

## CONSTRUCCIÓN SUBTERRANEA ROBOTIZADA

Santiago Martínez de la Casa<sup>1</sup>, Carlos Balaguer<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Universidad Carlos III de Madrid, Leganés, España, [scasa@ing.uc3m.es](mailto:scasa@ing.uc3m.es)

<sup>2</sup> Universidad Carlos III de Madrid, Leganés, España, [balaguer@ing.uc3m.es](mailto:balaguer@ing.uc3m.es)

### Resumen

Las obras civiles para la instalación de infraestructuras de servicio a cielo abierto tienen un enorme impacto en el entorno urbano y la vida cotidiana de las personas en las ciudades, ya que producen contaminación, congestiones de tráfico, desvíos peatonales, etc. Las tecnologías de Perforación Direccional Horizontal constituyen una alternativa para ejecutar este tipo de obra sin necesidad de abrir zanjas. Pero las tecnologías existentes tienen tres limitaciones fundamentales: escasa maniobrabilidad (solo trayectorias rectas), ausencia de percepción en tiempo real del entorno subterráneo y operación sin autonomía real. El robot BADGER, desarrollado por el RoboticsLab de la Universidad Carlos III de Madrid, es el primer prototipo de robot de perforación que trata de solventar esta problemática.

El proyecto ROBOSUB pretende avanzar en el desarrollo del robot BADGER para mejorar su diseño y ampliar sus capacidades. La experiencia previa demostró que el desconocimiento del entorno subterráneo es el principal obstáculo para el desarrollo y aplicación del robot. Por ello la tarea principal de realizada en el proyecto es mejorar el conocimiento acerca del entorno subterráneo. La aplicación de inteligencia artificial a datos obtenidos durante pruebas geofísicas en un banco de pruebas en laboratorio aporta información útil para mejorar el diseño del robot, la navegación subterránea y la operación global del sistema.

**Palabras Clave:** construcción subterránea, robótica, perforación direccional horizontal

### 1 Introducción

La construcción es un sector clave para las economías de la Comisión Europea y del Gobierno de España. El PIB de España en 2024 fue de 1.45 B€, donde el sector de la construcción representó un volumen del 5,7% del PIB (2020) [1], situándose por encima de sectores tan importantes como las telecomunicaciones (4,0%) o la agricultura (3,0%), según los datos del INE. Diferentes iniciativas se han promovido desde las instituciones para cumplir diferentes objetivos de desarrollo del sector, pero siempre fomentando la sostenibilidad, la digitalización (Ciudades Inteligentes [2]), y la mejora medioambiental. Esto ha sido plasmado en diferentes estrategias como el Pacto Verde Europeo [3,4], la Agenda Urbana [5], o la Estrategia Europea para la Transición Digital [6].

El uso del espacio subterráneo puede ayudar a las ciudades a cumplir estas estrategias manteniendo su compactidad. Es importante encontrar el espacio necesario para incluir las tecnologías futuras esperadas en el paisaje urbano existente. En muchos casos, las soluciones subterráneas a los problemas urbanos solo se consideran cuando se han agotado todas las demás opciones (sobre rasante) [7]. Además, la utilización del subsuelo es un concepto clave para crear una infraestructura completamente nueva para la era digital de Europa, que necesita una infraestructura mucho más rápida y fiable que las antiguas redes de cobre.

Dentro del sector de la construcción, la obra civil urbana para la construcción y mejora de redes (suministro de agua, telecomunicaciones, saneamiento, etc.) es una de las actividades con más impacto sobre la actividad diaria en las ciudades y la vida de sus ciudadanos. Los principales

efectos adversos que se pueden citar son la contaminación, de diversa índole y origen, y las molestias para el desarrollo de una actividad humana normal y segura. La Figura 1 ilustra las consecuencias que acarrea este tipo de obras que consisten en i) contaminación del aire (el polvo de construcción se clasifica como PM10, partículas de 10 micras de diámetro, invisibles a simple vista), ii) contaminación del agua (inundaciones superficiales con gasóleo y aceite, productos químicos tóxicos y materiales de construcción como el cemento), iii) contaminación acústica (vehículos, maquinaria pesada y operarios), y iv) molestias a los ciudadanos (atascos de tráfico, congestión de calles por obras en zanjas).

