verticales e incluso techos. Puede transportar equipos de navegación e inspección, como cámaras 3D o LIDAR, y equipos NDT (sensores ultrasónicos y georradars de penetración) para realizar tareas de inspección. La sujeción segura se controla instalando en cada pata una ventosa con su correspondiente bomba de vacío para crear la adherencia necesaria.

#### 4.1.6. Exoesqueletos y sistemas vestibles

**Un exoesqueleto (robótico) es una estructura externa que recubre el cuerpo humano y tiene la función de ayudar a realizar determinadas acciones físicas.**

**Un sistema vestible es una prenda con sensores y posibles actuadores.**

Todo lo relacionado con la incorporación de dispositivos mecánicos, electrónicos e informáticos en el cuerpo humano tiene por objetivo mejorar (aumentar) sus capacidades físicas, sensitivas y cognitivas. Esta tendencia, no exenta de controversia ética, va encaminada, en nuestra opinión y en este ámbito, a mejorar las condiciones de trabajo de las personas sobre todo en puestos intensivos de trabajo físico. En este sentido, recientemente se ha introducido el concepto de sistemas vestibles (*wearable*) que va desde la incorporación de una prenda inteligente hasta una estructura física.

<sup>83</sup> Yi Fang et al., Design and Technical Development of Wall-Climbing Robots: A Review, Journal of Bionic Engineering, vol. 19, 2022.

<sup>84</sup> Miguel Hernando et al., ROMERIN: A new concept of a modular autonomous climbing robot, International Journal of Advanced Robotic Systems, vol. 22, nº 5, 2022.

La industria de la construcción está introduciendo cada vez más dispositivos vestibles<sup>85</sup>: i) cascos inteligentes, equipados con sensores que monitorizan el entorno del trabajador y detectan posibles peligros, ii) relojes inteligentes, que analizan la actividad física y alertan de cuando un trabajador se esfuerza demasiado o muestra signos de estrés, iii) sensores ambientales en la ropa, que alertan de la exposición a condiciones peligrosas, como gases tóxicos, temperaturas extremas o altos niveles de ruido, iv) chalecos de seguridad conectados, equipados con rastreo GPS, sensores de movimiento y luces LED que alertan de posibles peligros, v) gafas de Realidad Aumentada, que superponen información digital al entorno físico para ver planos de construcción, identificar servicios subterráneos o ver modelos estructurales simulados, etc. Lo ideal es que muchos de estos sistemas sean interconectados y formen una red de sensores.



*Exoesqueleto EXO-O1 diseñado para trabajos cansados en instalaciones eléctricas (Hilti)*

Los objetivos de los exoesqueletos, siendo también vestibles, son diferentes, ayudar a los operarios en tareas físicas de alto nivel de desgaste. Existen dos tipos de exoesqueletos: a) pasivos, que se dedican a soportar y reducir la tensión muscular y articular (“sillas” en las piernas, soportes de brazos, etc.) y b) activos, que funcionan con motores o actuadores específicos y que aportan fuerza para realizar operaciones que requieren mucho aporte físico. Un buen ejemplo es el exoesqueleto pasivo de la serie EXO de la empresa liechtensteiniana HILTI<sup>86</sup> que reduce la fatiga del hombro y el cuello al realizar el trabajo a una altura superior del hombro.

#### 4.1.7. Vehículos Aéreos no-Tripulados (UAV)

***Un Vehículo Aéreo no-Tripulado (Unmanned Aerial Vehicle - UAV) o comúnmente denominado dron, es una aeronave reutilizable que vuela sin tripulación de manera autónoma o teleoperada remotamente.***

Los UAV están siendo adoptados recientemente por muchas industrias, incluyendo el sector de la construcción. Un factor importante de esta proliferación es el abaratamiento de los precios y la diversidad de empresas que ofrecen servicios. Sus principales ventajas son: mejora de la calidad, reducción de costes, aumento de la seguridad y reducción de la duración de obra. Entre las aplicaciones más demandadas están<sup>87</sup>: i) recopilar información geográfica de grandes superficies

<sup>85</sup> Using Wearable Technology in Construction to Reduce Incidents, American Institute of Constructors, 2024.

<sup>86</sup> Exoesqueleto de hombro EXO-S, Hilti, [https://www.hilti.es/c/CLS\\_HEALTH\\_SAFETY/CLS\\_CONSTRUCTION\\_EXOSKELETONS/r14012433#](https://www.hilti.es/c/CLS_HEALTH_SAFETY/CLS_CONSTRUCTION_EXOSKELETONS/r14012433#), consultado en marzo de 2025.

<sup>87</sup> Ryan Holmes, 5 Key Use Cases for UAVs in Construction, 2023, <https://www.multivista.com/blog/5-key-use-cases-for-uavs-in-construction/>, consultado en marzo de 2025.

ayudando a complementar la topografía, ii) monitorizar el progreso de la construcción capturando imágenes y videos, iii) seguir equipos y materiales mediante video reduciendo las auditorías presenciales, iv) inspeccionar de manera segura lugares peligrosos (difícil acceso, terreno inestable) sin poner en peligro la vida humana, y v) crear materiales de marketing atractivos como fotos de antes y después, vídeos time-lapse y tomas aéreas. No obstante, tienen varias desventajas: poca carga útil, limitada autonomía y dependencia del clima.

Los UAV se clasifican en dos grandes grupos: de ala fija y de ala rotatoria. Los primeros tienen una apariencia similar a los aviones con un cuerpo alargado y unas alas. Entre sus ventajas está su mayor eficiencia energética por lo que se utilizan para aplicaciones de vuelo de largo alcance (fotogrametría, vigilancia). Los de ala rotatoria se distinguen por contar con multirrotores (en general cuadricópteros) con una excelente estabilidad de vuelo, aunque su autonomía es limitada. Estos últimos son los más adecuados para la construcción. Equipan múltiples sensores (cámaras de espectro visible, infrarrojo, multispectrales, térmicas, LIDAR, sensores de detección de gases)<sup>88</sup> y algunos inclusive cuentan con brazos robóticos que permiten realizar aplicaciones de manipulación y colocación de sensores.



Un UAV capturando el modelo 3D del entorno con interfaces BIM y GIS (FCC)

La empresa española FCC Construcción recientemente ha desarrollado varios proyectos con UAV. Uno de ellos es el PWDRON<sup>89</sup>, cuyo objetivo es la monitorización automatizada de infraestructuras en obra civil lineal. El sistema permite un seguimiento automatizado de la ejecución de obra civil lineal: autopistas, autovías, carreteras, enlaces, líneas férreas, movimientos de tierras en grandes volúmenes. Además, integra los datos obtenidos con metodología BIM y GIS, creando modelos GeoBIM.

#### 4.1.8. Robots marinos y submarinos

**Los robots marinos y submarinos son vehículos no tripulados que se pueden operar en superficie o bajo el agua para realizar operaciones tanto geotécnicas de las infraestructuras como de inspección de las mismas.**

Los vehículos autónomos de superficie son embarcaciones autónomas que se utilizan para llevar a cabo estudios geotécnicos en aguas superficiales o poco profundas y permiten cartografiar zonas de interés utilizando sonares de barrido lateral, perfiladores sonares multihaz, magnetómetros o una combinación de estos. En caso de poca profundidad, normalmente hasta 3 m, estos permiten obtener una cartografía de buena resolución que se entrega al final de las inspecciones en forma de video, o en forma de ortofotomapa (foto-mosaico) geo-referenciado. Estos estudios

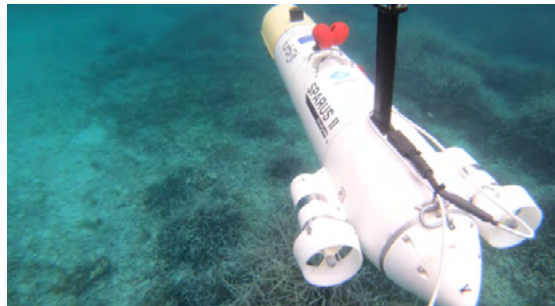
<sup>88</sup> Advanced solutions in UAVs, ETRA AIR, <https://etraair.com/en>, consultado en marzo de 2025.

<sup>89</sup> Proyecto PWDRON, FCC Construcción, <https://www.fcco.com/web/construccion/-/proyecto-pwdron>, consultado en marzo de 2025.

suelen realizarse antes de iniciar la construcción de nuevas infraestructuras en alta mar, como parques eólicos o plataformas petrolíferas.

Respecto a los robots submarinos, existen dos tipos, los ROV (*Remotely Operated Vehicle*) y los AUV (*Autonomous Underwater Vehicle*). Los primeros están ligados a un barco nodriza mediante un cable umbilical, permitiendo que un operador guíe el vehículo mediante información visual capturada con las cámaras de a bordo. Respecto a los segundos, los AUV, navegan de manera autónoma utilizando para el posicionamiento sensor acústicos de tipo USBL (*Ultra-Short Base Line*), dado que las ondas electromagnéticas se transmiten muy mal en el medio acuoso.

Las principales aplicaciones están relacionadas con la construcción de puertos y terminales marítimos, plataformas petrolíferas y de gas, instalaciones de energía eólica marina, limpieza del lecho marino<sup>90</sup>. Por otro lado, están las operaciones de inspección y reparación de estructuras marinas, como cables y tuberías submarinas. En el caso de infraestructuras críticas de defensa y seguridad marítima la protección ante amenazas externas es clave. En este caso, se implementan sensores y sistemas de monitorización continua. Cuando las operaciones se llevan a cabo en áreas de muy baja visibilidad, imposibilitando la utilización de la visión óptica, es posible recurrir a la utilización de cámaras acústicas.



*Robot Autónomo Submarino mapeando el lecho marino (iQua Robotics)*

Los AUV de la empresa española iQua Robotics<sup>91</sup> cuentan con una configuración modular, tanto hardware como software, que los hace fácilmente adaptables a múltiples aplicaciones en el área de la construcción. Presentan autonomías de más de 6 horas en profundidad de hasta 500 m. Además, ofrecen el sistema SoundTiles, una solución de software independiente para la generación automática de mosaicos acústicos submarinos a partir de imágenes de sonar prospectivas.

---

<sup>90</sup> Pere Ridao et al., *Intervention AUVs: The next challenge*, Annual Review of Control, Robotics, and Autonomous Systems, vol. 40, 2015.

<sup>91</sup> iQua Robotics, <https://iquarobotics.com>, consultado en marzo de 2025.

## 4.2. Sistemas de percepción

### 4.2.1. Visión artificial

*Un sistema de visión artificial permite adquirir imágenes (o video), procesar esa información, analizar y comprender esas imágenes con el fin de entender la escena captada y tomar las acciones necesarias.*

Son varios los términos que suelen utilizarse para los sistemas de visión tales como visión por computador, visión de máquina o visión artificial; todos ellos muy similares con ligeros matices técnicos. En el caso de la aplicación a la construcción podemos utilizar el término genérico de visión artificial, que como menciona su definición, se refiere a la adquisición y análisis de imágenes. De hecho, los dos componentes básicos son normalmente las cámaras de visión y un sistema de procesamiento de imágenes.

Desde el punto de vista tecnológico las cámaras se dividen en función de la longitud de onda que captan: i) monocromo, captan la luz en el espectro visible y producen una imagen blanco y negro que hace el procesado muy rápido, ii) color, capta la luz en tres partes del espectro formando imagen RGB (*red, green, blue*), iii) termográficas, trabajan en la longitud de onda del infrarrojo y sirven para medir la temperatura, y iv) multiespectrales, detectan la radiación en numerosas de bandas del espectro, hasta 100. El hardware de las cámaras tradicionales está basado en sensores CCD (*Charge Coupled Device*) mientras que la nueva tendencia son las cámaras de tiempo de vuelo (*Time-of-Flight – ToF*) que permiten obtener imágenes 3D y se popularizaron con la Kinect de MS.



*Sistema de monitorización del avance de obras fotovoltaicas desde drones con cámaras de visión artificial (Izertis)*

La parte de procesamiento de imágenes es de suma importancia. Entre otras funciones esta la extracción de la información necesaria de las imágenes, aplicando diferentes filtros y algoritmos para la reconocimiento y seguimiento de objetos, detección de bordes, caras (reconocimiento facial) y otras muchas más funciones. La herramienta por excelencia es OpenCV<sup>92</sup>, software de libre distribución sobre el cual están construidas multitud de aplicaciones específicas.

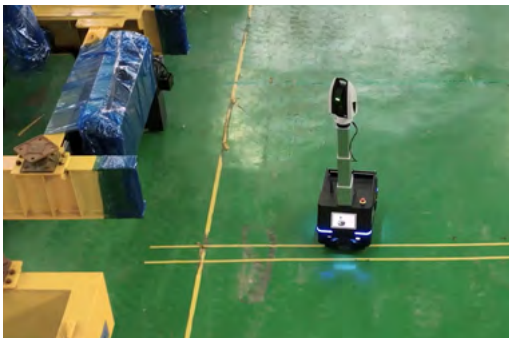
<sup>92</sup> OpenCV, <https://opencv.org>, consultado en marzo de 2025.

Como ejemplo de uso de la visión artificial en la construcción podemos citar a la empresa española Izertis<sup>93</sup>, que desarrolla sistemas de monitorización automática de las obras desde drones con cámaras de alta resolución. A través del vuelo de uno o varios drones se obtienen las imágenes del momento actual de la planta para ser posteriormente procesadas y poder determinar el grado de avance.

## 4.2.2. Sensores basados en láser

***Un sistema sensorial basado en láser es un emisor de haces de luz muy estrechos que se utiliza en robótica fundamentalmente para medir distancias, posiciones con gran precisión y generar mapas del entorno.***

La aplicación más frecuente de los sensores láser en robótica es para la medición de distancias. La tecnología de telémetros láser está muy desarrollada y permite medir distancia en un punto con una gran precisión. Su funcionamiento se basa en emitir un pulso de luz que se refleja en el objeto al que apunta y medir el tiempo de vuelo con el cual se calcula la distancia. De esta manera se puede calcular la distancia del robot a los obstáculos que le rodean y calcular trayectorias libres de colisión.



*Robot móvil equipado con una estación total de seguimiento láser de reflectores en obra (Leica)*

Uno de los sensores láser más usados actualmente es el LIDAR (*Light Detection and Ranging*) que funciona como un radar, pero usa en vez de ondas de radio haces de luz. Normalmente el láser se coloca sobre una plataforma giratoria (o se gira un espejo reflector) que permite al dispositivo tomar lecturas dentro de un radio de casi 360°. De esta manera, se forma una nube de puntos que permite generar un mapa de distancias 3D y modelar geoméricamente el entorno.

En el caso de la marca alemana SICK<sup>94</sup>, los rangos de medición pueden llegar a centenares de metros con resolución de centésimas de grado. La popularidad de los LIDAR es debida a su abaratamiento y sus múltiples aplicaciones en la robótica en la construcción, como la navegación robots móviles.

<sup>93</sup> Izertis desarrolla un sistema de inteligencia artificial para la monitorización automática del avance de obras fotovoltaicas, <https://www.izertis.com/es/-/noticias/izertis-desarrolla-un-sistema-de-inteligencia-artificial-para-la-monitorizacion-automatica-del-avance-de-obras-fotovoltaicas>, consultado marzo de 2025.

<sup>94</sup> LiDAR and radar sensors, SICK, <https://www.sick.com/fr/en/catalog/products/lidar-and-radar-sensors/c/g576776>, consultado en marzo de 2025.

Las estaciones totales con seguimiento automático (*auto tracking*) de marcadores, utilizadas también en topografía, se emplean en robótica para hacer el seguimiento de la punta de brazo robótico a gran distancia en tiempo-real. Se trata de estaciones equipadas con medición de distancia y de los ángulos cenital y azimutal del láser, lo que permite seguir el marcador reflectante. De esta manera tenemos una medición externa de la posición de los robots para evitar errores debidos, por ejemplo, a la flexión de los brazos.

La empresa alemana Leica<sup>95</sup> y la coreana Samsung ofrecen varias aplicaciones en el sector de la construcción. Por ejemplo, equipan los robots móviles de interiores con sus estaciones totales y colocan los reflectores en las grandes piezas estructurales modulares de edificios altos para control de calidad, pasando de tolerancias de unos 50 mm a 2-3 mm. Todo ello, con robots móviles autónomos que esquivan los obstáculos y gobernado desde una única HMI (*Human-Machine Interface*).

### 4.2.3. Sensores de imagen sin línea directa de visión

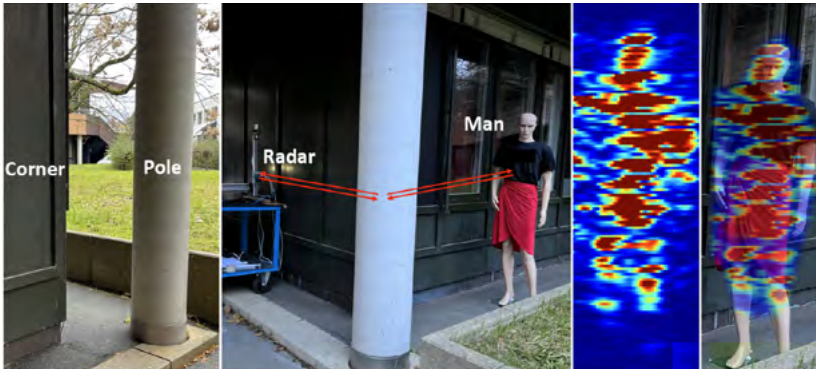
**Un sensor de imagen sin una línea directa de visión crea escenas utilizando la predicción de la reflexión de las señales de radiofrecuencia en objetos ocluidos estimando su geometría y ubicación.**

La creación de imágenes de escenas sin línea directa de visión (NLOS - *Non-line-of-sight*), también llamada "imágenes a la vuelta de la esquina" (*around a corner imaging*), es una tecnología en rápida expansión que se empieza a utilizar tanto en robótica como en la construcción. Se basa en el análisis de las radiotransmisiones en donde el transmisor y el receptor no son directamente visibles entre sí, debido a obstáculos como edificios, columnas o árboles que bloquean la señal. Se puede usar tanto en interiores como en exteriores, aunque la resolución de las imágenes y la precisión de la ubicación dependen de los materiales y de los escenarios. La tendencia actual son los algoritmos de análisis de imágenes de alta resolución que no necesiten conocimiento previo del medio<sup>96</sup>.

Son múltiples las aplicaciones de NLOS que puedan ser implementadas en la construcción, tales como generación de mapas de entornos interiores no visibles, siempre cuando el área de observación no sea mayor de 10 m; construcción de mapas urbanos en exteriores, combinando información de GPS y NLOS, para conocer qué hay detrás de los árboles y coches que tapan la visión directa; eliminación de errores en el control dimensional e impermeabilidad estructural de edificios, especialmente en los dañados, usando algoritmos de eliminación de errores de posicionamiento NLOS basado en vectores de características; uso en gafas de Realidad Virtual para poder ver detrás de las paredes con errores de 2-6 cm; identificación de objetos dentro de espacios cerrados o armarios; etc.

<sup>95</sup> Building the smart construction site, <https://hexagon.com/products/leica-absolute-tracker-ats600>, consultado en marzo de 2025.

<sup>96</sup> Peilun Wu et al., NLOS Positioning for Building Layout and Target Based on Association and Hypothesis Method, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 61, 2023.



Imágenes de personas a la vuelta de la esquina con el sistema RFlect de ondas milimétricas (MIT/EPFL/UIUC)

Uno de los recientes desarrollos más notables para detección de objetos y/o personas es el sistema RFlect<sup>97</sup>, basado en radar milimétrico (mmWaves) que consta de tres pasos: i) reconstruye imágenes de ondas milimétricas sin visibilidad directa clasificando primero los reflectores dominantes en los que las señales pueden reflejarse, ii) estima la geometrías y ubicaciones precisas mediante datos de radar, y iii) predice cómo se reflejarán las señales y combina las señales recibidas para producir imágenes de alta resolución. De esta manera, si al aire libre situamos el radar en un robot a 3 m de una columna detrás de la cual está en ángulo recto una persona a 1,5 m que no es directamente visible, la imagen resultante tiene una resolución de 2-3 cm.

#### 4.2.4. Sensores de fuerza/par y tacto

**Un sensor de fuerza/par para robótica es un dispositivo que mide las fuerzas y los pares externos que se aplican sobre el robot durante su interacción con el entorno.**

**Un sensor de tacto mide las fuerzas en las pinzas/manos robóticas.**

La medición de las fuerzas que se producen durante la interacción de los robots con el entorno es de gran importancia para poder corregir sus movimientos de manera automática. Esta interacción normalmente se mide en las extremidades de los brazos manipuladores que realizan operaciones de tipo transporte de objetos, ensamblado o inserción, atornillado, etc. Se pueden medir fuerzas de manera indirecta, por ejemplo, a través de la corriente de los motores del robot, pero lo más fiable es una medición directa en los puntos de contacto, que normalmente se sitúan en las pinzas que manipulan los objetos o en cualquier parte del robot para evitar colisiones.

<sup>97</sup> Laura Dodds et al., Around the Corner mmWave Imaging in Practical Environments, ACM International Conference on Mobile Computing and Networking, Washington, USA, 2024.

Se pueden distinguir dos tipos de sensores: los que miden fuerzas en una dirección (mono-eje) y los que miden en varias direcciones (multi-eje). Los primeros se basan en múltiples tecnologías (resistivos, capacitivos, piezoeléctricos) para transformar la fuerza sobre un punto del robot en una señal eléctrica. Con esta información el sistema de control del robot puede corregir su posición para ajustarse a las fuerzas programadas. Se suelen utilizar para medir el tacto en los dedos de las pinzas del robot para detectar, sin visión, la rugosidad de los materiales o la presión sobre ellos.

Los sensores de múltiples ejes normalmente miden las fuerzas en los tres ejes cartesianos y, como no se sabe exactamente el punto de aplicación de la fuerza, los pares (momentos) en esos tres ejes. De esta manera, se usan sensores de fuerza/par 6D. La tecnología más comúnmente utilizada, como en el caso de los sensores de la empresa canadiense ATI<sup>98</sup>, está basada en una estructura en cruz deformable y galgas extensiométricas ubicadas en los brazos de la cruz. Con la adecuada calibración del sensor se pueden medir las tres fuerzas y los tres pares,  $F_x$ ,  $F_y$ ,  $F_z$ ,  $M_x$ ,  $M_y$ ,  $M_z$ , y componiéndolos espacialmente saber la dirección y el punto de aplicación de la fuerza.



*Robot colaborativo UR puliendo vidrio blindado con sensores de fuerza/par (Robotiq/Saint-Gobain)*

La planta de Saint-Gobain en Sully-sur-Loire, Francia, produce vidrio blindado para varias aplicaciones incluida la de fachadas. Un *cobot* equipado con sensores 6D de fuerza/par de la empresa francesa Robotiq se emplea en el proceso de pulido del vidrio controlando la fuerza y la posición. Permite “producir la misma cantidad de trabajo en dos turnos de 8 horas en lugar de tres, antes de que llegara el robot<sup>99</sup>”, señala su responsable.

<sup>98</sup> Multi-Axis Force/Torque Sensors, ATI Industrial Automation, <https://www.ati-ia.com/Products/ft/sensors.aspx>, consultado en marzo de 2025.

<sup>99</sup> Reduce Injuries and Increase Productivity with the FT 300 Force Torque Sensor, <https://ifr.org/ifr-press-releases/news/reduce-injuries-and-increase-productivity-with-the-ft-300-force-torque-sens>, consultado en marzo de 2025.

## 4.2.5. Sistemas de posicionamiento global e IMU

*Un sistema de posicionamiento global permite a los robots conocer su posición georreferenciada con gran precisión.*

*Un sistema inercial mide las velocidades, orientaciones y fuerzas gravitacionales.*

El posicionamiento absoluto de los robots y de los elementos constructivos es clave para una buena calidad de las obras. Los sistemas de posicionamiento global, denominados genéricamente GNSS (*Global Navigation Satellite System*), ofrecen una georreferencia de gran precisión al usar múltiples satélites (en algunos casos de hasta cm). Entre los diferentes GNSS el más usado es el norteamericano GPS (*Global Positioning System*). Es un sistema de exteriores que no funciona debajo de la tierra y del agua, y tiene problemas en interiores de edificios o en entornos montañosos. Existen básicamente dos tipos de GPS: i) posicionamiento de punto único, la técnica más usada comúnmente, que permite una precisión de metros y ii) GPS diferencial que implica el uso de una estación de referencia en una ubicación conocida, que permite mediciones hasta centímetros.

Un complemento muy extendido al posicionamiento GPS es el sistema inercial IMU (*Inertial Measurement Unit*) que mide la velocidad, orientación y fuerzas gravitacionales de un robot durante su movimiento, usando una combinación de acelerómetros y giróscopos. Mientras el GPS proporciona información de posicionamiento absoluto, que puede verse afectada por pérdidas de señal de los satélites e interferencias, la IMU proporciona información relativa pero sus errores se acumulan con el tiempo debido a la relativamente baja velocidad de los robots y a los errores de odometría (posición del robot). La integración GPS/IMU<sup>100</sup> proporciona una solución más robusta y ofrece una mayor precisión que la de cada sistema por separado.



*Un robot móvil equipado con un sistema GPS/IMU verificando las coordenadas de los puntos de excavar (Civ Robotics/SatLab)*

Las aplicaciones de este tipo de sistemas en el sector de la construcción son muy diversas, como por ejemplo mediciones precisas y posicionamiento en ingeniería civil (levantamientos topográficos, hidrográficos y mineros). La empresa estadounidense Civ Robotics<sup>101</sup> usa el sistema GPS/IMU con dos cámaras adicionales (Eyr GNSSRTK) de la empresa sueca SatLab para aplicaciones topográficas de precisión. Con una red de varias estaciones base proporcionadas normalmente por un proveedor de servicios (para el GPS diferencial) el sistema, en modo cinemática en tiempo-real, proporciona mediciones 100 veces más precisas que solo las de GPS con una precisión de hasta 1 o 2 cm.

<sup>100</sup> Using GPS & IMU for robot positioning, ROS Answers, <https://answers.ros.org/question/369833/>, consultado en marzo de 2025.

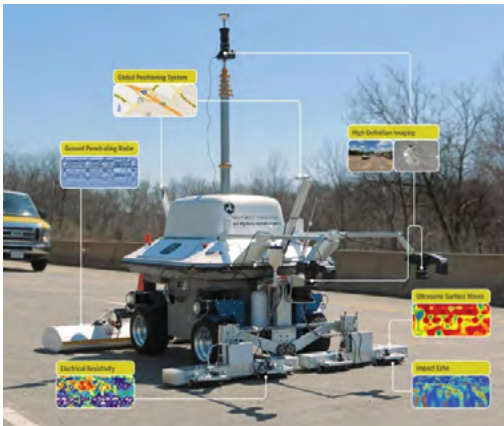
<sup>101</sup> Success Stories, Civ Robotics, <https://www.civrobotics.com/success-stories>, consultado en marzo de 2025.

## 4.2.6. Sensores para ensayos no destructivos

*Los sensores para los ensayos no destructivos juegan un papel importante para la detección, medición y análisis de las características de los materiales constructivos previniendo posibles fallos de las infraestructuras.*

Los ensayos no destructivos (NDT – *Non Destructive Testing*) es una técnica esencial en numerosas industrias, incluida la construcción, para garantizar la calidad de los materiales, componentes y estructuras. En general, los NDTs son menos exactos que los ensayos destructivos, pero garantizan la integridad de las piezas y pueden ser embarcados en sistemas móviles como robots. Se usan en la vigilancia de la salud estructural de las infraestructuras (*Structural Health Monitoring*)<sup>102</sup> para la monitorización a lo largo del tiempo, normalmente periódicamente, de los cambios en las propiedades de los materiales y las geometrías de las estructuras como puentes, túneles y edificios.

Son numerosos los sensores que existen para realizar los ensayos NDT: i) sensores de ultrasonidos (US), que utilizan ondas sonoras de alta frecuencia para detectar defectos tipo grietas en el hormigón o en soldaduras de tuberías, ii) sensores de campo magnético que detectan variaciones en el campo magnético y detectan grietas en la superficie y el subsuelo, como el Radar de Penetración Terrestre (GPR - *Ground Penetrating Radar*); iii) sensores termográficos que detectan variaciones de temperatura en la superficie de un material mediante tecnología infrarroja, recomendados para materiales compuestos, y iv) sensores de radiación tipo rayos X que penetran en el material, usados en infraestructuras críticas como centrales nucleares.



Robot RABIT equipado con múltiples sensores para inspección NDT de tableros de puentes (CAIT)<sup>103</sup>

El robot RABIT, del centro tecnológico norteamericano CAIT, permite hacer un análisis no destructivo de tableros de puentes y detectar grietas y otras anomalías antes de que aparezcan en la superficie. Está equipado con varios sensores para la navegación del robot, pero sobre todo con un GPR para detectar grietas sospechosas o caracterizar un deterioro aparente; un sensor de ondas ultrasónicas superficiales para evaluar la elasticidad de la resistencia de las losas de hormigón; un ecógrafo para caracterizar la delaminación de la calzada; y un sensor de resistividad eléctrica para diagnosticar el nivel corrosivo.

<sup>102</sup> ¿Qué es el SHM? Beneficios y Aplicaciones del Structural Health Monitoring, ITA, <https://www.ita.es/blog/que-es-el-shm-beneficios-y-aplicaciones-del-structural-health-monitoring>, consultado en abril de 2025.

<sup>103</sup> Center for Advanced Infrastructure and Transportation (CAIT), RABIT autonomous bridge deck inspection tool, <https://cait.rutgers.edu/facilities-equipment/rabit-autonomous-bridge-deck-inspection-tool>, consultado en abril de 2025.

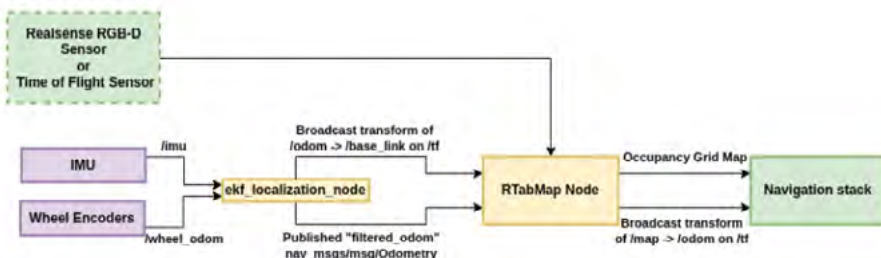
## 4.2.7. Integración de la información sensorial

*La integración sensorial en robótica es un proceso que optimiza los datos de diferentes sensores, lo que permite mejorar la precisión de las medidas, la construcción de mapas, la toma de decisiones y elimina los posibles errores.*

La Integración de la información sensorial, llamada también fusión de sensores (*sensor fusion*) es una de las tendencias actuales. Debido al abaratamiento de los sensores, los robots incorporan cada vez más sistemas de percepción cuya información hay que contrastar para reducir la incertidumbre de la observación. Se trata de mezclar, de manera inteligente, la información de diversos sensores tales como cámaras, LIDAR, IMU, ultrasonidos y odometría, para eliminar errores, filtrar, sincronizar y ajustar escalas de medida. Además, está el aspecto relativo a la compatibilidad de las interfaces y protocolos de los diferentes sensores, tema de gran complejidad (TCP/IP, USB, RS232, wi-fi, Bluetooth, etc.).

Los sensores pueden ser iguales, pero situados en diferentes posiciones del robot, o de diferente naturaleza. En ambos casos, deberían ser complementarios (excepto que se persiga la duplicidad). Por ejemplo, una cámara puede proporcionar imágenes de alta resolución, pero presentar dificultades con poca luz, mientras que el LIDAR ofrece información precisa de profundidad en cualquier condición, pero carece de detalles de textura. Con ello el robot contará con percepción más robusta y precisa.

Por otro lado, se puede distinguir entre fusión directa, fusión indirecta y fusión de las salidas de las dos anteriores. La fusión directa es la fusión de un conjunto de sensores heterogéneos u homogéneos, pero conociendo el histórico de datos, mientras que la fusión indirecta utiliza el conocimiento del entorno. Los datos de los sensores *a priori* no están preparados para la fusión por lo que deben ser unificados y tratados. Los algoritmos más usados incluyen filtros de Kalman (normalmente para sistemas lineales), filtros de partículas (para escenarios no lineales o probabilísticos) o redes bayesianas<sup>104</sup>. Los métodos más avanzados utilizan técnicas de IA basadas en modelos de aprendizaje automático (*Machine Learning*) para generar representaciones fusionadas.



Arquitectura a alto nivel de fusión de sensores (cámara, IMU, encoder) con ROS 2 (H. V. Singh y A. Parikh)

<sup>104</sup> De Jong Yeong et al., Sensor and Sensor Fusion Technology in Autonomous Vehicles: A Review, Sensors, vol. 21, 2021.

Dentro del entorno ROS (*Robot Operating System*), de libre distribución, existen diferentes herramientas para fusionar información sensorial<sup>105</sup>. Para la navegación de robots móviles con múltiples sensores se aconseja el uso de nodos tipo *robot\_localization* (estimador de la posición) y el *navigation\_stack* (envía al robot la posición recogida para la navegación). Es importante tener en cuenta que existen varios sistemas de coordenadas: mundo, robot, sensores.

## 4.2.8. Redes de sensores

**Una red de sensores es un sistema autónomo que trabaja de manera colaborativa para recopilar la información sensorial que se transmite a un nodo central con el objetivo de monitorizar parámetros físicos o ambientales.**

La idea es colocar numerosos sensores relativamente baratos para cubrir grandes áreas remotas o de difícil/peligroso acceso para constituir una red de comunicación para transmitir sus datos. Esta red normalmente se comunica de manera inalámbrica (WSN -*Wireless Sensor Networks*) ofreciendo un sistema flexible y fácil de instalar en grandes cantidades. Se monitorizan parámetros como temperatura, sonido, vibraciones, presión, movimiento o agentes contaminantes<sup>106</sup>. Una de las características más destacadas es su bajo consumo, ya que dota a los dispositivos de una gran autonomía (5-10 años). Algunos de los estándares más comunes de comunicación de las WSN son IEEE 802.15.4, *Bluetooth Low Energy* (BLE) y ZigBee.

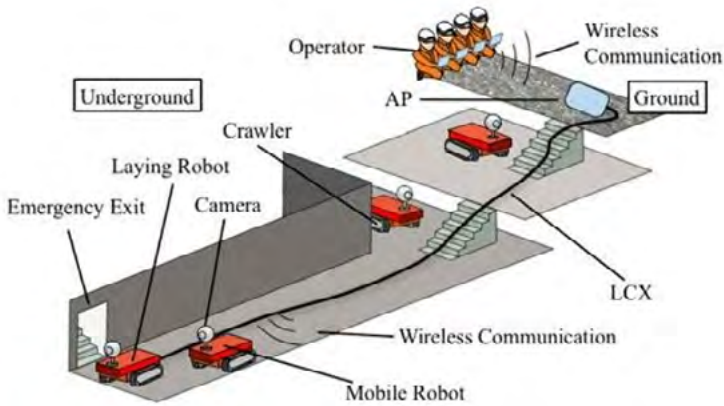
Las redes de sensores se consideran una de las tecnologías clave para implementar el Internet Industrial de las Cosas (IIoT - *Industrial Internet of Things*) ampliamente usado en la construcción bajo protocolos tipo MQTT. Presentan múltiples ventajas en aplicaciones como gestión de proyectos, operaciones en obra, seguridad y protección de los trabajadores, gestión de recursos, etc.

En la construcción y mantenimiento de carreteras esta tecnología se está usando para monitorizar los datos en tiempo-real sobre el estado del asfalto y la estructura subyacente<sup>107</sup>. Varias empresas, como la española Sensovant, han desarrollado sensores (sondas) capaces de detectar cambios en la composición química del asfalto, lo cual permite intervenciones preventivas. Además, informan de la temperatura (superficial y del aire), de la humedad y de otros datos meteorológicos (espesor de la película de agua, hielo o nieve) que permiten monitoreo las condiciones del pavimento para su integración en los Sistemas Inteligentes de Transporte (ITS - *Intelligent Transportation System*).

<sup>105</sup> Sensor Fusion with ROS, <https://github.com/methylDragon/ros-sensor-fusion-tutorial/blob/master/01%20-%20ROS%20and%20Sensor%20Fusion%20Tutorial.md>, consultado en marzo de 2025.

<sup>106</sup> Redes de sensores, <https://www.tekniker.es/es/redes-de-sensores>, consultado en abril de 2025.

<sup>107</sup> Akhilesh Pustkov, Role of Sensor Networks in Traffic Management and Monitoring: Challenges and Future Research Directions, EDUZONE Journal, vol. 11 (2), 2022.



Un sistema multirobot de recopilación de información en áreas de desastre subterránea utilizando una red de sensores LCX<sup>108</sup>

En zonas de desastres, donde las comunicaciones se cortan, los robots de rescate pueden constituir una red de sensores para la recopilación de la información del entorno (bajo protocolos IEEE802.11g). Los robots de intervención son teleoperados inalámbricamente usando las ondas de radio provenientes del LCX (*Leaky Coaxial cable*) que los propios robots instalan.

## 4.3. Control de robots

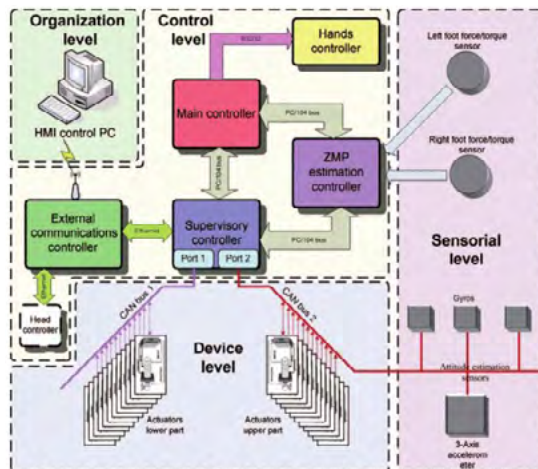
### 4.3.1. Arquitecturas de control

**La arquitectura de control es la columna vertebral de un robot y determina cómo los diferentes componentes del sistema, actuadores, sensores y controladores interactúan y funcionan conjuntamente para lograr los comportamientos deseados.**

La arquitectura de control, en esencia, es el marco organizativo que determina cómo se dividen y gestionan las tareas de control en un sistema. Al estructurar eficientemente las tareas y operaciones, la arquitectura de control influye significativamente en la capacidad general del sistema para adaptarse a los entornos y a las tareas dinámicos. Se pueden distinguir dos partes entrelazadas, la arquitectura *hardware*, que define la estructura de los componentes físicos del sistema con sus interconexiones, y la arquitectura *software*, que organiza los diferentes módulos de programación y su interrelación, al igual que las interfases con el usuario.

<sup>108</sup> Kei Sawai et al., Communication Disconnection Prevention System by Bandwidth Depression-Type Traffic Measurement in a Multi-Robot Environment using an LCX Network, Adv. Comp. Sc. & App. vol. 10 (7), 2019.

La arquitectura *hardware* se puede dividir en dos grupos, centralizada y descentralizada, lo que genera diferentes resultados de rendimiento y eficiencia. La arquitectura centralizada cuenta normalmente con una única unidad central para todo el sistema (normalmente una CPU central) lo que tiene la ventaja de que toda la información esta asequible en un solo procesador. El cuello de botella son las comunicaciones con todos los dispositivos (sensores, actuadores, controladores, etc.) accediendo continuamente al procesador central lo que aumenta la latencia del sistema. Hay que señalar que los controladores de robots son sistemas de tiempo-real estricto por lo que necesitan de una baja latencia (del orden de milisegundos). Por otro lado, la arquitectura descentralizada (normalmente jerárquica) implica tener varias unidades de control distribuidas por todo el sistema, cada una responsable de controlar partes o funcionalidades específicas. Las comunicaciones entre procesadores se efectúan mediante protocolos del tipo bus de campo (por ejemplo, CAN Bus). La ventaja de esta arquitectura es que al encargarse cada procesador de su tarea (navegación, visión, manipulación, etc.) la latencia del sistema es muy baja aumentando la eficacia global.



Arquitectura hardware distribuida del humanoide Rh1 con varios controladores y dos buses (UC3M)<sup>109</sup>

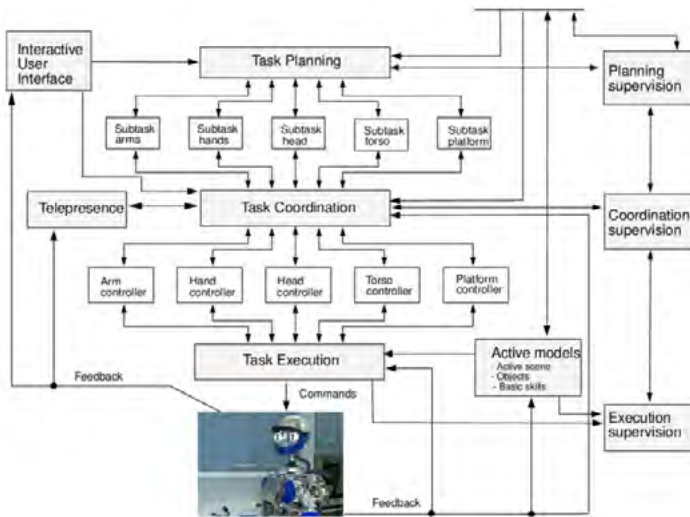
Los elementos más importantes de la arquitectura *hardware* son los actuadores (motores), sensores (*encoders*, acelerómetros, fuerza/par, etc.), controladores de ejes, el sistema de comunicación y la interfase física human-robot. Los controladores de ejes cuentan con algoritmos de control tipo PID (Proporcional-Derivativo-Integral) que ofrecen movimiento rápidos y suaves. Por otro lado, el procesador central normalmente se encarga del control de trayectorias y de la navegación que requiere, entre otros, transformaciones cinemáticas.

La arquitectura *software* de un robot está compuesta normalmente por tres niveles: i) alto nivel para decisiones estratégicas como la planificación de tareas y el desarrollo de habilidades, ii) nivel intermedio (*middleware*) que facilita la comunicación y la integración entre diferentes componentes software (incluido la planificación de movimiento), denominado también "pegamento de software", y iii) bajo nivel para el control de elementos básicos como los actuadores (motores), sensores, comunicaciones, interfases, etc. que normalmente vienen encapsuladas en los controladores de bajo nivel.

<sup>109</sup> Mario Arbulu et al., The Rh-1 full-size humanoid robot: Design, walking pattern generation and control, Applied Bionics and Biomechanics, vol. 6, num. 3-4, 2009.

El *middleware* más usado actualmente en robótica es ROS (*Robot Operating System*)<sup>110</sup>, entorno de código abierto, que proporciona múltiples bibliotecas, herramientas y convenciones para desarrollar y ejecutar software de robots. Cuenta con una gran comunidad activa y un amplio soporte para diversos robots. Su diseño modular permite la ejecución y gestión de datos encapsulados en nodos. La comunicación entre nodos se realiza mediante técnicas de paso de mensajes o a través de memoria compartida. El sistema funciona tanto con la metodología de publicador/suscriptor, para la comunicación asíncrona como la de cliente/servidor para la ejecución sincronizada. ROS admite una gran variedad de lenguajes de programación e incluye tanto la infraestructura de las interfases de comunicación como las herramientas para el empaquetado, desarrollo e implementación de *software*. Actualmente se está introduciendo ROS 2, una nueva versión de ROS, que aborda algunas de las limitaciones ROS, como la escalabilidad, el rendimiento y la compatibilidad multiplataforma.