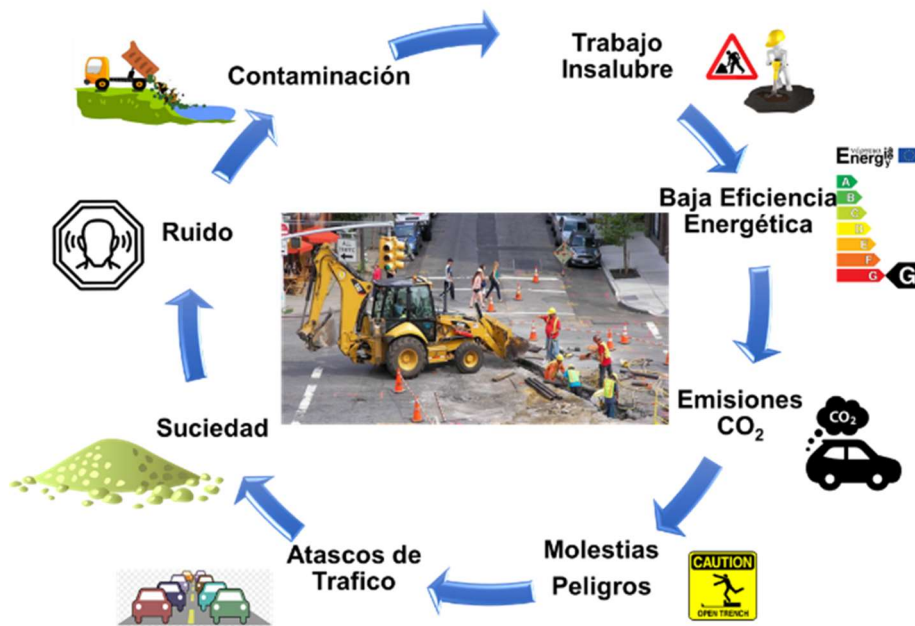


Figura 1. Problemas de la excavación tradicional con zanja

Para mitigar los inconvenientes mencionados la solución más innovadora es aumentar el nivel de construcción subterránea con tecnologías de construcción sin zanja. El método tradicional de acceso al espacio subterráneo urbano ha sido la excavación a cielo abierto. Sin embargo, esta técnica requiere la excavación de grandes superficies e implica la destrucción de la infraestructura civil superficial, además de los problemas mencionados anteriormente. Como resultado, en la mayoría de los casos, la excavación a cielo abierto no es una solución óptima para el acceso y la utilización sistemática del subsuelo. De hecho, este ha sido uno de los principales obstáculos para la instalación generalizada de redes de fibra óptica.

Por este motivo, en los últimos 30 años han surgido muchas nuevas tecnologías de excavación subterránea que permiten la instalación, sustitución o reparación de servicios o conductos subterráneos sin necesidad de excavar una zanja continua desde la superficie [8,9]. Estas se denominan métodos de tecnología sin zanja de Perforación Direccional Horizontal (HDD de sus siglas en inglés) y se refieren generalmente a tecnologías a escala de servicios urbanos, más que a grandes instalaciones de túneles ferroviarios, de metro o de carretera. Las tecnologías HDD existentes están en su mayoría limitadas a la realización de trayectorias en línea recta (o curvas de escasa curvatura en largas distancias). Por lo tanto, su maniobrabilidad y espacio de trabajo están severamente limitados, y su aplicabilidad se reduce a la instalación de conductos rectos [10]. De este modo, podemos clasificar los métodos de perforación sin zanjas en orientables y no orientables, tal y como se muestra en la Figura 2.

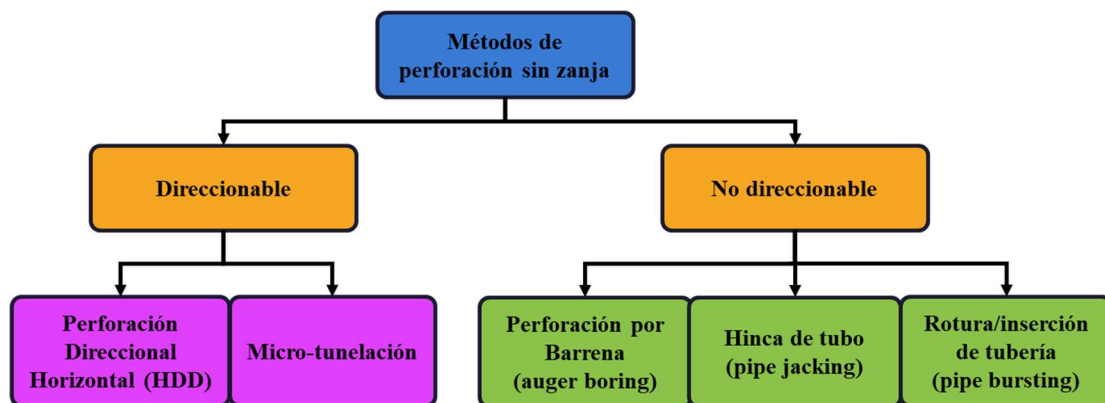


Figura 2. Métodos de perforación sin zanja, adaptado de [11]

Estas tecnologías y métodos se utilizan principalmente para cruzar por debajo de vías de ferrocarril, calles y carreteras, aguas interiores, ríos, canales e infraestructuras con escasas instalaciones bajo ellas. La tecnología existente no dispone de suficiente movilidad y maniobrabilidad, no puede detectar ni esquivar obstáculos y, por lo tanto, está limitada a trayectorias simplistas. Además, estas herramientas carecen totalmente de capacidad para realizar cualquier tarea en el subsuelo que no sea la perforación.

La tecnología inteligente capaz de navegar por el subsuelo y realizar tareas constructivas aún no existe comercialmente. Por lo tanto, existe una necesidad no cubierta de mecanismos y herramientas inteligentes que permitan llevar a cabo una serie de tareas constructivas en el subsuelo sin necesidad de excavaciones a cielo abierto. Entre las tecnologías en desarrollo, los sistemas de perforación robotizados consistentes en máquinas de micro-tunelación inteligentes y dirigibles constituyen una vía prometedora para resolver los desafíos futuros establecidos en la Agenda Urbana. Por ello surgió el proyecto ROBOSUB para avanzar en el desarrollo de este tipo de tecnologías y contribuir a la mitigación del cambio climático y la mejora de las infraestructuras que mejoren la economía y sociedad digitales.

El proyecto ROBOSUB representa un salto disruptivo con respecto a los resultados obtenidos en el proyecto europeo BADGER (ICT-25-2016-2017) [12]. Este proyecto europeo se centró en el desarrollo de un nuevo paradigma de construcción subterránea sin zanjas mediante la creación de un concepto tecnológicamente novedoso de Sistema Robótico Subterráneo Inteligente y Autónomo, con un Nivel de Madurez Tecnológica TRL 4. El principal resultado fue el primer prototipo de robot subterráneo BADGER [13], ideado para realizar perforaciones de forma autónoma, excavar redes de túneles de pequeño diámetro bajo tierra y construir infraestructuras de servicios complejas. El sistema de perforación robotizada es capaz de localizarse en el entorno subterráneo, mapear y comprender el entorno circundante por el que debe desplazarse. No obstante, existen muchos retos que resolver en el desarrollo y uso del robot BADGER (mayor robustez, adaptación al subsuelo, mayor nivel de inteligencia y autonomía, etc.). Estos retos son los que ha afrontado el proyecto ROBOSUB. En este artículo se describen los trabajos realizados para resolver los desafíos relacionados con el movimiento a través del entorno subterráneo.