ROS, a pesar de su nombre, no es realmente un sistema operativo, es un *middleware*, y necesita de un sistema operativo de la máquina que gestione bien el tiempo-real y que sea también de libre distribución. Lo más extendido es que se instale sobre Ubuntu<sup>111</sup>, una distribución de Linux, que se ejecuta en computadores de oficina hasta la nube y todos los dispositivos conectados a Internet.



Arquitectura software jerárquica de alto nivel para la planificación, coordinación y ejecución de tareas del humanoide ARMAR III (KIT)<sup>112</sup>

La capa de alto nivel está normalmente compuesta por varios módulos tipo: i) planificación de tareas (*task planning*), por ejemplo, coger un objeto o navegar a un destino, responsable de la programación de tareas y la gestión de recursos y habilidades, ii) coordinación de tareas/acciones secuenciales/paralelas (*task coordination*) con el fin de lograr el objetivo de la tarea y iii) ejecución de tareas (*task execution*) mediante los comandos sensoriomotrices concretos.

<sup>110</sup> ROS – Robot Operating System, <https://www.ros.org>, consultado en marzo de 2025.

<sup>111</sup> Ubuntu, <https://ubuntu.com/community/governance/debian>, consultado en marzo de 2025.

<sup>112</sup> Tamim Asfour et al., ARMAR-III: An Integrated Humanoid Platform for Sensory-Motor Control, IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots, Genova, Italy, 2006.

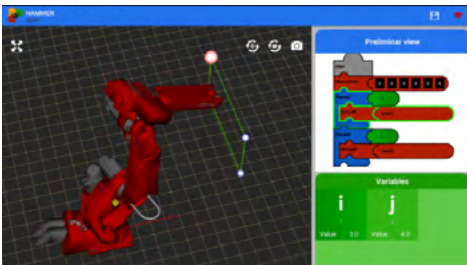
### 4.3.2. Programación de robots

*La programación de robots es el proceso de escritura de programas de computador que permiten a un robot percibir su entorno, hacer planes, tomar decisiones y ejecutar tareas tanto de movimiento como de interacción.*

La programación de robots, a diferencia de la arquitectura de control que define la estructura de los controladores, es la acción de convertir la idea de la aplicación en un conjunto de comandos codificados que permiten el movimiento del robot<sup>113</sup>. Se pueden distinguir dos tipos de lenguajes de programación de robots: i) los propietarios, que son cerrados y ii) los no-propietarios, que usan lenguajes abiertos de propósito general.

Son varios los lenguajes propietarios pertenecientes a los principales fabricantes de robots: ABB (lenguaje RAPID), KUKA (KRL), Universal Robots (URScript), etc. Los lenguajes propietarios cuentan con funciones específicas para un sistema robótico, como *mov* (moverse a una posición), *frame* (sistema de coordenadas), *gripper* (pinza), etc. También incluyen funciones de la programación de propósito general (control de flujo de programa, sentencias condicionales, etc.).

La programación no propietaria de robots cuenta con la ventaja de que está abierta y se puede adaptar a cualquier robot, tarea y entorno. Los lenguajes más usados son C/C++ o Python apoyados por librerías de ROS o de desarrollo colaborativo. C++ es un lenguaje de propósito general orientado a objetos que se distingue por ser eficiente y rápido utilizado principalmente para aplicaciones en tiempo-real. Mientras, Python es más simple y está pensado para aplicaciones con datos e IA. Esto puede suponer una notable barrera para su uso ya que dificulta el acceso a la robótica en determinadas empresas que no disponen de personal con alta cualificación de programación.



Interfase de programación intuitiva en tableta táctil (UPM)<sup>114</sup>

Por otro lado, se puede distinguir dos métodos de programación de robots: a) en línea, que se realiza programando los movimientos directamente en el robot moviéndolo desde la paleta, denominado también guiado por demostración y b) fuera de línea, apropiada para sistemas de producción en masa y realizada sin mover el robot mediante en el uso de simuladores. Este último método necesita de un modelo CAD 3D del entorno, el propio robot y de los objetos a manejar.

Otra forma de programación, para reducir la dificultad del proceso, es el desarrollo de interfases avanzadas que suelen usar tabletas táctiles. En estos sistemas se puede programar el robot de forma muy sencilla e intuitiva simplemente deslizando bloques disponibles en una librería para construir un programa que puede probarse y simularse *in situ*.

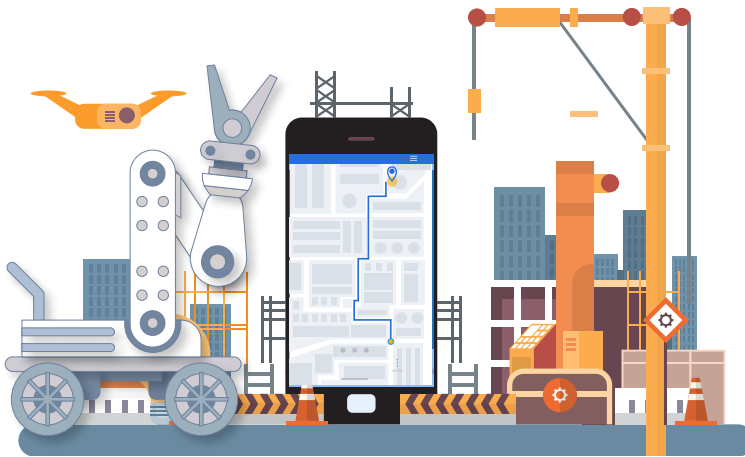
<sup>113</sup> Antonio Barrientos et al., Fundamentos de Robótica, 2ª Edición, McGraw Hill, 2007.

<sup>114</sup> Alberto Brunete et al., User-friendly task level programming based on an online walk-through teaching approach, Industrial Robot: An International Journal, vol. 43, nº, 2, 2016.

### 4.3.3. Navegación de robots

*La navegación de robots define su habilidad de conocer su posición/orientación, construir mapas de su entorno y moverse de manera segura desde un punto inicial a otro final.*

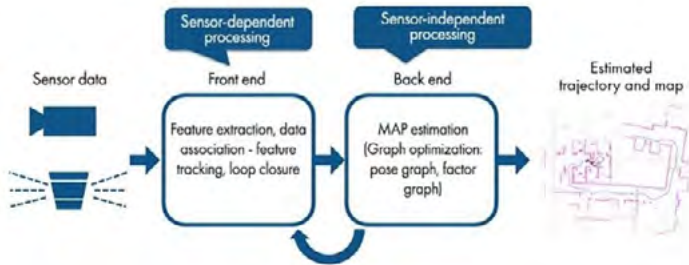
La navegación de robots se refiere a su capacidad de moverse autónomamente en el entorno para cumplir la tarea asignada, por ejemplo, moverse desde el punto A al punto B, evitando obstáculos y trayendo al punto A el objeto C que se encuentra en B. La navegación se usa para robots con base móvil, UAV, UUV, etc. En este proceso se pueden distinguir tres partes fundamentales: i) localización, el robot debe conocer donde se encuentra respecto a un sistema de coordenadas que normalmente se denomina el mundo de referencia fija, ii) construcción del mapa, que define el entorno de la navegación, tanto con medidas geométricas (mapa geométrico) como de organización del entorno (mapa semántico) y de relación simplificada de objetos, similar a un mapa del metro (mapa topológico), y iii) navegación, que es el proceso de movimiento del robot de un punto a otro en el mapa generado.



En el caso de que el entorno no se conozca *a priori*, el algoritmo más extendido de navegación de robots móviles es el SLAM (*Simultaneous Localization and Mapping*) que, como su nombre indica, fusiona la información sensorial para localizar la posición actual del robot en el entorno y, simultáneamente, genera y ajusta el mapa de manera incremental. De esta manera, se consigue una navegación robusta, una mejor detección de objetos y una buena adaptabilidad en entornos dinámicos. SLAM es un algoritmo probabilístico cuyo objetivo es disminuir (optimizar) las incertidumbres de los robots al empezar a navegar en entornos desconocidos y/o rápidamente cambiantes<sup>115</sup>. Para esa optimización se usa la formulación bayesiana, que calcula la probabilidad

<sup>115</sup> Cesar Cadena et al., "Past, Present, and Future of Simultaneous Localization and Mapping: Toward the Robust-Perception Age." IEEE Transactions on Robotics, 32(6), 2016.

de un evento teniendo en cuenta la probabilidad de eventos previamente observados. La implementación práctica de esta formulación se basa en el filtro de Kalman, algoritmo recursivo que estima con cierta probabilidad los estados actuales de la navegación ( $k$ ) condicionados a los datos recogidos hasta ese instante ( $k-1$ ).



*Front-end y back-end de un sistema SLAM con realimentación para una continua mejora de la localización del robot y de su mapa (MATLAB)<sup>116</sup>*

La estructura de un sistema SLAM incluye dos componentes principales: el *front-end* y el *back-end*. El *front-end* abstrae los datos de los diferentes sensores con los que cuenta el robot (*sensor data*) en modelos que permiten la estimación, mientras que el *back-end* realiza inferencias a partir de los datos extraídos y genera la estimación del mapa para que el robot pueda navegar seguro en el entorno. Este proceso es recursivo disminuyendo en cada paso la incertidumbre de la navegación.

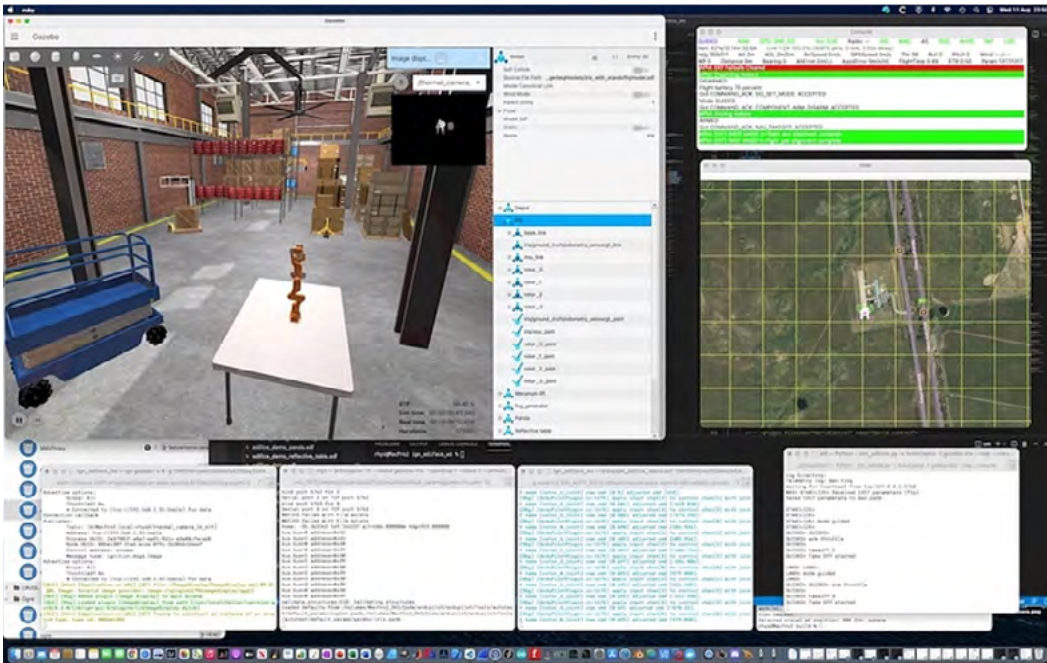
#### 4.3.4. Simuladores de robots

**Un simulador de robots es una herramienta software que permite diseñar, ejecutar y verificar los programas desarrollados en entornos virtuales de trabajo sin depender del robot físico.**

Un simulador de robots generalmente consta de varios módulos: i) un módulo físico que simula los movimientos e interacciones del robot con el entorno, ii) un módulo de modelado del entorno 3D, iii) un componente de visualización que renderiza el entorno virtual y el robot y iv) un módulo de programación y ejecución que incluye herramientas de depuración, ajuste, control de colisiones, navegación, etc. Se utiliza para depurar los programas y comportamientos del robot antes de ser ejecutados en el robot real. Usar simuladores tiene muchos beneficios, entre los que se pueden destacar: a) desarrollo más seguro de las aplicaciones robóticas sin usar el robot físico y, por tanto, sin posibles daños, b) desarrollo más rápido al poder usar el proceso de prueba y error de manera controlada y con iteraciones muy rápidas y c) pruebas en diferentes entornos virtuales desde los más simples a los más complejos.

<sup>116</sup> Introducción a SLAM, <https://es.mathworks.com/discovery/slam.html>, consultado en abril de 2025.

Son numerosos los simuladores existentes. Se puede mencionar los simuladores propietarios como RobotStudio de ABB y KUKA.Sim de KUKA, ambos son a la vez una herramienta de simulación y programación fuera de línea de sus robots, ofreciendo una excelente conectividad. Por otro lado, están los simuladores no propietarios que pueden ser usados con cualquier robot en donde destacan Gazebo, de código abierto, muy bien integrado con ROS y ofrece servicios en la nube; Webots, de fácil uso que facilita la emulación precisa de interacciones y comportamientos complejos; y OpenRAVE, que se centra en el análisis de información cinemática y geométrica relacionada con la planificación de movimiento. Todos ellos tienen como lenguajes principales de programación C/C++ o Python y ofrecen la documentación necesaria para las API (*Application Programming Interface*) que permite que diferentes aplicaciones se comuniquen y compartan datos con los simuladores.



*Simulador de un almacén de construcción con un robot móvil y un manipulador (Gazebo)<sup>117</sup>*

Isaac Sim de NVIDIA<sup>118</sup> presenta un nuevo enfoque de simuladores de robots que hace que aprendan mientras se ejecutan las simulaciones. De esta manera el simulador se utiliza para el entrenamiento inicial del modelo de IA y, posteriormente, para validar todo el conjunto de software. Además, permite generar datos sintéticos para entrenar y ajustar los modelos básicos de robots.

<sup>117</sup> Simulate before you build, Gazebo, <https://gazebosim.org>, consultado en abril de 2025.

<sup>118</sup> What Is Robotics Simulation?, NVIDIA, <https://blogs.nvidia.com/blog/what-is-robotics-simulation>, consultado en abril de 2025.

### 4.3.5. Interacción humano-robot

*La interacción humano-robot es una rama interdisciplinar de la robótica que busca comprender, diseñar y evaluar la interacción entre robots y humanos orientada a la cooperación, colaboración y coexistencia entre ambos.*

La interacción humano-robot (HRI – *Human-Robot Interaction*), a diferencia de la interacción humano-computador, se refiere a una interacción física, lo que hace que la premisa fundamental de esta interacción sea la seguridad. La primera ley de Asimov, siendo ciencia ficción, se puede adoptar sin ninguna duda a la robótica moderna, “el robot no hará daño a un ser humano”. Este es precisamente el concepto de los *cobots*, que teniendo una interacción física directa humano-robot, están controlando en todo momento las variables físicas (fuerza, velocidad, etc.) para no hacer daño a los operarios.

HRI distingue entre dos términos importantes: i) seguridad (*safety*) que refiere a los posibles daños que el robot puede causar en su entorno (incluidos los humanos), y ii) protección (*security*) que busca garantizar que el entorno no interfiera con su funcionamiento<sup>119</sup>. Ambos conceptos deben ser implementados en la robótica, sobre todo en el sector de la construcción, que maneja altas cargas en entornos no estructurados. A estos aspectos hay que añadir actualmente la ciberseguridad de los robots que debe contar con todas las medidas necesarias contra intrusión.

Hay dos conceptos relacionados con la HRI general que merece la pena repasar. HRC (*Human-Robot Collaboration*) que hace de la interacción una tarea colaborativa, por ejemplo, la instalación de la fachada muro cortina se realiza conjuntamente entre el robot y un operario<sup>120</sup>; y GUI (*Graphical User Interface*) que se refiere a la interfase intuitiva que permite a los operarios programar y controlar los robots mediante texto, gestos, movimientos de *joy-sticks*, comandos de voz, miradas u otro tipo de interfases multimodales. En cualquier caso, la HRI debe ser “consciente” del contexto en el que se está operando, teniendo en cuenta el entorno (mediante su modelado), el comportamiento del operario humano (a través de sus acciones) y del robot (conociendo su funcionamiento).



<sup>119</sup> Laura Alzola Kirschgens et al., Robot hazards: from safety to security, Whitepaper, <https://arxiv.org/abs/1806.06681v4>, 2021.

<sup>120</sup> Ming Zhang et al., Human-robot collaboration for on-site construction, *Automation in Construction*, vol. 150, 2023.



*Colaboración Humano-Robot en la construcción de estructuras de madera (World Economic Forum/ETH)*

Investigadores del ETH de Zúrich han desarrollado un nuevo método de construcción colaborativa de estructuras de madera (casas completas)<sup>121</sup>. Un robot ayuda a manipular las vigas mientras un segundo robot perfora los agujeros necesarios para conectar las vigas, todo ello en cooperación con el operador.

#### 4.3.6. Robots autónomos vs teleoperados

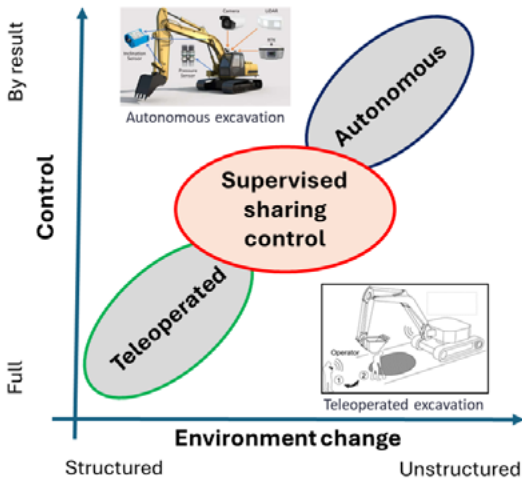
***Un robot autónomo opera independientemente tomando decisiones basadas en sensores, algoritmos de control y toma de decisión mientras un robot teleoperado es controlados de forma remota por un operador humano.***

El sueño de cualquier desarrollador de robótica es que su sistema sea autónomo e inteligente. No obstante, esto no siempre es posible e incluso no siempre es necesario. Son varias, y en algunos aspectos no coincidentes, las definiciones de un robot autónomo, sobre todo con la reciente explosión de la IA. En cualquier caso, sus características básicas deben incluir: i) la habilidad de modelar, reconocer y operar en su entorno a pesar de los posibles cambios o condiciones inciertas (a través de su sistema de percepción), y ii) tomar las decisiones necesarias para cumplir con la tarea encomendada y, si es posible, justificar esas decisiones (a través de su sistema de aprendizaje IA). Todo ello, sin intervención humana. Müller lo define como “un sistema que, de forma sistemática y sin intervención externa, logra sus objetivos establecidos a pesar de condiciones ambientales inciertas”<sup>122</sup>.

Por otro lado, un robot teleoperado se distingue por tener una HMI-GUI avanzada (si es posible multimodal), un conocimiento del entorno (lo más completo posible) y un operador experto que sepa manejar el robot. En obra, donde el entorno es muy variable y desconocido (desestructurado), lo normal es que se usen sistemas y robots teleoperados que responden mejor a las necesidades constructivas. Pueden ser operados remotamente y su nivel de robustez es muy alto. Un tema importante que hay que cuidar en el caso de teleoperación a gran distancia es el retardo (y la asincronicidad) de las señales, que depende de la calidad de las comunicaciones.

<sup>121</sup> Human and robot collaboration is evolving timber construction, World Economic Forum, 2018.

<sup>122</sup> Manuel Müller et al., Industrial autonomous systems: a survey on definitions, characteristics and abilities, Automatisierungstechnik vol. 69(1), 2021.



Actuales sistemas autónomos vs teleoperados en excavación (UC3M)<sup>123</sup>

No obstante, los principales fabricantes de robots y de maquinaria de construcción, incorporan niveles intermedios que permiten combinar algunas operaciones totalmente autónomas (por ejemplo, el repliegue de la pala de una excavadora) con operaciones teleoperadas con un gran nivel de ayudas (por ejemplo, excavación con control de fuerza sobre el terreno en tiempo-real). Esto permite un control compartido supervisado (*supervised sharing control*) con el operario en el bucle de control (*man-in-the-loop*). Este concepto es empleado por la empresa americana Caterpillar para sus volquetes/cargadores teleoperados remotamente para aplicaciones como demolición y limpieza.

### 4.3.7. Integración con sistemas BIM y GIS

**La robótica juega un papel fundamental en la digitalización de la construcción, impulsada por las metodologías BIM y GIS, que permite la creación y gestión de modelos digitales integrando información de diferente naturaleza.**

BIM (*Building Information Modelling*) es una metodología de trabajo colaborativa que permite la gestión digital de proyectos de construcción a lo largo de todo su ciclo de vida. Se basa en la creación y el uso de modelos digitales 3D inteligentes que contienen información geométrica y datos asociados<sup>124</sup>. El uso de BIM supone una serie de beneficios patentes en el sector de la construcción: una mejor planificación y diseño de la construcción, una reducción de errores y costes detectando interferencias y conflictos, un aumento de la eficiencia y productividad optimizando los flujos de trabajo y una mejora de la gestión del ciclo de vida del edificio.

<sup>123</sup> Carlos Balaguer, Robotics for transportation and urban infrastructures, Project Delivery Capability Program, Hong Kong, 2022.

<sup>124</sup> Rafael Sacks et al., BIM Handbook: A Guide to Building Information Modeling for Owners, Designers, Engineers, Contractors, and Facility Managers, John Wiley & Sons, 2018.