## 2 Retos tecnológicos existentes en la perforación Direccional Horizontal robotizada

Las tecnologías de perforación están lejos de estar robotizadas y completamente automatizadas. Su operación suele ser semiautomática y sigue dependiendo de la experiencia humana. Existen muy pocos enfoques para el desarrollo de una máquina de tunelización completamente robotizada. Casi todos provienen de proyectos de investigación orientados a utilizar estas máquinas en entornos espaciales, como la excavación de Marte o la Luna para estudiar el subsuelo con fines

científicos. En esta sección se presentan cuatro ejemplos de sistemas robóticos embebidos. Todos utilizan propulsión biomimética para perforación vertical, pero ninguno de ellos es capaz de realizar una perforación direccional horizontal, que es uno de los principales logros del robot BADGER presentado.

## 2.1 Sistemas existentes

Algunos precedentes relevantes, entre otros, se pueden observar en la Figura 3. Todos comparten el uso de propulsión biomimética para perforación, pero carecen de las capacidades que definen la HDD robotizada: dirección activa en 3D, detección de obstáculos en tiempo real y navegación autónoma.



Figura 3. (1) JAXA drilling robot [Mizushina et al., 2015], (2) NASA drilling robot [Kuhlman et al., 2010], (3) Prototipo de la Universidad Case Western Reserve dentro del Proyecto GOPHURRS

El robot de excavación en superficie lunar con sistema de arrastre peristáltico (DMC) por la Agencia Espacial Japonesa (JAXA) es el primer ejemplo procedente del ámbito de las tecnologías espaciales [14], mostrado en la Figura 3 (1). Este sistema no tiene capacidad de dirección y, por lo tanto, no puede realizar perforaciones direccionales. El robot de perforación mostrado en la Figura 3 (2) es el segundo ejemplo de tecnología espacial. Es capaz de operar en entornos peligrosos, utilizando propulsión peristáltica biomimética desarrollada por la NASA en 2010 [15]. El sistema de perforación está compuesto por una cabeza cónica con una broca ultrasónica piezoeléctrica, siendo el primer enfoque en el que la perforación ultrasónica se aplicó para pulverizar roca dura o minerales compactos. No dispone de sensores ni capacidad de dirección. El último caso expuesto en la Figura 3 (3) es un prototipo de sistema de movimiento biomimético para el desarrollo de un robot de perforación, desarrollado por la Universidad Case Western Reserve, dentro del programa GOPHURRS (Grid Overhaul with Proactive, High-Speed Undergrounding for Reliability, Resilience, and Security) para la simplificación de la instalación de líneas eléctricas de medio voltaje [16].

## 2.2 Barreras para el uso de robots de perforación

Las barreras fundamentales que impiden el uso generalizado de las tecnologías para realizar trabajos de excavación subterránea sin zanja pueden resumirse como sigue:

### 2.2.1 Capacidades de maniobra limitadas

Las tecnologías HDD existentes carecen de maniobrabilidad, lo que limita las trayectorias de perforación a líneas rectas o, como máximo, arcos superficiales de gran radio de curvatura en largas distancias (útiles solo para excavar largas distancias curvas bajo ríos, etc.), ofreciendo en la práctica tecnología para un espacio de trabajo 1D. Sin trayectorias curvas, no es posible construir grandes infraestructuras subterráneas topográficamente complejas. Además, sin

maniobrabilidad no puede ejecutarse ninguna navegación autónoma, ya que el dispositivo no puede implementar el movimiento necesario para seguir el trazado deseado.