Por otro lado, GIS (*Geographic Information System*) es un conjunto de herramientas capaz de integrar, almacenar, editar, analizar, compartir y mostrar la información geográficamente referenciada. Permite tratar esa información por capas (relieve, red fluvial, carreteras, etc.), lo que facilita el análisis<sup>125</sup>. Es fácilmente integrable en sistemas CAD 3D, utiliza imágenes realistas, se integra fácilmente con BIM y está basado en datos (*data driven*) en donde cada elemento del mapa contiene un amplio conjunto de datos.

La integración de la información BIM y GIS en robótica, bien conjuntamente o bien por separado, está revolucionando el sector. En prefabricación, BIM proporciona modelos digitales detallados que los robots utilizan para fabricar partes con precisión. En los procesos de construcción los drones pueden usar datos BIM y GIS para monitorizar el progreso de la obra y realizar inspecciones de seguridad. En demoliciones, se pueden planificar los movimientos de los robots basados en modelos GIS optimizando la seguridad. Durante la fase de mantenimiento, los robots pueden realizar inspecciones y mantenimiento predictivo usando modelos BIM en edificios e infraestructuras.



*Robot móvil autónomo recopila datos de obra y los integra en modelo BIM (BIMprove, Robotnik)*

Un ejemplo destacado es el proyecto europeo BIMprove<sup>126</sup>, uno de cuyos objetivos es el desarrollo de un robot móvil autónomo que navega por la obra equipado con un escáner láser ultrarrápido que toma imágenes esféricas a partir de las cuales se recopila la información geométrica interior y exterior. Con la ayuda de la herramienta BIMsync esta información se vuelca en el modelo BIM donde se procesa para verificar la calidad de la obra.

<sup>125</sup> GIS for Construction, <https://storymaps.arcgis.com/stories/841032ad04624a44a426aaf24677007b>, consultado en abril de 2025.

<sup>126</sup> BIMPROVE, Robotnik, <https://robotnik.eu/es/projects/bimprove>, consultado en abril de 2025.

## 4.4. Automatización de la construcción

### 4.4.1. Robotización de la maquinaria

**La robotización de la maquinaria de construcción tiene por objetivo incorporar las nuevas tecnologías de automatización e IA a los equipos para transformarlos en sistemas robóticos.**

La robotización de la maquinaria en construcción está transformando profundamente el sector, impulsada por la convergencia de la automatización avanzada, la digitalización, la IA y la sostenibilidad. La incorporación de maquinaria robotizada en las obras no solo busca aumentar la eficiencia operativa, sino también mejorar la seguridad, reducir el impacto ambiental y optimizar la planificación y ejecución de proyectos. El sector ha comenzado a adoptar una nueva generación de maquinaria robotizada (grúas, excavadoras, compactadoras, etc.) con capacidades crecientes de inteligencia<sup>127</sup>.

La tendencia es incidir en la: i) asistencia al operador (por ejemplo, control asistido de la cuchara de las excavadoras), ii) automatización parcia (compactadoras que ajustan la presión según el terreno, pero siguen guiadas por el operador), iii) autonomía supervisada (niveladoras de terreno automáticas con la supervisión del operador) y iv) autonomía total (cargadores con ruedas para carga y descarga autónoma de material). La introducción de técnicas de IA permite niveles de autonomía más altos con modelos cognitivos, capaces de entender el entorno y adaptar su comportamiento con experiencias anteriores (*Machine Learning*). Estas tendencias plantean desafíos como la integración con procesos tradicionales, la interoperabilidad, la aceptación de operarios mientras reduce costes y tiempos de ejecución, aumento de la seguridad laboral<sup>128</sup>.



<sup>127</sup> Genki Yamauchi et al., Proposal of an Open Platform for Autonomous Construction Machinery Development, ISARC'2023, Chennai, India, 2023.

<sup>128</sup> Songbo Hu et al., A practicality and safety-oriented approach for path planning in crane lifts, Automation in Construction, vol. 127, 2021.



*Interfase del controlador de una excavadora inteligente equipada con múltiples sensores y guiado semiautónomo (Topcon)*

La empresa japonesa Topcon ha desarrollado varias aplicaciones de guiado inteligente de maquinaria pesada de obra civil. Destaca su sistema de control 3D-MC<sup>129</sup>, que está diseñado para excavación, nivelación, evacuación, transporte y otras actividades que requieren alto nivel de precisión. Está equipado con sensores IMU, GNSS, encoders, temperatura, sonido, láser, presión, etc. y una interfase GUI que elimina la subjetividad de los ajustes y procesos manuales.

#### 4.4.2. Fabricación aditiva

*La fabricación aditiva, también conocida como impresión 3D, se basa en la creación de objetos capa por capa a partir de modelos digitales, lo que permite una alta precisión, complejidad geométrica y optimización en el uso de materiales.*

La fabricación aditiva en el ámbito de la construcción permite construir estructuras (edificios, naves, almacenes) con gran precisión, reduciendo tiempos de producción, minimizando residuos y ofreciendo nuevas formas de arquitectura antes imposibles. Además, la robotización de este proceso reduce la dependencia de la mano de obra intensiva y mejora la seguridad. La construcción se puede realizar tanto fuera de obra, en fábricas especializadas (*off-site*), como directamente en obra transportando el sistema constructivo (*on-site*).

La fabricación aditiva en construcción abarca una variedad de materiales adaptados a diferentes necesidades estructurales, estéticas y funcionales. Para materiales basados en agregados (hormigón y mortero) usando las tecnologías de extrusión de material<sup>130</sup> (la más comúnmente utilizada con proyección de capas de hormigón de 1 cm) y de cama de partículas (un agente aglutinante se encarga de unir las partículas). Para materiales metálicos se usan las tecnologías de fusión de lecho de polvo (un láser funde selectivamente partículas metálicas capa por capa) y de depósito directo de energía (un rayo de energía crea un baño fundido en la superficie). Finalmente, para polímeros se usa la tecnología de deposición fundida (extrusión por termoplástico fundido).

<sup>129</sup> Control de maquinaria 3D-MC para movimientos de tierra y construcción de carreteras, Topcon, <https://www.topconpositioning.com/es/es/solutions/technology/infrastructure-software-and-services/3d-mc-platform>, consultado en abril de 2025.

<sup>130</sup> Jean-Francois Caron et al., Reinvent reinforced concrete with robotics and 3D printing, International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC 2024), Lille, France, 2024.

Varios proyectos han demostrado el potencial de la fabricación aditiva en la construcción: un puente impreso para bicicletas de la Universidad Técnica de Eindhoven de hormigón reforzado con cables, un edificio de oficinas en Dubái de la empresa china WinSun que fue impreso en solo 17 días y la DFAB House en la ETH Zurich que incorpora la fabricación aditiva para componentes estructurales.



*Casa impresa con EvoConstructor basado en un robot pórtico e impresión de hormigón 3D (Evocons)<sup>131</sup>*

La empresa española EVOCONS ha desarrollado un robot multifuncional que permite mediante la fabricación aditiva, la IA y la robótica la construcción tanto *in situ* como por procedimientos de prefabricados la construcción de edificios con materiales sostenibles (mortero y hormigón). El sistema de pórtico robótico de 6 Grados de Libertad (GDL) con una elevación de hasta 40 m y kit de herramientas robotizadas permite la fabricación aditiva, alicatado de paredes, nivelación de superficies horizontales, hormigonado de elementos estructurales, entre otras.

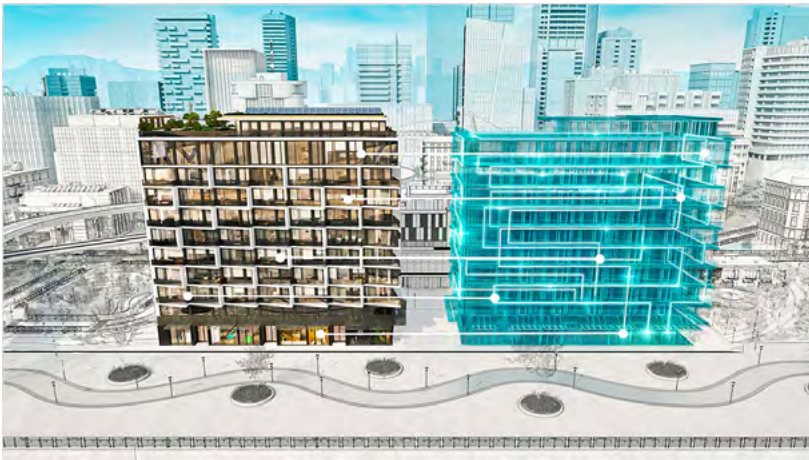
#### 4.4.3. Gemelo Digital

***Un gemelo digital es una representación virtual dinámica de un edificio, infraestructura o sistema de construcción que se actualiza en tiempo-real con datos de sensores, modelos BIM y otras fuentes.***

Un Gemelo Digital (*Digital Twin*) permite mantener un flujo dinámico de información de forma que combina los mundos virtuales y físicos, permitiendo el análisis de datos y la supervisión de sistemas. La aplicación del Gemelo Digital a la construcción se centra en la monitorización y optimización en tiempo-real de los procesos constructivos mediante la información sensorial (a través del IoT), y los modelos BIM con IA mediante modelos semánticos (datos conceptuales). Se diferencia del concepto BIM, cuyo objetivo es fundamentalmente el modelado y la planificación, porque permite monitorizar una construcción a lo largo de todo su ciclo de vida.

<sup>131</sup> Sistema de construcción digital y sostenible a través de la construcción 5.0: Impresión 3D, Robótica, IA, <https://evocons.es/investigacion-desarrollo-innovacion>, consultado en abril de 2025.

Los Gemelos Digitales pueden aplicarse en la fase de diseño y simulación permitiendo probar distintos escenarios antes de la construcción. En la fase de explotación y mantenimiento es posible, usando redes de sensores evaluar el estado estructural y ambiental de la construcción y detectar de forma temprana problemas en los diferentes sistemas de esta. Con ello se puede hacer un mantenimiento predictivo, identificando fallos antes de que ocurran. Los Gemelos Digitales también se aplican en la gestión energética y sostenibilidad de la construcción optimizando el consumo energético basado en datos en tiempo-real y reduciendo las emisiones de carbono. De esta forma se contribuye a alcanzar los objetivos NZEB (*Nearly-Zero Energy Building*) impulsados por la Comisión Europea<sup>132</sup>.



*Gemelo Digital evaluando diferentes escenarios del impacto en el cambio de diseño (Autodesk)*<sup>133</sup>

Son muchos los ejemplos de uso real de los gemelos digitales en la construcción. Entre las implementaciones más conocidas está la Ciudad Inteligente de Singapur (Singapur Smart City) que implementa Gemelos Digitales para la planificación y operación de la ciudad, el Gemelo Digital del Aeropuerto de Heathrow para monitorizar las estructuras del aeropuerto y gestionar las operaciones de forma eficiente, o el Proyecto *Hudson Yards* en Nueva York, que utiliza Gemelos Digitales para optimizar la energía y gestión de los edificios. La empresa norteamericana Autodesk, creadora de software de diseño CAD, implementa Gemelos Digitales para probar escenarios hipotéticos como cambios de diseño, interrupciones climáticas y eventos de seguridad.

<sup>132</sup> Kepa Iturralde et al., Deviation-Correcting Interface for Building-Envelope Renovation, *Buildings*, vol. 13, no. 9, 2023.

<sup>133</sup> Digital Twins in Construction, Engineering & Architecture, <https://www.autodesk.com/design-make/emerging-tech/digital-twin/architecture-engineering-construction>, consultado en abril de 2025.

#### 4.4.4. Realidad Virtual y Aumentada

*La Realidad Virtual (RV) es una tecnología que permite crear entornos virtuales e inmersivos que el usuario percibe como si fueran reales mientras la Realidad Aumentada (RA) superpone información digital sintética sobre entornos físicos.*

Son varios los conceptos que se agrupan bajo el paraguas de los entornos virtuales: i) RV no-inmersiva, se ejecuta en pantallas de computadores y no aísla al usuario del mundo real dado que la interacción con el entorno virtual es mediante dispositivos tradicionales, ii) RV inmersiva, sumerge al usuario en un entorno virtual, aislándolo del mundo físico, mediante el uso de gafas, guantes o trajes hápticos, iii) RA, permite añadir capas de información visual sobre el mundo real que nos rodea y iv) RV mixta, combina elementos del mundo real y del virtual para crear un nuevo entorno donde objetos físicos y digitales coexisten e interactúan entre sí en tiempo-real, ayudando a teleoperar robots<sup>134</sup>.

La RV y RA permiten una experiencia inmersiva del usuario al “estar” en el mundo virtual/físico y navegar por él. Se emparejan muy bien con BIM y Gemelo Digital. La sinergia BIM y RV conlleva varios beneficios como la visualización de manera inmersiva de un proyecto antes de empezar su construcción, contextualizar el proyecto “caminando” por él y por su entorno, detectar de forma temprana errores de diseño, etc. Para el Gemelo Digital la RV permite optimizar el diseño con información virtual y real de los sensores, ayudar al mantenimiento de maquinaria al poder los técnicos visualizar componentes internos de los equipos, entrenar a los empleados etc.

La programación de los sistemas de RV/RA requiere una arquitectura de varios niveles. Por un lado, necesitamos modelos 3D creados previamente en sistemas CAD (por ejemplo, edificios). Después necesitamos la tecnología de los dispositivos visualizadores, las gafas de RV más populares son Quest de Meta (antes Oculus), Vive de HTC o Valve de Index. Además, ofrecen mandos que permiten interacciones naturales con las manos. Finalmente, están los entornos de desarrollo de RV que permiten construir de manera flexible la inmersión como Unity de propósito general, Ludus para seguridad en construcción o Unreal pensado para juegos.



*Sistema de Realidad Aumentada de una estación de depuración de aguas residuales (Acciona)*

Un buen ejemplo del uso de RV/RA es la aplicación en las plantas de gestión de aguas desarrollada por Acciona<sup>135</sup>. Se trata de facilitar a los operarios varias tareas como el mantenimiento, la formación segura y el funcionamiento eficiente de las plantas. Además, han creado Gemelos Digitales con RV para estas plantas que permiten acceder a los datos de sus activos.

<sup>134</sup> Sumit Badotra et al., Handbook of Augmented and Virtual Reality, De Gruyter, 2023.

<sup>135</sup> Lo real y lo virtual se alían en la gestión del agua, <https://experience.acciona.com/es/innovacion/real-virtual-alian-procesos-gestion-agua>, consultado en abril de 2025.

#### 4.4.5. Redes de telecomunicación

*Las redes de telecomunicación en la construcción permiten un control eficiente de las flotas de robots y maquinaria en obra, así como una rápida transmisión de datos de los sensores para la toma de decisión.*



La capacidad de las modernas redes de comunicación como la 5G permite bajas latencias de comunicación (<10 ms), alta capacidad de transmisión (10 GB/s), alta confiabilidad, alta densidad de usuarios conectados y un uso sin interferencias, lo que las hace muy apropiadas para entornos de la construcción. No obstante, el uso de redes públicas 5G no ofrece garantías por ser de acceso general, compartidas y no asegurar una latencia constante. Por ello, las redes 5G privadas son aconsejables en el sector de la construcción dado que ofrecen mayor control, seguridad, personalización para las empresas y despliegue en cualquier obra/taller.

Un ejemplo de este despliegue en taller es el piloto desarrollado por las empresas españolas ASTI y 5TONIC<sup>136</sup> para gestionar una red de robots móviles AGV. La implementación de la red privada 5G en IMDEA Networks para 5 robots ha demostrado que los algoritmos de control y gestión de los AGV se pueden ejecutar en la nube (tanto *Cloud* como *Edge*) descargando sus procesadores de actividades con gran computo. De esta manera, se tiene centralizada en la nube toda la información sobre la producción y el estado de los robots que permite hacer un mantenimiento predictivo para anticipar fallos y paradas innecesarias.

<sup>136</sup>La tecnología 5G aplicada a los AGVs de ASTI Mobile Robotics, <https://networks.imdea.org/es/la-tecnologia-5g-aplicada-a-los-agvs-de-asti-mobile-robotics>, consultado en abril de 2025.



*Red privada 5G desplegada en el área piloto de obra civil (Target-X, Construction Robotics/RWTH)*

El despliegue de una red privada 5G, tanto en obra civil al aire libre como en obra subterránea, presenta gran interés. Como ejemplo, el proyecto europeo TARGET-X<sup>137</sup> ha desarrollado dos demostradores en Alemania, uno al aire libre y otro en una mina de sal. En el primer caso, se ha demostrado la importancia de la antena omnidireccional de doble polarización, que se ha situado en la grúa, para dar buena cobertura en un área de 4.000 m<sup>2</sup>. Además de la antena, se instalaron cables radiantes para proporcionar una cobertura continua en espacios de trabajo. La velocidad de la red ha sido 74 Mbits/s en subida de datos y 810 Mbits/s para la descarga. En el escenario subterráneo, a una profundidad de 650-750 m y una longitud de los ramales de más de 1 km, la red de radio 5G apoyada por un cable radiante ha permitido unas velocidades de 353 Mbits/s en subida y 73 Mbits/s en descarga.

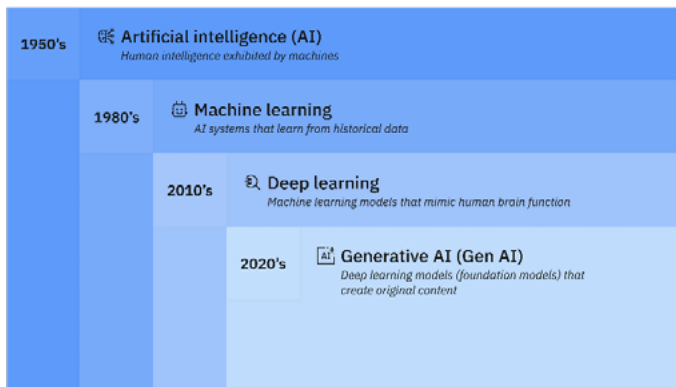
<sup>137</sup> Johannes Josef Emontsbetz, The Application of 5G Networks on Construction Sites and in Underground Mines: Successful Outcomes from Field Trials, WONS'2024, Chamonix, France, 2024.

# 5. INTELIGENCIA ARTIFICIAL, DATOS Y ROBÓTICA

## 5.1. Inteligencia Artificial

*La inteligencia artificial es una tecnología que permite que los sistemas computacionales simulen el aprendizaje, la comprensión, la resolución de problemas, la toma de decisiones y la autonomía humana.*

Los últimos avances de la Inteligencia Artificial (IA, o AI por sus siglas en inglés) están revolucionando todos los niveles de la sociedad y de los sectores económicos. Han evolucionado de los laboratorios al uso público en donde herramientas como ChatGPT, DALL-E, Gemini, Claude o Grok se usan ya de forma masiva y a diario. Permiten un rápido resumen de la información, facilitan la creación de contenidos y la automatización de tareas repetitivas. Los diferentes modelos de AI pueden generar y transformar múltiple información como voz-a-texto (por ejemplo, para entender el lenguaje natural), texto-a-texto (para la traducción), texto-a-imagen (para visualizaciones), etc. No obstante, hay que tener en cuenta que estas herramientas se basan en métodos estadísticos por lo que sus resultados no siempre son fiables y que, en general, tienen un conocimiento limitado del contexto lo que puede dar lugar a resultados irrelevantes o fuera de la temática.



*Evolución, relación y definiciones de los diferentes campos de la IA (IBM)<sup>138</sup>*

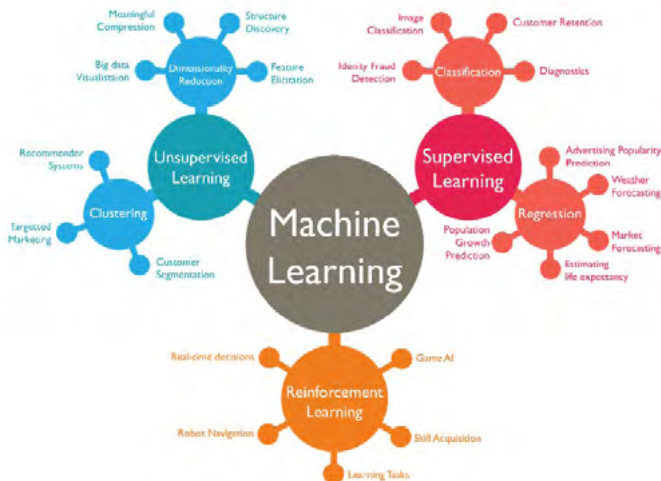
La IA se puede estudiar en base a diferentes niveles de especialización: i) IA genérica, que abarca cualquier método que permita que un computador exhiba un comportamiento inteligente equivalente al de un humano (Test de Turing), ii) Aprendizaje de Máquina (ML – *Machine Learning*),

<sup>138</sup> What is artificial intelligence (AI)?, IBM, <https://www.ibm.com/think/topics/artificial-intelligence>, consultado en abril de 2025.

que se centra en que la IA se realice a través del aprendizaje de datos, iii) Aprendizaje Profundo (DL - *Deep Learning*), un subconjunto del ML que usa redes neuronales artificiales multicapa, y iv) IA Generativa (GAI - *Generative AI*), que se enfoca en emplear estas técnicas para la creación de nuevos contenidos.

Una de las herramientas más potentes para los sistemas de aprendizaje son las redes neuronales artificiales (ANN - *Artificial Neural Network*), que procesan datos de una manera similar a como lo hace nuestro cerebro. La disposición de las ANN en diferentes disposiciones se conoce como modelo para la aplicación que se quiere resolver. Cada neurona artificial de la red se configura como un nodo (núcleo de la neurona) con  $n$  entradas  $x_i$  al nodo con sus respectivos pesos ( $w_i$ , dendritas) y una salida del nodo ( $y$ , axón). Su implementación computacional es muy fácil (en su versión simplificada),  $y = \sum_{i=1}^n x_i * w_i$ , lo que permite crear capas de neuronas interconectadas, teniendo en ML normalmente tres capas (entrada, oculta y salida) y en DL múltiples capas<sup>139</sup>.