### 2.2.2 Capacidades de percepción y mapeo del entorno reducidas

La presencia de obstáculos, como objetos y servicios enterrados, requiere que una máquina de tunelación HDD los evite dependiendo de las condiciones del terreno. Los dispositivos existentes carecen de localización y mapeo en tiempo real de objetos enterrados, por lo que no pueden ser evitados a menos que el entorno sea totalmente conocido de antemano y las condiciones durante la perforación sean totalmente predecibles.

### 2.2.3 Capacidad de autonomía de movimiento y percepción

Las tecnologías HDD existentes carecen de control realimentado y seguimiento de trayectorias. Por ello, en la mayoría de los casos operan en modo de lazo abierto, donde cualquier realimentación y compensación de movimiento, en caso de ser posible, la realiza un operador humano con una información limitada. Esto usualmente incrementa el coste de operación y el tiempo de realización del trabajo de perforación.

## 2.3 El robot de perforación BADGER

El robot de perforación BADGER (Figura 4) es la base de trabajo del proyecto ROBOSUB, introducido en la Sección 1. Este prototipo de robot de perforación único de su clase y su sistema de operación fueron el principal resultado del proyecto europeo BADGER.



Figura 4. Robot BADGER

El sistema fue probado en entornos reales y los datos extraídos sirvieron para analizar las bondades y debilidades del sistema. La principal conclusión del análisis de las actividades realizadas fue que la falta de información sobre el entorno de perforación provocaba inexactitudes en la planificación, navegación y control del robot, así como daños en el sistema causados por la interacción del robot con el terreno desconocido.



Figura 5. Pruebas de perforación en Alemania (izquierda) y España (derecha)

Por ello, el proyecto ROBOSUB ha tratado de dotar al sistema de elementos que mejoren la captación de información, el uso inteligente de los datos obtenidos y la aplicación del análisis de estos datos en el diseño para hacer más robusto y operativo al sistema.

### 3 Soluciones ROBOSUB

#### 3.1 Conocimiento del subsuelo

En cualquier trabajo de perforación es muy importante el conocimiento de las características principales del subsuelo. En obras de gran diámetro se realizan catas y estudios para modelar el subsuelo a lo largo de la trayectoria que va a seguir la máquina. Esto permite configurar la máquina y los parámetros de perforación para realizar el trabajo de forma correcta. Sin embargo, esta metodología es imposible de aplicar en trabajos de perforación HDD de pequeño diámetro. En este tipo de trabajos, o bien se tienen estimaciones, o bien se desconoce la situación del subsuelo. Sin embargo, la interacción entre el entorno y la máquina es crítica, ya que este tipo de sistemas tienen muchas limitaciones funcionales (potencia, tamaño, etc.) y un pequeño problema puede hacer que no se pueda llevar a cabo la tarea completa. La caracterización del subsuelo para aplicaciones HDD se ha beneficiado significativamente del uso de inteligencia artificial y técnicas de aprendizaje automático. Estas herramientas permiten un análisis eficiente y preciso de grandes volúmenes de datos geofísicos, superando a los métodos tradicionales [17,18].

Existen diversos métodos tradicionales para obtener datos y determinar características del subsuelo, como son los estudios de la resistividad eléctrica (ERT) y la velocidad sísmica (SRT). El análisis de los datos permite clasificar el tipo de suelo, el contenido de agua o la presencia mineral específica. Estos resultados son potenciados y automatizados mediante la aplicación de algoritmos de inteligencia artificial. Las redes neuronales convolucionales (CNN) analizan imágenes geofísicas (por ejemplo, GPR) para detectar cavidades, estratos o tuberías [19]. Los modelos bayesianos y los métodos de Monte Carlo permiten evaluar la incertidumbre en las predicciones del terreno, lo cual es crucial en entornos urbanos con alta variabilidad geológica [20]. Son claras las ventajas de la inteligencia artificial en la modelización subterránea: mejora la resolución y precisión de los modelos geológicos 3D, reduce el tiempo de interpretación y la dependencia de expertos, permite la detección automática de anomalías y zonas problemáticas para la perforación, facilita la integración de datos geofísicos multifuente y mejora la eficiencia operativa y la seguridad en entornos urbanos complejos.