Según la aplicación, podemos escoger diferentes disposiciones de ANN y con ello sus correspondientes algoritmos. Para esta elección, una de las mejores clasificaciones proviene de los inicios del ML y agrupa los problemas de aprendizaje en tres grandes grupos: supervisado, no supervisado y por refuerzo<sup>140</sup>. En el primer caso, el aprendizaje supervisado está diseñado para aprender con muestra de datos de manera "supervisada" por humanos, es como tener un maestro que proporciona siempre ejemplos correctos. Cada ejemplo consiste en una entrada (un texto, una imagen, etc.) con su salida (una categoría, un valor, etc.) correspondiente. Se suelen usar en los problemas de clasificación (clasificación de imágenes, identificación de fraude, correo spam, etc.) y regresión (pronóstico del mercado, pronóstico del tiempo, etc.).



Principales tipos de Machine Learning (Medium)

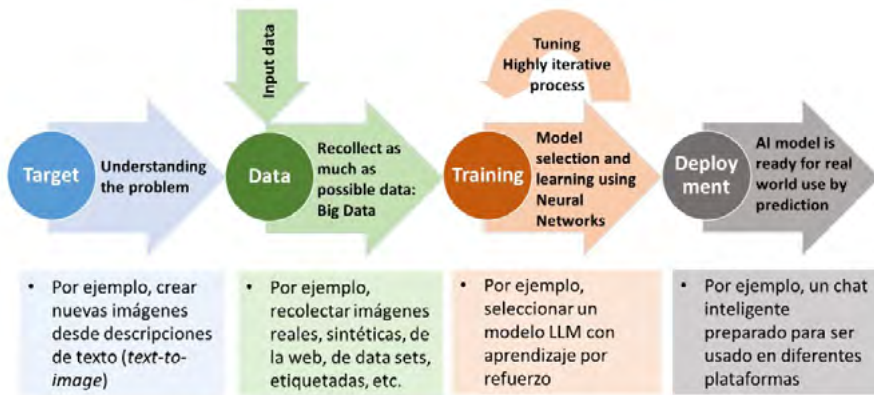
<sup>139</sup> ¿Qué es una red neuronal?, AWS, Amazon, <https://aws.amazon.com/es/what-is/neural-network>, consultado en abril de 2025.

<sup>140</sup> Introduction to Machine Learning, Medium, <https://medium.com/geekculture/introduction-to-machine-learning-428a630417dd>, consultado en abril de 2025.

El aprendizaje no supervisado se caracteriza por que se le pasan únicamente datos de entrada (textos, imágenes, etc.) sin supervisión. Algunas de las aplicaciones más comunes son descubrir grupos de muestras similares dentro de los datos (lo que se suele llamar agrupación de datos o *clustering*) o determinar cómo se distribuyen los datos en el espacio (se conoce como estimación de densidad). Entre los ejemplos de *clustering* están los sistemas de recomendación, segmentación de clientes, etc., mientras que en el otro grupo se encuentran aplicaciones de reducción de dimensionalidad (normalmente *Big Data*), búsqueda de asociaciones, etc.

Finalmente, el aprendizaje por refuerzo se refiere a problemas donde a cada ejemplo (entrada y salida) se acompaña de un valor de recompensa (*reward*) que pondera su bondad o maldad. Esto permite la implementación de algoritmos interactivos en bucle cerrado que optimizan el resultado del proceso como si se tratase de un juego de prueba y error. Los algoritmos para aprendizaje por refuerzo se suelen utilizar en procesos de toma de decisión en tiempo-real, aprendizaje de tareas, juegos, etc.

El proceso completo de modelo de IA basado en redes neuronales ANN consta, en su versión simplificada, de cuatro pasos: i) Objetivo, que pretende entender el problema a resolver, ii) Datos, que recopila y etiqueta los datos necesarios, iii) Aprendizaje, proceso iterativo que utiliza técnicas tipo ML o DL, y iv) Despliegue, ajuste y encapsulado en una aplicación. En general, los modelos más potentes emplearán más parámetros (los pesos de la ANN), y por tanto necesitarán más datos para el aprendizaje y mayor potencia computacional. El artículo escrito por Vaswani et al.<sup>141</sup> en 2017 introdujo la arquitectura *Transformer*, se trata del modelo más popular en la actualidad por su potencia. Se creó para aplicaciones de generación de texto (en este ámbito, conocido como LLM - *Large Language Model*), y consta de millones de parámetros. Actualmente se ha expandido para generación de imágenes, video, sonido o estructuras multimodales.



Descripción general (simplificada) del modelo de aprendizaje automático<sup>142</sup>

<sup>141</sup> Ashish Vaswani et al., Attention Is All You Need, Conference on Neural Information Processing Systems (NIPS'2017), Long Beach, CA, USA.

<sup>142</sup> Carlos Balaguer, Ventajas y problemas de la IA aplicada, Jornada "El valor del Análisis de Inteligencia en la era de la IA", EDIH, 2025.

La introducción de la arquitectura *Transformer* permitió una eficaz y eficiente implementación de los LLMs para las tareas de procesamiento de lenguaje natural. Cuenta con el mecanismo de atención (por ejemplo, de palabras claves en una frase) que optimiza su comprensión. Esto allanó el camino para el desarrollo de modelos avanzados como GPT (de OpenAI) y Gemini (de Google). La versión más conocida de estas implementaciones es el *chatbot* ChatGPT desarrollado por la empresa estadounidense OpenAI y lanzado en 2022. Su versión más avanzada (a día de hoy) es el ChatGPT-5 que usa *Transformers* generativos pre-entrenados como un ejemplo del aprendizaje no supervisado<sup>143</sup>.

Para finalizar este apartado vamos a introducir algunos términos que se suelen utilizar:

- ♦ **Token**<sup>144</sup>, es una pequeña unidad de datos (como una ficha) que proviene de desglosar fragmentos más grandes de información. Cuanto más rápido se puedan procesar los tokens, más rápido podrán aprender y responder los modelos. Se trata de una decisión de diseño. Por ejemplo, la palabra anglosajona *darkness* (oscuridad) puede ser tomada como un solo token, dividida como dos tokens como *dark* (oscuro) y *ness* (-idad), o tomada como 8 tokens (uno por cada letra).
- ♦ **Prompt**<sup>145</sup>, es una instrucción de texto que describe la tarea que queremos que la IA realice. Ello da lugar a la ingeniería del *prompt* que estructura el proceso de pregunta a un chatbot de IA para tener mejores resultados. Por ejemplo, si se pide al ChatGPT que “escriba un resumen para un análisis de *marketing*” lo más probable es que la respuesta sea que la petición es vaga y se necesita más datos.
- ♦ **Explicabilidad**<sup>146</sup>. Un algoritmo de IA es explicable cuando se puede interpretar y entender cómo ha obtenido sus predicciones. Esto es importante debido a que los datos con los que se realiza el aprendizaje pueden contener sesgos estadísticamente relevantes y/o información no verificada. Estas características indeseables pueden quedar escondidas entre los millones de parámetros de que se componen los grandes modelos de IA. Existen herramientas que permiten, por ejemplo, identificar las variables más influyentes en la toma de decisiones de los modelos.

<sup>143</sup> Descubre GPT-4.5, <https://openai.com/es-ES/index/introducing-gpt-4-5>, consultado en junio de 2025.

<sup>144A<sup>n</sup></sup> Introduction to Large Language Models: Prompt Engineering and P-Tuning <https://developer.nvidia.com/blog/an-introduction-to-large-language-models-prompt-engineering-and-p-tuning>, consultado en julio de 2025.

<sup>145</sup> What Is Prompt Engineering? Definition and Examples, Coursera, <https://www.coursera.org/articles/what-is-prompt-engineering>, consultado en julio de 2025.

<sup>146</sup> ¿Qué es la explicabilidad de la inteligencia artificial? Cómo quitarle misterio a la tecnología, BBVA, <https://www.bbva.com/es/innovacion/que-es-la-explicabilidad-de-la-ia-como-quitarle-misterio-a-la-tecnologia>, consultado en julio de 2025.

## 5.2. Los datos

*Los datos representan en la ingeniería un importante papel para optimizar procesos, reducir costes y mejorar la seguridad a través de análisis de la información proveniente de diversas fuentes.*

Hablar de la IA es hablar de datos. Sin datos no se pueden implementar sistemas de aprendizaje ni de toma de decisión. Cuando se habla de datos hay que distinguir entre tres grandes áreas: a) *ingeniería de datos*, que se encarga de la infraestructura de adquisición, almacenamiento y procesamiento de los datos, b) *ciencia de datos*, que consiste en el desarrollo de modelos, patrones de comportamiento y algoritmos de predicción, y c) *análisis de datos*, consistente en los procedimientos de examinar estadísticamente los datos para extraer conclusiones o tomar de decisiones. La frontera entre estas áreas no siempre está clara y muchas veces el trabajo es colaborativo, aunque las habilidades pueden ser muy distintas requiriéndose conocimientos de matemática, estadística, algorítmica, informática, telemática, electrónica y negocios.



*Relación entre la ingeniería de datos, ciencia de datos y análisis de datos (CodeSquadz)*

La popularidad de los datos en esta década ha sido posible al nuevo concepto de *Big Data* (Datos masivos) que ha permitido adoptar problemas antes no resolubles. *Big Data* "engloba conjuntos extremadamente grandes y diversos de datos estructurados, sin estructurar y semiestructurados que siguen creciendo exponencialmente a lo largo del tiempo. Estos conjuntos de datos son tan enormes y complejos que los sistemas de gestión de datos tradicionales no pueden almacenarlos, procesarlos ni analizarlos"<sup>147</sup>.

¿Cómo de grande es al *Big Data*? Es difícil conocer el dato exacto, está en un constante aumento, pero según la consultora estadounidense de mercados tecnológicos IDC<sup>148</sup> la predicción de su volumen para 2025 es del orden de 163 Zettabytes (un Zetabyte -Zb- es equivalente a  $10^{21}$  bytes). Además, se confirma que su crecimiento es exponencial y su distribución global, creando el

<sup>147</sup> ¿Qué es Big Data?, <https://cloud.google.com/learn/what-is-big-data>, consultado en julio de 2025.

<sup>148</sup> David Reinsel et al., Data Age 2025: The Evolution of Data to Life-Critical, International Data Corporation (IDC), 2017.

concepto de "global datasphere" que dificulta jurídicamente su gestión y control. No obstante, el volumen de datos que puede ser analizado es del orden de 100 veces menor (1,45Zb en 2025), lo que crea un gran problema de datos "basura" que no se utilizan, pero sí requieren de almacenamiento y mantenimiento.

De hecho, la cantidad de datos es tan grande y las necesidades de su procesamiento tan acuciante que las principales empresas de datos (Google, Amazon, Microsoft, IBM) se enfrentan, entre otros, a múltiples problemas: i) seguridad de los datos sensibles, tanto técnicos como financieros, sobre todo de aquellos que están en la nube, ii) consumo energético, que se estima que es del 1 % de la electricidad mundial<sup>149</sup> con un fuerte impacto medioambiental, iii) calidad de los datos para que sean confiable (*trustworthy data*) dado que la mayoría de los datos son no-estructurados, inconsistentes, incompletos y, en definitiva, inservibles; y iv) falta de comprensión de muchos de los datos, las empresas no entienden bien sus propios datos quedando estos inutilizados.

| VOLUME  | VARIETY   | VELOCITY  | VERACITY  | VALUE   | VARIABILITY   |
|---|---|---|---|---|---|
| The amount of data from myriad sources.   | The types of data: structured, semi-structured, unstructured.                     | The speed at which big data is generated.   | The degree to which big data can be trusted.                                      | The business value of the data collected.   | The ways in which the big data can be used and formatted.                           |
|  |  |  |  |  |  |

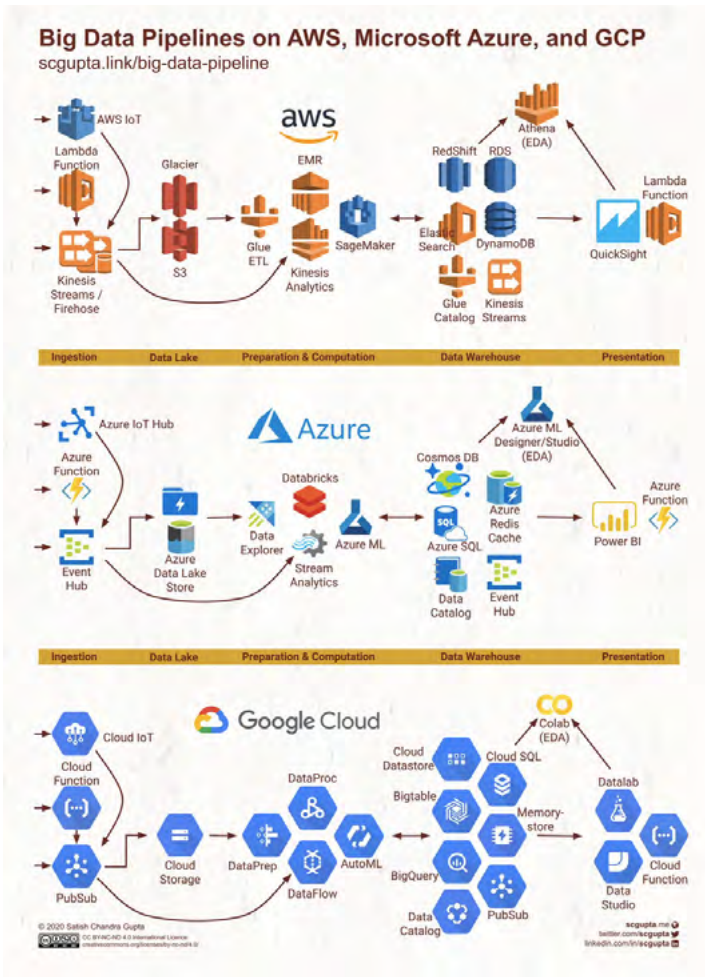
Las seis "Vs" del Big Data (Medium)

*Big Data* se llama "grande" no solo por su volumen sino también por su complejidad. Las seis principales características del *Big Data*, denominadas también las seis "Vs"<sup>150</sup>, son: 1) *volumen*, gran cantidad de datos tienen la procedencia en una gran variedad de dispositivos y fuentes, muchos de ellos con valores ininteligibles; 2) *variedad*, los tipos de datos son muy dispares (estructurados, semiestructurados y no-estructurados) lo que hace difícil su clasificación y análisis; 3) *velocidad*, se refiere a la gran velocidad a la que se generan, recopilan y procesan los datos, muchas veces con requerimientos de tiempo-real; 4) *veracidad*, no siempre está clara la calidad, consistencia, precisión y credibilidad de los datos recopilados; 5) *valor*, los datos no están normalizados con lo que no siempre se pueden comparar directamente; y 6) *variabilidad*, debido a que el significado de los datos cambia continuamente lo que conlleva que los datos deben comprenderse a fondo antes de operar con ellos. Además, hay que diferenciar entre Bases de Datos, que se usan típicamente para datos altamente estructurados, y *datasets*, no siempre estructurados y orientados al aprendizaje de IA. También hay que distinguir entre Bases de Datos relacionales y no-relacionales, en donde las primeras primero estructuran los datos y después lo almacenan, y las segundas actúan al revés.

<sup>149</sup> Centros de datos: Central de la Digitalización y Potencial de eficiencia energética, Copenhagen Center of Energy Efficiency, 2020.

<sup>150</sup> Melekunur Yazlamaz, Big Data: What it is and Why it is important?, Medium, 2023.

Uno de los importantes problemas prácticos es dónde y cómo se almacena el *Big Data*. Son básicamente tres los métodos: almacenamiento local, en los centros de datos (CPD) con localización conocida, almacenamiento en la nube como entorno virtual sin localización clara, y sistema híbrido CPD-nube. Respecto a la nube existen a su vez tres modelos: pública (más caras pero pensada para datos confidenciales), privada (más baratas, pero menos segura) e híbrida. Los principales proveedores del almacenamiento en la nube, que normalmente incluyen varios servicios como red, servidores, visualización (infraestructura como servicio - IAAS), son: AWS (Amazon), Microsoft Azure, Google Cloud, mientras las principales empresas que ofrecen servicios de análisis de datos, entre otras muchas, son SAS (para soluciones *end-to-end*), Cloudera (basada en software libre Apache Hadoop), IBM Cloud (muy orientada a la IA).



Pipelines de AWS, MS Azure, Google Cloud (Satish Chandra)<sup>151</sup>

<sup>151</sup> Satish Chandra Gupta, Scalable efficient Big Data pipeline architecture: Architecture for high-throughput low-latency Big Data pipeline on cloud, 2020 (actualizado en 2025), <https://www.ml4devs.com/en/articles/scalable-efficient-big-data-analytics-machine-learning-pipeline-architecture-on-cloud/>, consultado en septiembre de 2025.

En la práctica, los conjuntos de software que se emplean dentro de cada ecosistema proporcionado por un proveedor pueden ser complejos y sofisticados. Esto dificulta la migración entre un proveedor y otro, por lo que se recomienda buscar un compromiso entre los servicios prestados, la dificultad de uso y los costes asociados. No obstante, las diferentes arquitectura de gestión de datos (*pipeline*) cuentan con fases muy parejas: i) captura de datos de fuentes externas o internas, ii) ingesta de datos a través de valor por lotes o continuamente, iii) almacenamiento de datos creando estructuras de tipo “lagos” (*data lakes*) o almacenes (*data warehouses*), iv) computo de datos mediante analítica de datos y/o *Machine Learning*, y v) uso de datos a través de las distintas aplicaciones.

### 5.3. IA, Datos y Robótica aplicados a la construcción

***La irrupción de la Inteligencia Artificial, el Big Data y la Robótica están transformando la industria de la construcción aportando más eficacia, menos riesgos laborales y nuevas aplicaciones innovadoras.***

Consciente del gran impacto de la IA la Comisión Europea lanzó en 2021 la Asociación ADRA (IA, Datos y Robótica)<sup>152</sup> como un partenariado público-privado que define la complementariedad e interconexión profunda de estos tres campos para el desarrollo tecnológico. “Al tender puentes entre disciplinas, así como entre investigación, innovación e implementación, la asociación ADRA reducirá la fragmentación del panorama europeo y contribuirá a establecer un ecosistema sostenible que logre un impacto global y estimule la creación de valor”. ADRA define que la robótica debe centrarse en el impacto en sectores específicos como, entre otros, la construcción.

Las aplicaciones en el sector de la construcción son numerosas y van en aumento desde la planificación a la ejecución y demolición de infraestructuras, todas ellas basadas en IA y datos. Aunque los actuales sistemas de IA no están orientados a ser empleados con sistemas físicos en interacción directa con los humanos y su entorno (*embodiment*) los últimos avances son muy prometedores. De hecho, la tendencia es la adaptación de los modelos tipo LLM (*Large Language Model*) a los comportamientos físicos de robots creando nuevos modelos como el LBM (*Large Behaviors Models*). Los LBMs se generan entrenando con una gran cantidad de tareas robóticas en entornos físicos (algunos de ellos creados sintéticamente) lo que lleva la generación de grandes modelos pre-entrenados de comportamientos de robots. A finales de 2024 las empresas Boston Dynamics y *Toyota Research Institute* (TRI) sellaron un acuerdo de colaboración para la implementación de estos nuevos LBMs<sup>153</sup>.

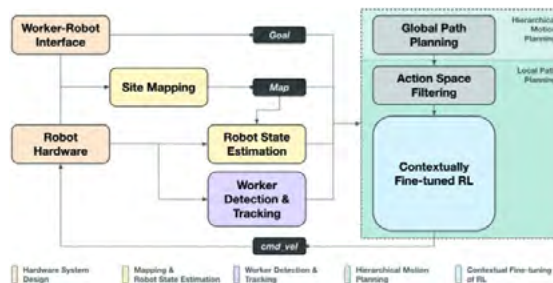
<sup>152</sup> ADRA, <https://adr-association.eu>, consultado en abril de 2025.

<sup>153</sup> Boston Dynamics and Toyota Research Team Up on Robots, IEEE Spectrum, October 2024.

Son múltiples las aplicaciones de la IA, Datos, Robótica en el sector de la construcción. A continuación, presentaremos una serie de trabajos recientes relacionados con la temática. Hay que destacar que son trabajos pioneros publicados en los últimos años en las revistas y congresos internacionales de mayor prestigio en el área de robótica y automatización como:

- ♦ **Revistas:** *AI in Civil Engineering (Springer Nature)*, *Automation in Construction (Elsevier)*, *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering (Wiley)*, *Construction Robotics (Springer)*, *Journal of Computing in Civil Engineering (ASCE)*, *Transactions on Robotics (IEEE)*.
- ♦ **Congresos:** *IAARC International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC)*, *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, *ISER International Conference on Construction Robotics and Management (ICCRM)*.

En edificación, una de las tendencias es el desarrollo de robots móviles compañeros de los operarios (*work companion rover*) que les asisten en tareas simples (transporte de material, herramientas) permitiendo concentrarse a los humanos en las más complejas. Este tipo de colaboración humano-robot se realiza con técnicas de navegación social con aprendizaje por refuerzo (*Reinforcement Learning - RL*) que se adapta a la contextualización de la tarea. Los investigadores de la *Carnegie Mellon University* en Estados Unidos han desarrollado un sistema de asistencia en los trabajos de carpintería usando un modelo impulsado por RL, inicialmente entrenado en simulación que después se refina con acciones reales en obra<sup>154</sup>. Otra aplicación representativa en el ámbito de la edificación es la seguridad de los operarios durante la interacción humano-robot. La *University of British Columbia* en Canadá ha implementado un sistema basado en aprendizaje por refuerzo profundo (*Deep Reinforcement Learning - DRL*) añadiéndole el control biomimético con seguridad restringida, inspirado en los sistemas de toma de decisiones de vertebrados<sup>155</sup>. De esta manera, la predicción de las colisiones humano-robot se implementan con las leyes (*policias*) que permite respuestas rápidas a los estímulos ambientales y prioriza la seguridad. Los resultados experimentales muestran que el método propuesto logra una tasa de colisión del 0 % en entornos de obra convencional.

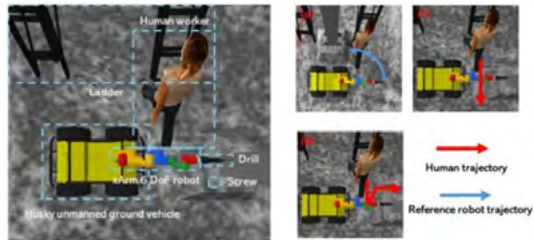


La arquitectura de control de un robot móvil compañero en tareas de carpintería con RL contextual (Carnegie Mellon University)

<sup>154</sup> Yuning Wu et al., Towards Human-Centered Construction Robotics: A Reinforcement Learning-Driven Companion Robot for Contextually Assisting Carpentry Workers, IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS, 2024), Abu Dhabi (UAE), 2024.

<sup>155</sup> Safety-constrained Deep Reinforcement Learning control for human-robot collaboration in construction, *Automation in Construction*, vol. 174, 106130, 2025.

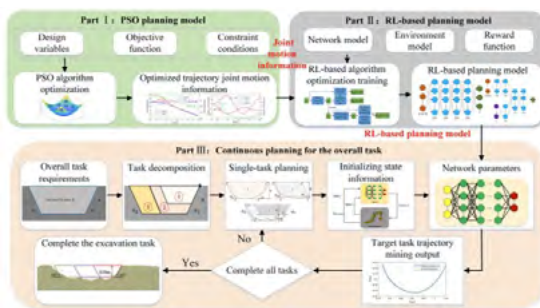
En obra civil destacan los nuevos controles inteligentes para la maquinaria que permiten aumentar la productividad y calidad de los trabajos conjuntamente con una mejor seguridad para los operarios. Para el control preciso de las trayectorias de apertura de zanjas con excavadoras se empiezan a utilizar técnicas de aprendizaje por refuerzo (RL) que mejoran notablemente las prestaciones.



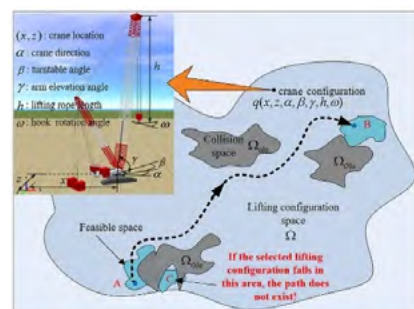
Evaluación de la seguridad de los operarios en obra civil en la interacción humano-robot con DRL (University of British Columbia)

Los investigadores de varios centros de China (Jilin University, Xi'an Aerospace, Taiyuan University of Technology), con la financiación de la National Natural Science Foundation of China (NNSFC), han desarrollado un sistema mixto que combina RL con la optimización por enjambres de partículas (particle swarm optimization - PSO) que permite una planificación continua de las trayectorias de las excavadoras<sup>156</sup>. Los resultados han demostrado la bondad de la metodología con una tasa de excavación del 92 % y un ciclo de aprendizaje de 0,1 seg.

En la misma línea el control de las grúas es objeto de mejora con técnicas de IA. Los investigadores de la Dalian Ocean University en China han desarrollado un algoritmo para el control de las trayectorias de una grúa móvil<sup>157</sup>. Está basado en un sistema de aprendizaje automático fuera de línea denominado Learning-based Optimal Configuration sampler (LOC-Sample) que permite determinar las trayectorias de movimiento de la grúa y de las operaciones de cogida y dejada de objetos teniendo en cuenta la posición de los obstáculos en la superficie. El proceso se lleva a cabo a través de una gran cantidad de tareas de levantamiento simuladas que permite entrenar una red neuronal U-Net. Posteriormente se usa ese modelo para generar la trayectoria real de la grúa mejorando de esta manera las tasas de éxito de la planificación de rutas en un 74 %.



Sistema de control de excavación continua con aprendizaje por refuerzo y optimización por enjambre de partículas (NNSFC)

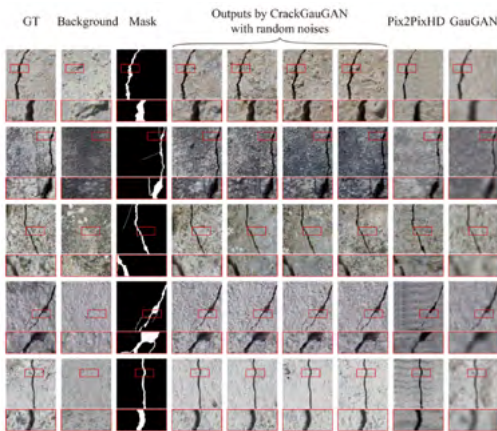


Cálculo de trayectorias de una grúa móvil en entornos con obstáculos utilizando redes neuronales (Dalian Ocean University)

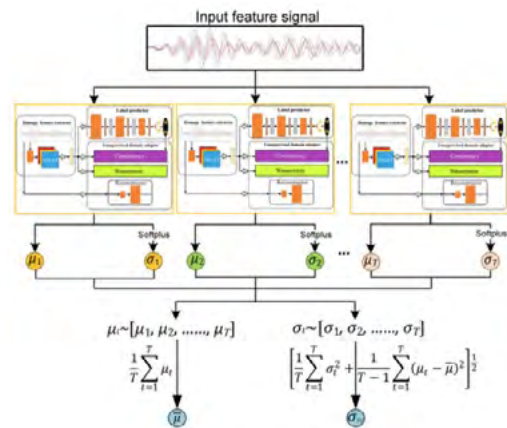
<sup>156</sup> X Tan et al., Reinforcement learning-based trajectory planning for continuous digging of excavator working devices in trenching tasks, Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 2025.

<sup>157</sup> Yuanshan Lin et al., Learning-based picking and placing configuration sampler for mobile crane lift path planning, Journal of Computing in Civil Engineering, vol. 39, nº 3, 2025.

En el área de inspección y mantenimiento las aplicaciones de la IA son especialmente numerosas. En la inspección superficial se pueden citar varios trabajos recientes como, por ejemplo, el proyecto europeo D-HYDROFLEX (en curso) de inspección automática de grietas en hormigón mediante procesamiento inteligente de imágenes procedentes de robots terrestres y UAV utilizando un generador sintético de grietas realistas (con ruido de hasta 80 %) y un sistema de segmentación de imágenes mediante *Deep Learning*<sup>158</sup> que obtuvo un resultado muy bueno de  $22.61 \pm 0.52$  en escala Fréchet (FID), métrica de la calidad de las imágenes creadas por un modelo generativo de IA. Otra interesante aplicación de la IA en este campo es la cuantificación automática de pérdida de espesor de tuberías metálicas submarinas debido a la corrosión. Los datos se obtienen mediante sensores de ultrasonidos embarcados en robots submarinos y se utiliza la técnica de aprendizaje de transferencia no supervisado de conjunto profundo (*deep-ensemble unsupervised transfer-learning - DE-UTL*) que emplea *transformers* con ponderación adaptativa y extracción de características de múltiples escalas integrada con un adaptador de dominio de distancia de Wasserstein (medida de la distancia entre dos distribuciones de probabilidad). Los investigadores de la Universidad Católica de Lovaina (*KU Leuven*) han obtenido buenos resultados con esta técnica con muestras de corrosión acelerada<sup>159</sup>.



Resultado comparativo del análisis de imágenes de grietas en hormigón con Deep Learning (D-HYDROFLEX)

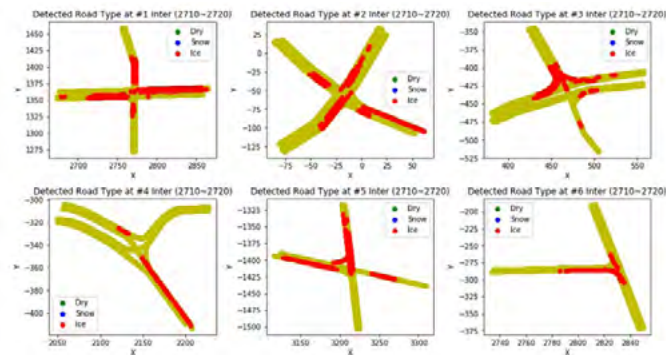


Arquitectura de transferencia de aprendizaje para la detección del espesor de tuberías metálicas mediante ultrasonidos (KU Leuven)

<sup>158</sup> Honghu Chu et al., CrackGauGAN: Semantic layout-based crack image synthesis for automated crack segmentation, International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC'2024), Lille (France), 2024.

<sup>159</sup> Houyu Lu et al., Uncertainty-quantified unsupervised transfer learning for ultrasonic-based corrosion detection in underwater steel pipes, Automation in Construction, vol. 178, 2025.

El uso de la IA y la ciencia de datos en el transporte autónomo está en auge. Por ejemplo, los investigadores de la Universidad de Cleveland en Estados Unidos han desarrollado un modelo para la monitorización de las condiciones del pavimento (seco, nevado y helado) y detectar carreteras resbaladizas en tiempo-real. El algoritmo de clasificación adoptado usa técnicas de memoria a largo-corto plazo (*Long Short-Term Memory - LSTM*) basada en una red neuronal recurrente artificial (*Recurrent Neural Network - RNN*)<sup>160</sup>. El sistema ha logrado una precisión de predicción del 100 %, 99 % y 98 % para pavimento seco, nevado y helado, respectivamente. Además, se observa que usando este algoritmo los accidentes potenciales pueden reducirse en más del 90 %. Otro tipo de aplicaciones se centra en el control y visualización del uso y eficiencia de los camiones en obra civil. El sistema Aquila, desarrollado por un consorcio de universidades del Reino Unido, permite tener un panel de visualización (*dashboard*) de una flota en tareas de movimiento de tierra. Está basado en Autodesk Forge Viewer, que permite acceder al desarrollo de un panel visual interactivo a través de cualquier navegador web e interactuar con los datos BIM del terreno y edificio<sup>161</sup>. De esta manera, se pueden fácilmente probar y evaluar diferentes motores de IA utilizando técnicas de Gemelo Digital.



Mapeo de las condiciones resbaladizas de los pavimentos en cada intersección de las carretas con LNN (University of Cleveland)



Panel de visualización y evaluación de flotas de camiones (Aquila – Universities of Northumbria, Cambridge, Newcastle)

<sup>160</sup> Jiajie Hu et al., Deep learning based on connected vehicles for icing pavement detection, AI in Civil Engineering, vol. 2, 2023.

<sup>161</sup> Kay Rogage et al., Beyond digital shadows: A Digital Twin for monitoring earthwork operation in large infrastructure projects, AI in Civil Engineering, vol. 1, nº 7, 2022.

A pesar de los claros beneficios que se han visto en los ejemplos analizados, la adopción de las tecnologías de IA, datos y robótica en los proyectos en construcción plantea varios desafíos que deberían ser superados en los próximos años:

- ♦ **Resistencia al cambio.** Es uno de los obstáculos principales, tradicionalmente la construcción ha tardado en adoptar nuevas tecnologías, a menudo debido a preocupaciones sobre la complejidad de la transición y la posible interrupción de los flujos de trabajo establecidos. Por ello, hay que impulsar cambios de mentalidad en las empresas y nuevos modelos empresariales.
- ♦ **Preparación del personal.** Es un desafío importante que se traduce actualmente en la dificultad de incorporar personal técnico preparado para la integración de herramientas de IA, datos, robots. Las empresas deberían garantizar que los empleados estén capacitados para el empleo de estas herramientas.
- ♦ **Coste de la implementación.** El coste puede ser una barrera en algunos casos insalvable, especialmente para las PYMEs. La robótica requiere una inversión inicial significativa. Si bien los ahorros a largo plazo son evidentes, el desembolso financiero inicial puede ser alto. Además, el retorno de la inversión (ROI) de las tecnologías no siempre es inmediato. Por ello, habría que habilitar una serie de ayudas público-privadas para paliar esta barrera.
- ♦ **Infraestructura tecnológica.** Muchas obras de construcción, particularmente aquellas en ubicaciones remotas, pueden carecer de la conectividad y el hardware necesarios para respaldar las soluciones robóticas. Se requiere un acceso confiable a Internet y una potencia informática suficiente.

Para superar estos desafíos, las empresas pueden comenzar adoptando un enfoque gradual para la integración de IA, datos, robótica. En lugar de intentar una implementación a gran escala, las empresas pueden comenzar con proyectos más pequeños y manejables dirigidos a puntos débiles específicos, como mejorar la monitorización de la seguridad o la automatización de las tareas rutinarias. Este enfoque permite una curva de aprendizaje gradual y ayuda a desarrollar experiencia interna y confianza en las nuevas tecnologías.

## 6. OPORTUNIDADES Y FUTURO TECNOLÓGICO DEL SECTOR

### 6.1. Oportunidades

*La robotización y la automatización del sector de la construcción representa una excelente oportunidad para las empresas españolas para reforzar el liderazgo tecnológico y mejorar su competitividad*

Según el informe de Forbes<sup>162</sup> sobre las tendencias en el sector de la construcción para el año 2025, uno de los pilares del crecimiento del sector será la automatización apoyada por la IA y los datos. La integración de las herramientas digitales y la robótica se van a convertir en estándares de la industria, proporcionando información en tiempo-real sobre el progreso de los proyectos y permitiendo ajustes rápidos. De esta manera, las empresas tendrán la oportunidad de mejorar su posición competitiva reforzando cinco aspectos claves:

- ♦ **Liderazgo.** La automatización y la robotización permitirán a las empresas mantener y mejorar su liderazgo a nivel global. La robótica conlleva el aumento de la productividad y de la calidad de las obras, lo que se traducirá en una mayor competitividad permitiendo a las empresas acceder a licitaciones de mayor valor añadido. Además, abrirá la oportunidad de nuevos mercados en donde el coste de la mano de obra y del suelo no sean determinantes a favor de la innovación y la complejidad de las soluciones constructivas.
- ♦ **Cultura tecnológica.** La robotización de la industria de la construcción transformará las empresas con una nueva cultura que preservará digitalmente el conocimiento tradicional (*know-how*) y, a la vez, introducirá una nueva forma de trabajar basada en los recientes avances tecnológicos. La incorporación sistemática, y en todos los niveles de la empresa, de herramientas de IA, Datos y Robótica, creará nuevas oportunidades empresariales con una toma de decisiones inteligente basadas en datos (*data-driven*) y en sistemas de aprendizaje de IA.
- ♦ **Incorporación de estándares e infraestructuras digitales.** La digitalización, y sobre todo la automatización, permitirán que la empresa trabaje con nuevos estándares (BIM, ROS, IoT) que influirán positivamente en el rendimiento global. Esto permitirá (hará necesario) crear nuevas infraestructuras digitales (Bases de Datos, comunicaciones rápidas) que podrán ser usadas en otras áreas de la empresa como gestión, dirección y finanzas. De esta manera, surgirá la oportunidad de transformación de la empresa al concepto de Construcción 4.0 (similar al de Industria 4.0).

<sup>162</sup> Highlights, and the Key Trends Set to Shape Construction in 2025, Forbes, 2025.

- ♦ **Nuevos modelos de negocio.** La profunda transformación permitirá crear nuevos modelos de negocio que actualmente son difíciles de implementar. Se trata de oportunidades de mercado que por un lado mejorarán la competitividad del proceso constructivo y, por otro lado, se adentrarán en los servicios de ciclo completo de las infraestructuras como el mantenimiento, inspección, etc. Además, permitirá tener una relación *win-to-win* con empresas subsidiarias de la obra (*stakeholders*) involucrándolas en los desarrollos de manera financieramente ventajosa para ellas.
- ♦ **Perfiles profesionales digitales.** La robotización trae consigo la incorporación a las empresas constructoras de nuevos perfiles profesionales que contarán con habilidades digitales avanzadas. La atracción de talento, que antes era exclusividad de sectores relacionados con la ICT (*Information and Communication Technologies*), con puestos de trabajo más atractivos, influirá en todo el ecosistema empresarial ayudando a dinamizar su digitalización. Estos perfiles vendrán mayoritariamente de los estudios de ingeniería industrial, informática, telecomunicaciones y matemáticas.

Con todo ello, habrá que contar con varias barreras que pueden dificultar la robotización de las empresas. Entre ellas se puede citar: i) altos costos iniciales de equipo y capacitación, ii) resistencia organizacional a la automatización y robotización, iii) capacidades digitales limitadas, especialmente en las PYMEs, y iv) riesgos de interoperabilidad y ciberseguridad. Para poder paliar, aunque sea en parte, estas barreras, la Unión Europea ha desarrollado un amplio marco político para acelerar la competitividad y garantizar una transición digital fluida y normalizada para el sector de la construcción<sup>163</sup>. Las medidas incluyen, entre otras, el observatorio europeo de la competitividad, el apoyo en la transición digital y la formación, y la incentivación de la I+D.

Una especial atención merece el apoyo a la creación de empresas de base tecnológica (EBT) tipo *start-ups* y *spin-offs*. Se trata de jóvenes empresas innovadoras que desarrollan nuevos productos y servicios específicamente para el sector de la construcción. Éstas se pueden clasificar en empresas más cercanas al hardware robótico y otras más orientadas a la parte de software y sensorica, aunque estos dos conceptos están a menudo muy entrelazados. En el primer grupo se pueden destacar, entre otras muchas, *start-ups* (normalmente con menos de 5-7 años de existencia) como<sup>164</sup> <sup>165</sup> AIM Intelligent Machines (USA) de excavadoras autónomas para movimiento de tierra, Auar (Reino Unido) de "microfábricas" tipo contenedor para prefabricación en obra, Evocons (España) para la impresión 3D robótica de edificios, Monumental (Países Bajos) de robots para automatizar tareas de albañilería, RIVR (Suiza) con aplicaciones de inspección y entrega de última milla, Room2030 (España) de prefabricación industrializada. En el segundo grupo de *start-ups*, también entre otras muchas, están<sup>166</sup> <sup>167</sup> <sup>168</sup> Beawre (España), optimiza la recepción de materiales y asegura la trazabilidad, CalcTree (Australia) de software colaborativo

---

<sup>163</sup> Building the future: How digitalisation and artificial intelligence are reshaping competitiveness in Europe's construction sector, European Commission, 2025.

<sup>164</sup> From fiction to function: 10 European startups pushing the boundaries of robotics, Eu-Startups, 2024.

<sup>165</sup> 5 construction tech start-ups land \$100m for automation, AI and prefab, <https://www.constructionbriefing.com/skills-training/news/startup-roundup-five-construction-tech-firms-raise-over-us100m/8062813>, 2025, consultado en agosto de 2025.

<sup>166</sup> Built for big Impact: 20 construction startups secure \$100M+ Funding, b2bcontactdatabase, 2025.

<sup>167</sup> 7 startups de construcción españolas que ofrecen respuestas, Emprendedores, 2025.

<sup>168</sup> Top 30 construction startups that are shaking up the industry, Bigrentz, 2024.

en la nube para cálculos en construcción, NavLive (Reino Unido) para generación de modelos 2D/3D de edificios mediante escaneo LIDAR, OpenSpace (EE. UU.) de captura y mapeo de video 360 para obras de construcción, Toggle (Japón) de optimización de flujos de trabajo orientado a la fabricación robótica.

Una herramienta muy usada por las grandes empresas tecnológicas (por ejemplo, en Microsoft<sup>169</sup> ó Telefónica<sup>170</sup>) es el intra-emprendimiento, que fomenta entre sus empleados la creación de EBT. La implantación de este tipo de mecanismos en las empresas constructoras puede representar una excelente oportunidad para fomentar las tecnologías robóticas y de automatización ofreciendo recursos a empleados emprendedores para desarrollar sus ideas innovadoras. Además, se puede acudir a la amplia red de incubadoras universitarias ubicadas normalmente en los Parques Tecnológicos agrupados en APTE (La Asociación de Parques Científicos y Tecnológicos de España).

## 6.2. Formación

*La formación de expertos con conocimientos sólidos tanto en tecnologías robóticas como en ingeniería civil es la clave del éxito para el sector de la construcción, impulsando programas de grado y máster consensuados con los principales actores.*

La formación de personal técnico cualificado es la clave de la transformación tecnológica de las empresas que están invirtiendo grandes cantidades de dinero en su digitalización, pero no siempre disponen del talento necesario para llevarla a cabo. La demanda de especialistas en robótica que entiendan los problemas del sector de la construcción es enorme. Los datos de varias consultoras de búsqueda de talento tecnológico arrojan que “el 70 % de las empresas afirman tener dificultades para cubrir posiciones clave en sus equipos tecnológicos”<sup>171</sup>.

La formación reglada, llevada principalmente en las universidades, es el pilar de este tipo de formación. Los estudios en tecnologías, sobre todo aplicadas como es el caso de la robótica, requieren de grandes infraestructuras y equipos que, en contadas excepciones, se ofrecen en las universidades públicas<sup>172</sup>. Lo que el sector demanda de esa formación es, por un lado, programas educativos de grado y máster consensuados con los principales actores y, por otro lado, captar a los mejores alumnos ofreciéndoles atractivas carreras profesionales. En este sentido, los programas en inglés ayudan a la atracción de talento internacional, y deben unir la formación teórica con la aplicada a través de Trabajos Fin de Grado/Máster en empresa o de los programas de Doctorados Industriales.

<sup>169</sup> Microsoft for startups, <https://portal.startups.microsoft.com/signup>, consultado en Agosto de 2025.

<sup>170</sup> Wayra, <https://www.wayra.es>, consultado en agosto de 2025.

<sup>171</sup> ¿Por qué la formación tecnológica en 2025 va a ser clave?, iTalenters, <https://www.italenters.com/actualidad/formacion-tecnologica-en-2025>, consultado en agosto de 2025.

<sup>172</sup> Estudio sobre el impacto económico y social de las universidades públicas y privadas madrileñas en la región. Análisis en el corto y en el largo plazo., Conferencia de Consejos Sociales de la Comunidad de Madrid, 2021.

La lista de grados oficiales en robótica de universidades públicas se presenta a continuación. La duración de todos ellos es de 240 créditos ECTS (*European Credit Transfer System*) que corresponden a 4 cursos académicos.

| Título de Grado                                | Universidad                           |
|--|---------------------------------------|
| Informática Industrial y Robótica              | UPV (Valencia)                        |
| Ingeniería de Robótica Software                | URJC (Madrid)                         |
| Ingeniería Electrónica, Robótica y Mecatrónica | US (Sevilla) y UMA (Málaga), conjunto |
| Ingeniería Robótica                            | UC3M (Madrid), en inglés              |
| Ingeniería Robótica                            | UAL (Almería)                         |
| Inteligencia Robótica                          | UJI (Castellón)                       |
| Robótica                                       | USC (Santiago de Compostela)          |

*Fuente: Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades<sup>173</sup>*

La lista de los principales másteres oficiales en robótica de universidades públicas españolas se presenta a continuación. La mayoría de ellos son másteres de investigación que preparan a los alumnos para el desarrollo de soluciones innovadoras en proyectos de investigación e innovación profundizando en habilidades y conocimientos avanzados.

| Título de Master                                 | Universidad                               | Créditos ECTS | Asignaturas RAC* |
|--|---|---------------|------------------|
| Automática y Robótica                            | UPC (Barcelona), en inglés                | 120           | No               |
| Automática y Robótica                            | UL (Alicante)                             | 60            | No               |
| Automática y Robótica                            | UPM (Madrid)                              | 60            | No               |
| Automática, Robótica y Telemática                | US (Sevilla)                              | 60            | No               |
| Informática Industrial y Robótica                | UDC (A Coruña) y ULA (Tenerife), conjunto | 60            | No               |
| Ingeniería de Control, Automatización y Robótica | UPV/EHU (Bilbao)                          | 90            | No               |
| Ingeniería Electrónica, Robótica y Automática    | US (Sevilla)                              | 60            | No               |
| Robótica   | UMH (Elche)                               | 60            | No               |
| Robótica e Inteligencia Artificial               | UniLeon (León), semi-presencial           | 60            | No               |
| Robótica y Automática                            | UCLM (Ciudad Real)                        | 90            | No               |

<sup>173</sup> Registro de Universidades, Centros y Títulos (RUCT), consultado en agosto de 2025.

| Título de Master                | Universidad                  | Créditos ECTS | Asignaturas RAC* |
|---------------------------------|------------------------------|---------------|------------------|
| Robótica y Automatización       | UC3M (Madrid)                | 90            | Si               |
| Robótica, Gráficos y Visión     | Unizar (Zaragoza), en inglés | 90            | No               |
| Sistemas Robóticos Inteligentes | UDG (Girona), en inglés      | 120           | No               |

Fuente: Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades

\* Asignaturas relacionadas directamente con RAC

La lista de los principales másteres oficiales en robótica de universidades extranjeras se presenta a continuación. La selección se ha realizado considerando como mucho dos másteres por país y de universidades del mayor reconocimiento.

| Título de Master                      | Universidad/País  | Duración (años)      | Asignaturas RAC* |
|---------------------------------------|---|----------------------|------------------|
| Robotics and Artificial Intelligence  | Queensland University of Technology (Brisbane, Australia) | 1                    | No               |
| Robotics and Automation Engineering   | University of Pisa (Pisa, Italy)                          | 2                    | No               |
| Systems, Control and Robotics         | KTH (Stockholm, Sweden)                                   | 2                    | No               |
| Robotics, Cognition, Intelligence     | Technical University of Munich (Munich, Germany)          | 2                    | No               |
| Construction Robotics                 | RWTH (Aachen, Germany)                                    | 2                    | Si               |
| Automation and Robotics               | Sorbonne University (Paris, France)                       | 2                    | No               |
| Robotics                              | Carnegie Mellon University (Pittsburgh, PA, USA)          | 2                    | No               |
| Robotics Engineering                  | Worcester Polytechnic Institute (Worcester, MA, USA)      | 2, opción de on-line | No               |
| Robotics and Artificial Intelligence  | Queen Mary University of London (London, UK)              | 1                    | No               |
| Innovative AI and Robotics Technology | Kyushu Institute of Technology (Fukuoka, Japan)           | 2                    | No               |
| Robotics                              | National University of Singapore (Singapore)              | 2                    | No               |

Fuente: WeUni<sup>174</sup> y elaboración propia

<sup>174</sup> WeUni, <https://www.weuni.com/en/programs/?query=robotics>, consultado en agosto de 2025.

## 6.3. I+D en robótica en la construcción

*La investigación y desarrollo es uno de los principales mecanismos de competitividad empresarial que impulsa la innovación de nuevos productos, servicios y procesos permitiendo una posición de mercado mucho más sólida.*

El futuro del sector de la construcción pasa ineludiblemente por la investigación, desarrollo, innovación y transferencia de tecnología. De hecho, entre los fines de la Plataforma Tecnológica de la Construcción (PTEC) está el “impulso de la I+D+i del sector de la construcción, con el objetivo de dar respuesta a los nuevos retos y demandas del sector” y de la Plataforma Tecnológica de Robótica (HispaRob) está el de “coordinar iniciativas dirigidas a vincular los esfuerzos investigadores con la creación de productos y servicios robóticos comercializables y útiles para la sociedad”. Los esfuerzos de ambas plataformas permitirán impulsar la incorporación de las tecnologías robóticas en la construcción.

Sin intentar compararnos con las grandes empresas tecnológicas, cinco de las cuales (Amazon, Alphabet, Meta, Apple y Microsoft) invierten en I+D del orden de 229 mil millones de dólares<sup>175</sup> (2023), comparable al PIB de algunos países desarrollados, la Unión Europea presenta buenos resultados con una inversión de 381 mil millones de euros que corresponde al 2,22 % del PIB<sup>176</sup> (2023). No obstante, la palma de las inversiones en I+D a nivel global se la llevan la industria farmacéutica/bio y la de software/computación, con 204 y 194 mil millones de dólares, respectivamente, mientras que en la construcción es 7 veces menor, alcanzando solo 26 mil millones de dólares<sup>177</sup>. Más aun, el auge de mercados y empresas asiáticas hace que la mayoría de esos fondos correspondan a China.

España, cuya inversión en I+D se sitúa en 1,49 % del PIB (2023), muy por debajo del 2,22 % de la media la UE, tiene una gran oportunidad de mejorar sus cifras. La inversión empresarial, que representa el 54 % del total de inversión española de 22 mil millones de euros<sup>178</sup>, se perfila como el motor de la I+D colaborativa público-privada. Teniendo en cuenta que España cuenta con 8 empresas constructoras en el top 250 mundial<sup>179</sup>, ésta debería jugar un papel tractor en todo lo relacionado con las nuevas tecnologías, digitalización, robotización e IA. El objetivo es doble, por un lado, usar masivamente esas tecnologías y por otro desarrollarlas tanto internamente como a través de terceros. Las PYMEs y las jóvenes empresas innovadoras tipo *start-ups/spin-offs* también tienen una gran oportunidad creando nuevos productos, procesos y servicios constructivos para convertirse en líderes de nuevos nichos de mercado.

<sup>175</sup> Big tech's big R&D bill, 2024, <https://www.trendlinehq.com/p/big-techs-big-r-and-d-bill>, consultado en agosto de 2025.

<sup>176</sup> Science, technology, and innovation: R&D expenditure, Eurostat, 2024, [https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=R%26D\\_expenditure](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=R%26D_expenditure), consultado en agosto de 2025.

<sup>177</sup> R&D investment by industry and world region, ACEA, 2023, consultado en septiembre de 2025.

<sup>178</sup> Observatorio de evolución de la I+D, COTEC, 2024, <https://cotec.es/informes/evolucion-de-la-id-3>, consultado en septiembre de 2025.

<sup>179</sup> Top 250 global contractors, ENR, 2024, <https://www.enr.com/toplists/2024-Top-250-Global-Contractors-Preview>, consultado en septiembre de 2025.



La robótica está presente en numerosos programas de I+D públicos, la mayoría de ellos con participación público-privada. HispaRob, a través de varios informes y su propia estrategia global<sup>180</sup>, destaca numerosas oportunidades para empresas, universidades, organismos de investigación y centros tecnológicos de participación tanto a nivel internacional como nacional y regional:

- ♦ **América.** Los programas de I+D en robótica de los Estados Unidos, centrados en la investigación básica y aplicada en robótica inteligente y sistemas autónomos, se gestionan principalmente por la *National Science Foundation* (NSF) y por la *Defense Advanced Research Projects Agency* (DARPA). Los programas de la NSF de robótica, que apoyan el desarrollo y el uso de la robótica en lugares de trabajo, hospitales, comunidades y hogares, ascienden para 2024 a unos 70 millones de dólares, mientras el del DARPA, parte del Departamento de Defensa (DoD), incluye 10 mil millones de dólares para tecnologías de sistemas autónomos y robótica. También existen partidas de I+D de la NASA para la construcción lunar y marciana.
- ♦ **Asia.** China ha actualizado su Programa Especial Clave sobre Robots Inteligentes con un presupuesto para 2025 de 45 millones de dólares promoviendo sectores claves, incluida la construcción. Adicionalmente cuentan con varios programas específicos como el Plan "*Made in China 2025*" de creación de tecnologías propias y el "*Thousand Talents Program*" de atracción de talento internacionales en robótica y otros sectores claves.

En Japón, la "*New Robot Strategy*" tiene como objetivo convertir al país en el centro de innovación en robótica número uno del mundo. Entre los sectores claves se encuentra la construcción y los servicios de las infraestructuras. Además, cuentan con el "*Moonshot Research and Development Program*"<sup>181</sup>, con un presupuesto de 440 millones de dólares hasta 2030 y un enfoque en robótica e IA.

En Corea del Sur, el cuarto Plan Básico sobre Robots Inteligentes se extiende hasta 2028 con un presupuesto de 128 millones de dólares. Los objetivos clave son mejorar la tecnología, la mano de obra y la competitividad corporativa, que constituyen la base de la industria robótica coreana. Además, cuentan con el *Brain Pool (BP) program*<sup>182</sup>, cuyo objetivo es atraer investigadores extranjeros, incluidos los de robótica, de prestigio reconocido.

<sup>180</sup> IFR analiza la inversión pública en robótica en todo el mundo, HispaRob, 2025, <https://www.hisparob.es/ifr-analiza-la-inversion-publica-en-robotica-en-todo-el-mundo>, consultado en septiembre de 2025.

<sup>181</sup> Moonshot Research and Development Program, Cabinet Office, Science, Technology and Innovation, <https://www8.cao.go.jp/cstp/english/moonshot/top.html>, consultado en octubre de 2025.

<sup>182</sup> 2025 Call for Applications for Brain Pool (BP/BP+), National Research Foundation of Korea, RPIK, <https://www.rpik.or.kr/file/fileDown.do?atchFileId=FID00001880&fileNum=0>, consultado en octubre de 2025.

- ♦ **Europa.** Los programas marco de I+D, actualmente es el Horizonte Europa (2021-2027)<sup>183</sup> con 95,5 mil millones de euros, son los principales instrumentos de la UE. Se destinan 174 millones de euros para el programa en IA, datos y robótica a través de la *Directorate-General for Communications Networks, Content and Technology (DG Connect)* en Luxemburgo, que gestiona la parte de robótica del *Cluster 4: Digital, Industry and Space*. Además, existen otros programas en los cuales la robótica es importante como *Digital Europe, EU4Health* y los fondos regionales.

En España se cuenta con varios mecanismos agrupados en el Plan Estatal de Investigación Científica y Técnica y de Innovación (PEICTI)<sup>184</sup>, que para el periodo 2024-2027 cuenta con un presupuesto global de 18 mil millones de euros. Incluyen tanto la I+D más básica, en niveles bajos de TRL, en donde la robótica aparece en la línea estratégica de Transición Digital e Inteligencia Artificial como la I+D más aplicada, TRL altos, gestionada por el Centro para el Desarrollo Tecnológico y la Innovación (CDTI) a través de sus múltiples convocatorias. A nivel autonómico también existen numerosas convocatorias relacionadas con la robótica.

Los programas de I+D relacionados con la construcción relacionados directamente con la robótica y tecnologías habilitadoras son muy numerosos. A través de varios documentos de la PTEC<sup>185</sup> y de la *European Construction and sustainable built environment Technology Platform (ECTP)*<sup>186</sup> podemos resumir estos programas:

- ♦ **América.** En Estados Unidos el gobierno ofrece programas de incentivos para I+D en forma de crédito fiscal<sup>187</sup>. Hay dos tipos de incentivos, para las PYMEs (20 mil US\$ más tres veces los pasivos totales de la compañía) y para grandes corporaciones (con un máximo del 20 % del gasto de la I+D). Las actividades se extienden tanto a empresas como centros de investigación y se centran en el desarrollo de prototipos, de nuevos productos y de sistemas altamente automatizados.

---

<sup>183</sup> Horizon Europe: Research and innovation funding programme until 2027, European Commission, [https://research-and-innovation.ec.europa.eu/funding/funding-opportunities/funding-programmes-and-open-calls/horizon-europe\\_en](https://research-and-innovation.ec.europa.eu/funding/funding-opportunities/funding-programmes-and-open-calls/horizon-europe_en), consultado en septiembre de 2025.

<sup>184</sup> Plan Estatal de Investigación Científica y Técnica y de Innovación (PEICTI), Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades, <https://www.ciencia.gob.es/Estrategias-y-Planes/Planes-y-programas/PEICTI.html>, consultado en septiembre de 2025.

<sup>185</sup> Posicionamiento del sector español de la construcción en I+D+i en el contexto europeo, 2024, [https://plataformaptec.es/download/posicionamiento\\_europeo2/?tmstv=1718614282&v=20994](https://plataformaptec.es/download/posicionamiento_europeo2/?tmstv=1718614282&v=20994), consultado en septiembre de 2025.

<sup>186</sup> ECTP Strategic Research & Innovation Agenda (SRIA) 2024-2030, 2023, [https://www.ectp.org/fileadmin/user\\_upload/documents/ECTP/ECTP\\_Position-papers\\_and\\_SRIA/ECTP\\_SRIA\\_2030\\_final\\_version.pdf](https://www.ectp.org/fileadmin/user_upload/documents/ECTP/ECTP_Position-papers_and_SRIA/ECTP_SRIA_2030_final_version.pdf), consultado en septiembre de 2025.

<sup>187</sup> Understanding the role of R&D in the construction industry, 2023, [https://medium.com/@alexander\\_clifford/understanding-the-role-of-r-d-in-the-construction-industry-e584d4edb1d0](https://medium.com/@alexander_clifford/understanding-the-role-of-r-d-in-the-construction-industry-e584d4edb1d0), consultado en septiembre de 2025.

- ♦ **Asia.** La I+D de China en la construcción se caracteriza por iniciativas lideradas por el gobierno para modernizar el sector englobadas en el "Decimocuarto Plan Quinquenal para el Desarrollo de la Industria de la Construcción<sup>188</sup>" (2021-2025), que promueve la digitalización, la industrialización y la inteligencia del sector. Si bien la inversión en investigación y desarrollo ha sido relativamente baja. Las principales áreas de investigación y desarrollo incluyen ferrocarriles de alta velocidad, infraestructura a gran escala y puertos de aguas profundas y la edificación industrializada masiva.

En Japón los programas de I+D están liderados por las principales empresas constructoras y el gobierno. El programa *Moonshot*<sup>189</sup> del Gabinete de Presidencia se centra en la temática de robots inteligentes autónomos en obra al aire libre y define varias líneas en la construcción robotizada. Por otro lado, el *National Institute for Technology and Innovation* (NEDO), dependiente del *Ministry of Economy, Trade and Industry* (METI), una organización nacional de gestión y financiación de la investigación y el desarrollo, desempeña un papel crucial en la dirección de los esfuerzos de investigación en el sector de la construcción.

- ♦ **Europa.** Built4People<sup>190</sup> es el mayor partenariado público-privado europeo de I+D en construcción con una duración de 7 años (2021-2027) y un presupuesto de 380 millones de euros. Se inscribe en el *Cluster 5: Climate, Energy and Mobility* del *Horizon Europe*. Está coordinado por la ECTP y por el *World Green Building Council* (WorldGBC), y ofrece periódicamente convocatorias de proyectos a terceros, varios de los cuales están directamente relacionados con la robótica. Es una excelente oportunidad de participación para los socios españoles.

En España destacan las ayudas a la I+D más básica como los programas del PEICTI pero también las ayudas del CDTI para empresas en desarrollos más aplicados, como la convocatoria competitiva Misiones Ciencia e Innovación o adjudicaciones directas tipo Eurostars<sup>191</sup>. De gran interés son las deducciones fiscales para empresas que invierten en I+D, independientemente de su tamaño y facturación, que pueden alcanzar hasta el 60 % del proyecto con una componente técnica significativa y el 12 % en inversiones ICT<sup>192</sup>.

De especial atención es el apoyo a las PYMEs que tienen dificultades en acceder a este tipo de ayudas dada la complejidad y la burocracia de los procesos de solicitud, ejecución y, sobre todo, de justificación. La vía más rápida es acudir bien a organismos públicos<sup>193</sup> y a las universidades/OPIs/Centros Tecnológicos, que tienen los medios necesarios y la experiencia, o bien a empresas consultoras especializadas en proyectos I+D que orientan sobre las ayudas más idóneas para cada desarrollo. Por otro lado, están diferentes organismos públicos y empresas especializadas en la protección de la propiedad industrial e intelectual (patentes y modelos de utilidad)<sup>194</sup>.

<sup>188</sup> China publishes five-year plan for construction industry, 2022, [https://english.www.gov.cn/statecouncil/ministries/202201/26/content\\_WS61f09bcc6d09c94e48a4473.html](https://english.www.gov.cn/statecouncil/ministries/202201/26/content_WS61f09bcc6d09c94e48a4473.html), consultado en septiembre de 2025.

<sup>189</sup> Collaborative AI robots for adaptation of diverse environments and innovation of infrastructure construction, <https://moonshot-cafe-project.org/en/>, consultado en septiembre de 2025.

<sup>190</sup> Built4People, 2025, <https://built4people.eu/>, consultado en septiembre de 2025.

<sup>191</sup> Calendario de convocatorias, CDTI, <https://www.cdti.es/calendario-de-convocatorias>, consultado en septiembre de 2025.

<sup>192</sup> Deducciones fiscales I+D+i, CDTI, 2025.

<sup>193</sup> Buscador de Ayudas en I+D+i, <https://www.7experts.com/soluciones-digitales/buscador-ayudas-idi>.

<sup>194</sup> Beneficios de proteger los signos distintivos, invenciones y diseños, Oficina Española de Patentes y Marcas, <https://www.oepm.es/es/conoce-la-propiedad-industrial/beneficios-de-proteger-los-signos-distintivos-invenciones-y-disenos/>, consultado en septiembre de 2025.

## 7. CONCLUSIONES

A través de estas páginas han quedado demostradas las numerosas ventajas de la robótica en el sector de la construcción, ventajas competidas para las empresas y sus empleados, así como para la ciudadanía en general. No se trata solamente de mejorar la productividad, sino también de mejorar la calidad de las construcciones y ofrecer soluciones más innovadoras, abriendo de esta manera nuevos mercados y nuevos tipos de negocios. Un factor determinante de la robotización y automatización, es la mejora, en un entorno tan complejo como las obras, de la seguridad de los operarios reduciendo drásticamente los accidentes laborales.

La robótica, conjuntamente con la profunda digitalización y la masiva introducción de la IA y los datos, va a permitir transformar el sector de la construcción. Estas técnicas ofrecen a corto y medio plazo una excelente oportunidad para que las empresas constructoras españolas pasen de un modelo tradicional a uno de alta tecnología. No se trata de transformar las obras en factorías de coches o en centros de desarrollo de software, pero sí de utilizar todo el *know-how* existente de los sectores más altamente tecnificados para encontrar una vía propia y recorrer el camino hacia la nueva forma de construir.

Los autores de este Libro Blanco han procurado presentar una visión general de la robótica en la construcción analizando transversalmente tanto los fundamentos y sus tecnologías como las aplicaciones actuales y futuras. Los expertos participantes han incluido un amplio espectro de conocimientos multi- e interdisciplinares que provienen de las empresas constructoras y afines, las universidades y los centros tecnológicos. A través de múltiples ejemplos y referencias el lector puede formarse una clara idea de las diferentes temáticas y de las tendencias actuales. De esta manera, el libro representa una guía de actuaciones que esperamos se vaya actualizando en el tiempo con nuevas ediciones.

Finalmente, los autores quieren agradecer la inestimable ayuda de las dos plataformas tecnológicas impulsoras de este libro, PTEC e HispaRob, así como a todos sus socios, tanto colectivos como individuales. Sin este apoyo este Libro Blanco no sería posible. ¡Gracias!

# 8. PARTICIPANTES

## 8.1. Entidades

Las entidades que han colaborado en la elaboración de este Libro Blanco son:



## 8.2. Colaboradores

Los colaboradores que han participado en la elaboración de este Libro Blanco son:

- ◆ Ainhoa Amaro García
- ◆ Andrés Meseguer Valenzuela
- ◆ Arsenio Navarro Muedra
- ◆ Carlos Balaguer Bernaldo de Quirós (coordinador)
- ◆ Claudio Fiandrino
- ◆ Concepción Alicia Monje Micharet
- ◆ Damien Salle
- ◆ David Díez Díez
- ◆ Eduardo Silles McLaney
- ◆ Ernesto Gambao Galán
- ◆ Francisco Javier Garrido Hernández
- ◆ Gonzalo Molina Molina
- ◆ Iñigo Martínez Lacunza
- ◆ Iñigo Vegas Ramiro
- ◆ Jesús Mercader Uguina
- ◆ Jon Aguirre Ibarbia
- ◆ Jonatan Fandiño Rodríguez
- ◆ Jorge Escribano Troncoso
- ◆ José María Llamas Fernández
- ◆ Juan González Vítores
- ◆ Juan Jesús Muñoz
- ◆ Lorena Palomo Luis
- ◆ Maider Alzola Robles
- ◆ María Guadalupe Sánchez Escribano
- ◆ María José Conde Laza
- ◆ Oscar Revilla Gutiérrez
- ◆ Pere Ridaó Rodríguez
- ◆ Pilar Muelas de Ayala
- ◆ Roberto Guzmán Diana
- ◆ Santiago Martínez de la Casa
- ◆ Sergio Serrano Tomas

## 8.3. Patrocinadores

Este libro blanco ha sido patrocinado por:

The logo for ARITEX, featuring the word "ARITEX" in a bold, orange, sans-serif font.

## ANEXO I: CASOS DE USO

Este Anexo está dedicado a proyectos más recientes (antigüedad menor o igual de 5 años) relacionados con la robótica en la construcción. Los socios citados solo corresponden a entidades españolas.

**Título:** BADGER - Robot for autonomous underground trenchless operations, mapping and navigation

**Entidades:** [Universidad Carlos III de Madrid](#), Robotnik Automation

**Financiador:** European Commission under Horizon 2020 program

**Fecha:** 2017-2021

**Palabras clave:** Robots, obra subterránea, áreas metropolitanas

**web:** <https://cordis.europa.eu/project/id/731968/es>

**Descripción:** The goal of the proposed project is the design and development of the BADGER autonomous underground robotic system that can drill, maneuver, localize, map and navigate in the underground metropolitan space, and which will be equipped with tools for constructing horizontal and vertical networks of stable bores and pipelines.



**Título:** DELTAFORCE – Proceso productivo avanzado basado en robótica flexible de gran formato y tecnologías habilitadoras 4.0

**Entidades:** [DIGAFER](#), [IDONIAL](#), [VIPASA](#)

**Financiador:** Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades

**Fecha:** 2025-2028

**Palabras clave:** Robótica de cables, visión artificial, IA, rehabilitación de fachadas, automatización, construcción

**web:** <https://idonial.com/es/deltaforce-es>

**Descripción:** Proyecto focalizado en el diseño, desarrollo y validación de un sistema robótico de cables modular y portable que se instala directamente sobre fachadas para automatizar operaciones como pintura y proyección de morteros. El sistema planteado elimina el uso de andamios, incrementa la productividad y reduce riesgos.



**Título:** BEEYONDERS - Breakthrough European technologies yielding construction sovereignty, diversity & efficiency of resources

**Entidades:** Acciona, CATEC, ITA Innova, PNO Innovación, Tecnalia,

**Financiador:** European Commission under Horizon Europe program

**Fecha:** 2022-2025

**Palabras clave:** Robots, UAV, rovers

**web:** <https://beeyonders.eu>

**Descripción:** The BEEYONDERS project aims at improving efficiency, safety, and quality in the construction sector while reducing the environmental impact of building sites. By integration of autonomous vehicles and human robot collaboration, additive manufacturing, diagnostics and monitoring and autonomous maintenance.



**Título:** BIMprove - Improving building information modelling by realtime tracing of construction processes

**Entidades:** Australo Interinnov, Robotnik Automation, Vías y Construcciones

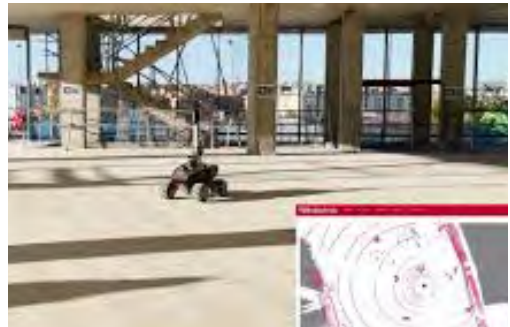
**Financiador:** European Commission under Horizon 2020 program

**Fecha:** 2020-2023

**Palabras clave:** Robotics, BIM, ground rovers

**web:** <https://www.bimprove-h2020.eu/project/>

**Descripción:** The project develops a dynamic digital system for construction sites to fast-track productivity based on the BIM models by using Artificial Intelligence with AR/VR, Unmanned Aerial Vehicles (UAV) and ground rovers. IN this way it will be possible to control resources, minimizing waste and to ensure a high level of safety.



**Título:** CEROACCIDENTES - Investigación de nuevas tecnologías para la seguridad y salud en la construcción con 0 accidentes

**Entidades:** FCC Construcción, Aimplas, Alysis, Becsa, Fractalia, ITA Innova, etc.

**Financiador:** CDTI

**Fecha:** 2022-2025

**Palabras clave:** Robot autónomo, seguridad, accidentes

**web:** <https://www.fcco.com/-/proyecto-0accidentes>

**Descripción:** Desarrollo de un ecosistema cognitivo integral para la monitorización y predicción en tiempo-real de situaciones peligrosas para la seguridad y salud de los trabajadores de la construcción un sistemas robóticos autónomos y ecosistemas de conectividad ciberseguros y elementos diversos de inteligencia artificial.



**Título:** COBOLLEAGUE – Collaborative robot for construction environments

**Entidades:** Eurecat, Robotnik

**Financiador:** European Commission under Horizon 2020 program

**Fecha:** 2017-2021

**Palabras clave:** Robots, colaboración, sistemas autonomos

**web:** <https://www.esmera-project.eu/2019/05/23/cobolleague/>

**Descripción:** El proyecto COBOLLEAGUE tiene por objetivo desarrollar un innovador robot terrestre, altamente modular, colaborativo y autónomo con el objetivo de ayudar a los trabajadores del sector de la construcción en el transporte de piezas pesadas y el manejo de herramientas, mejorando así su seguridad y aumentando la productividad de las tareas de construcción.



**Título:** Construcción 3D, robótica e Inteligencia Artificial aplicada a la construcción y la ingeniería

**Entidades:** Ayuntamiento de Agüimes, ECOAGA, EVOCONS

**Financiador:** Ayuntamiento de Agüimes

**Fecha:** 2025

**Palabras clave:** Robótica, impresión 3D, Inteligencia Artificial

**web:** <https://evocons.es/proyecto-ecoaga-en-colaboracion-con-ayuntamiento-de-aguimes-espana>

**Descripción:** El proyecto de cooperación público-privada ha alcanzado un grado de automatización del 60 % en el desarrollo de una infraestructura singular mediante una impresión robotizada 3D.

Se enmarca en una realidad cada vez más urgente: el creciente déficit habitacional, las limitaciones del modelo constructivo tradicional y la necesidad de verticalizar las ciudades.



**Título:** D-HYDROFLEX - Digital solutions for improving the sustainability performance and flexibility potential of hydropower assets

**Entidad:** CARTIF

**Financiador:** European Commission under Horizon 2020 program

**Fecha:** 2023-2026

**Palabras clave:**

**web:** <https://d-hydroflex.eu/>

**Descripción:** Development of a cloud-based Digital Twin monitoring and diagnostics centre that will provide hydropower plant operators with remote, real-time insights into overall plant operations, sources of unplanned downtime and process inefficiencies.



**Título:** Exploit4InnoMat (E4IM) - An open Innovation Ecosystem for exploitation of materials for building envelopes towards zero energy buildings

**Entidades:** CSIC, Amsimulation, IRIS Solutions, Universidad de Navarra

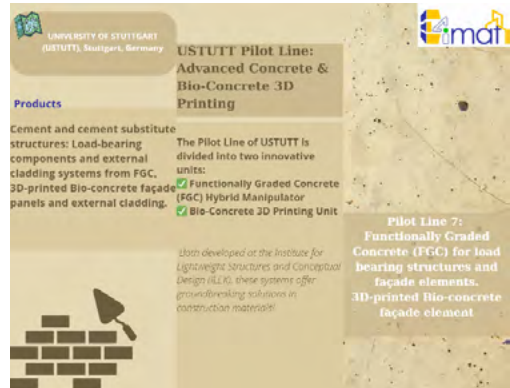
**Financiador:** European Commission under Horizon Europe program

**Fecha:** 2023-2026

**Palabras clave:** Robótica, impresión 3D

**web:** <https://cordis.europa.eu/project/id/101092339/results/es>

**Descripción:** Building sector is responsible for 40 % of energy consumption and 36 % of CO2 emissions in the EU. In order to achieve the target of its reduction a wide range Open Innovation Testbeds will be implemented including the pilot lines for nanodispersion, 3D printing and robotic spraying.



**Título:** HYFLIERS - Hybrid flying-rolling with-snake-arm robot for contact inspection

**Entidades:** CATEC, Universidad de Sevilla

**Financiador:** European Commission under Horizon 2020 program

**Fecha:** 2018-2022

**Palabras clave:** Robotics, inspection oil industry

**web:** <https://www.oulu.fi/hyfliers/>

**Descripción:** The objective is to reduce inspection costs and improve safety by exploiting a robotic inspection system. The technology results will be validated in the inspection of pipes, which is a very relevant short-term application, but the results of the project could be also applied to other industrial scenarios, such as power generation plants.



**Título:** IAM4RAIL - Integrated asset management for Europe's rail system

**Entidades:** ADIF, CAF, CEDEX, CEIT, Cemosa, Comsa, Enyse, INECO, INDRA Sistemas, Talgo, Tekniker

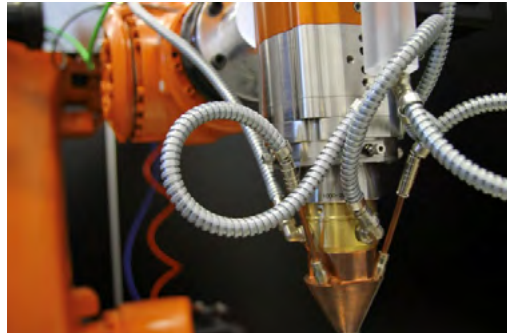
**Financiador:** European Commission under Horizon Europe program

**Fecha:** 2022-2026

**Palabras clave:** Robot, monitoring system, digital twin

**web:** <https://cordis.europa.eu/project/id/101101966/es>

**Descripción:** The IAM4RAIL project focuses on asset status information with the rail traffic management system (TMS), the analysis of available information with artificial intelligence (AI), and the development of Digital Twins, including novel robotics technology and additive manufacturing.



**Título:** METAclustered – SME oriented European Open Innovation Test Bed for the BUILDING envelope materials industrial sector using a harmonised and upgraded technical framework and living LABS

**Entidades:** IDONIAL, INDRA, CARTIF, TEKNIKER, PTEC, UPV/EHU, etc.

**Financiador:** European Commission under Horizon 2020 program

**Fecha:** 2021-2026

**Palabras clave:** Fachadas, construcción, impresión 3D, green walls

**web:** [www.metabuilding-labs.eu](http://www.metabuilding-labs.eu)

**Descripción:** Una de las actividades del proyecto es la tecnología robótica de impresión 3D de gran tamaño para adaptarse a las necesidades del sector, como elementos constructivos asociados a fachadas tales como paneles plásticos para dotar de funcionalidad de captación de aguas de lluvia para crecimiento de muros verticales (green walls).



**Título:** Obra del Nuevo Hospital Central del Alentejo (Portugal)

**Entidad:** Acciona

**Financiador:** Propia

**Fecha:** 2024

**Palabras clave:** Robótica, construcción de hospital, impresión superficial

**web:** [https://www.acciona.com/es/actualidad/noticias/acciona-utiliza-nuevo-robot-construccion-hospital-alentejo-portugal?\\_adin=1658636608](https://www.acciona.com/es/actualidad/noticias/acciona-utiliza-nuevo-robot-construccion-hospital-alentejo-portugal?_adin=1658636608)

**Descripción:** El robot HP SitePrint se ha utilizado en las obras del Hospital Central do Alentejo, ubicado en Évora (Portugal) para a partir de unos planos, efectuar trabajos de impresión directa de líneas y texto sobre las superficies. Su carácter colaborativo no excluye del proceso al operario humano, cuya participación en la preparación de los planos y la operación del equipo continúa siendo esencial.



**Título:** OMICRON - Towards a more automated and optimised maintenance, renewal and upgrade of roads by means of robotised technologies and intelligent decision support tools

**Entidades:** Cemosá, CATEC, EIFFAGE, INDRA Sistemas, Pavasal, Universidad de Sevilla

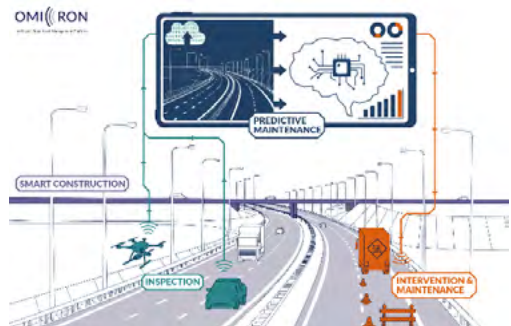
**Financiador:** European Commission under Horizon 2020 program

**Fecha:** 2021-2025

**Palabras clave:** Drons, inspection, computer vision

**web:** <https://omicronproject.eu/>

**Descripción:** The project will address the entire road network system, focusing on digital inspection technologies implementation, road digital twin development, construction of a decision support tool, intelligent construction development, and intervention solution for infrastructures with the help of robots and other innovative technologies.



**Título:** PRACAN - Plataforma robótica activa de identificación, control y seguimiento de agentes cancerígenos en entornos de construcción

**Entidades:** FCC Construcción, Atygen, CARTIF, CVS Sistemas

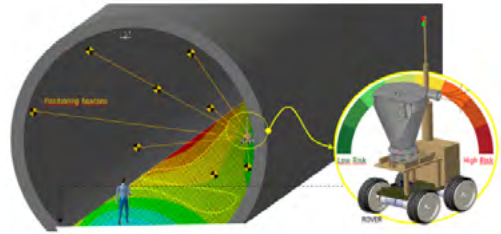
**Financiador:** CDTI

**Fecha:** 2021-2022

**Palabras clave:** Robot terrestre, robot aéreo, riesgos laborales

**web:** <https://www.fccco.com/web/construccion/-/proyecto-pracan>

**Descripción:** Diseño y desarrollo de un nodo móvil terrestre controlable remotamente para la fase de identificación y localización de los riesgos (presencia de SCR) y de un nodo móvil aéreo para la detección temprana de amianto en la fase de identificación de riesgos.



**Título:** RADIANCE - Robotic, automated and digital solutions for improving building renovation and new construction efficiency

**Entidades:** Universidad de Vigo, Contactica, Misturas, Tecnalia

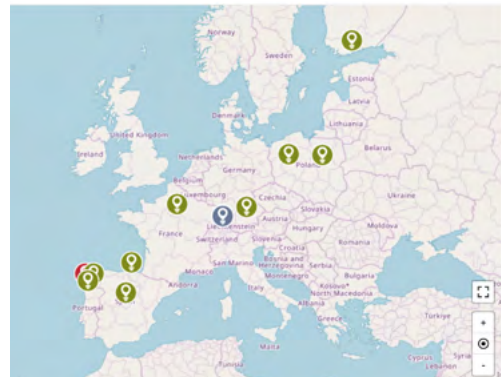
**Financiador:** European Commission under Horizon Europe program

**Fecha:** 2025-2027

**Palabras clave:** Robotics, façade renovation, maintenance

**web:** <https://cordis.europa.eu/project/id/101235536>

**Descripción:** RADIANCE aims to enhance the efficiency, safety and sustainability of the construction sector by automating the construction of new buildings and the renovation and maintenance of Europe's buildings stock, using advanced robotics, automated and digital technologies as new robotic solutions for façade renovation.



**Título:** RobetArme - Human-robot collaborative construction system for shotcrete digitization and automation through advanced perception, cognition, mobility and additive manufacturing skills

**Entidades:** Robotnik Automation, Information Catalyst, Ingenieros Asesores de Construcción

**Financiador:** European Commission under Horizon Europe program

**Fecha:** 2022-2026

**Palabras clave:** Robotics, human-robot collaboration, construction 4.0

**web:** <https://www.robotarme-project.eu>

**Descripción:** The RobetArme project introduces a new human-robot collaborative construction system to automate emerging shotcrete construction technology. It's a step forward in Construction 4.0 by automating tasks in all phases of shotcrete application by supplying collaboratively constructed mobile manipulators.



**Título:** ROBIM - Robótica autónoma para inspección y evaluación de edificios existentes con integración bim

**Entidad:** FCC Construcción

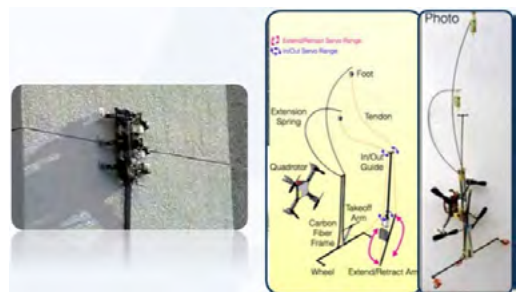
**Financiador:** CDTI (Programa Estratégico Cien)

**Fecha:** 2016-2020

**Palabras clave:** Robot escalador, inspección, cerramiento edificios

**web:** <https://www.fccco.com/web/construccion/-/proyecto-robim>

**Descripción:** Desarrollo de un robot móvil ligero y autónomo, tanto en su desplazamiento como en su alimentación, con capacidad la inspección, evaluación y diagnóstico de la composición y estado de conservación y eficiencia energética de los cerramientos del patrimonio edificado.



**Título:** ROBOSUB - Robots inteligentes subterráneos para la transición ecológica y digital del subsuelo urbano

**Entidad:** [Universidad Carlos III de Madrid](#)

**Financiador:** Ministerio de Ciencia e Innovación (proyecto TED)

**Fecha:** 2022-2025

**Palabras clave:** Robot, navegación autónoma, obra subterránea

**web:** <https://researchportal.uc3m.es/display/act556233>

**Descripción:** Desarrollo de un robot de excavación subterránea de pequeño diámetro para canalizaciones de agua, gas, electricidad y telecomunicaciones, basado en actuadores inteligentes con tecnología SMA.



**Título:** ROBUST - Desarrollo de un sistema de mapeado en entornos *indoor* de dimensiones reducidas mediante robots aéreos y sensórica avanzada

**Entidad:** [FCC Construcción](#)

**Financiador:** CDTI

**Fecha:** 2021-2023

**Palabras clave:** Drones, mapas, túneles

**web:** [https://www.fcco.com/web/construccion/-/proyecto\\_robust](https://www.fcco.com/web/construccion/-/proyecto_robust)

**Descripción:** Tecnología y despliegue de robots aéreos autónomos (drones), sistema de mapeo georreferenciado y seguimiento automatizado para entornos confinados, fundamentalmente túneles y zanjas, así como el diseño y desarrollo de sistemas de control y algoritmos para la comunicación con los robots.



**Título:** ROMERIN – Robot Modular Escalador para la Inspección de infraestructuras

**Entidad:** Universidad Politécnica de Madrid

**Financiador:** Ministerio de Ciencia e Innovación

**Fecha:** 2017-2021

**Palabras clave:** Robots escaladores, inspección, construcción

**web:** <https://blogs.upm.es/romerin/>

**Descripción:** El objetivo es el desarrollo de un robot escalador con cuatro patas para la inspección 3D de superficies de edificios y otras infraestructuras con habilidades de navegación y sujeción segura. El diseño del robot es modular con la posibilidad de añadir más patas, sensores y/o capacidad de cómputo.



**Título:** VAXAMA – Automatización y digitalización del control de mezclas asfálticas mediante técnicas no destructivas y análisis de imagen

**Entidades:** CHM, CENIEH, NOVADEP, CTON

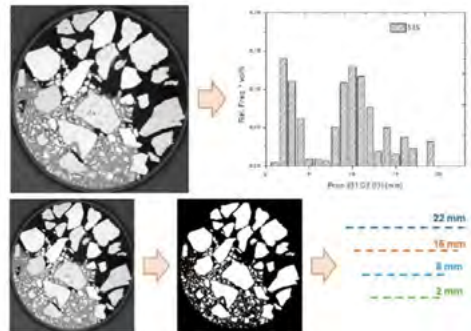
**Financiador:** CDTI – Red PIDI

**Fecha:** 2023–2025

**Palabras clave:** Tomografía, rayos X, análisis de imágenes, ensayos no destructivos, mezclas asfálticas

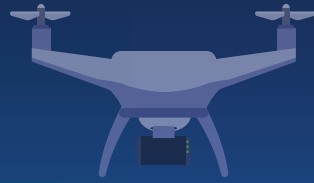
**web:** <https://chm.es/en/proyecto-vaxama-innovacion-y-sostenibilidad/>

**Descripción:** El proyecto desarrolla una metodología para automatizar el control de producción de mezclas bituminosas mediante el uso combinado de tomografía de rayos X y visión artificial. La técnica permite analizar la estructura interna sin destruir la muestra, aplicando segmentación basada en inteligencia artificial para identificar áridos, huecos y betún, y cuantificar su distribución en 2D y 3D.









2026