El proyecto ROBOSUB combina las técnicas de análisis de datos obtenidos con métodos superficiales con la integración de sistemas en el robot BADGER para mejorar el conocimiento del entorno subterráneo. Los métodos tradicionales permiten obtener un conocimiento preliminar que posteriormente es verificado y mejorado con la nueva metodología propuesta. Dadas las características del robot, es posible instalar sistemas de detección que, combinados con emisores superficiales, permitan obtener más y mejores datos del subsuelo. El robot instala en su cabeza de perforación dispositivos GPR que permiten captar información del entorno cercano. Por otro lado, su diseño permite la instalación de receptores y emisores en su estructura que, combinados con sistemas externos, permitan mejorar la calidad y cantidad de los datos.

Para estudiar y desarrollar esta metodología se están desarrollando trabajos para la aplicación de algoritmos inteligentes en el modelado del subsuelo. Se ha montado un escenario de prueba en laboratorio para aplicar diferentes señales y obtener datos del terreno. Se pueden aplicar gran variedad de configuraciones de terreno, incluir diferentes objetos enterrados e incluso colocar un robot a escala con sensores y emisores. El análisis de los datos obtenidos permitirá mejorar el conocimiento del subsuelo y, con ello, mejorar el diseño y operación del robot BADGER.

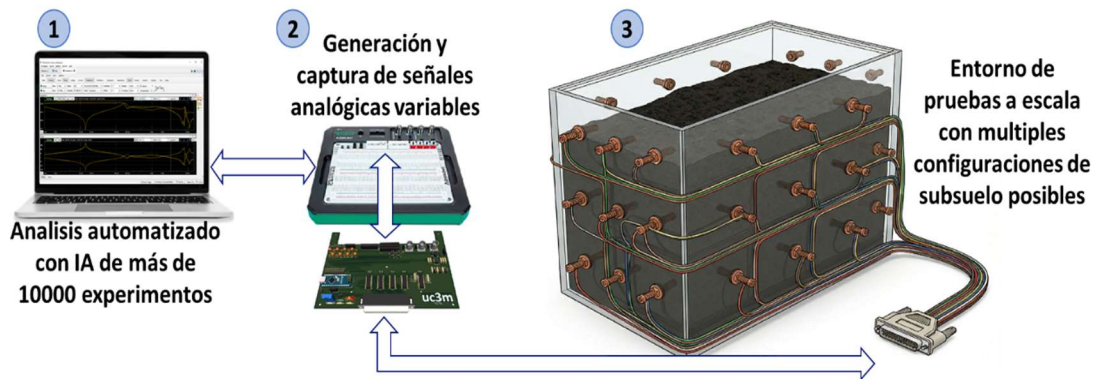


Figura 6. Entorno para la obtención de datos de terrenos

### 3.2 Navegación subterránea

#### 3.2.1 Sistema de navegación autónoma (uSLAM)

La navegación de un dispositivo robótico en el subsuelo es una tarea que depende de múltiples factores. En el proyecto ROBOSUB se continúa con el desarrollo del concepto de Localización y Mapeo Simultáneos Subterráneos (uSLAM) presentado en (Vartholomeos et al., 2021). Este algoritmo desarrollado permite localizar un sistema robótico subterráneo autónomo y mapear su entorno, basando su funcionamiento en la implementación de un Filtro de Partículas Rao-Blackwellized (RBPF), con la información proporcionada por el sistema GPR instalado en el robot, y los datos de odometría. RBPF genera posibles trayectorias, donde cada una tiene su mapa de cuadrícula de ocupación en el espacio subterráneo 3D, y se aplica un método de emparejamiento con datos de grupos de mediciones GPR para mejorar las trayectorias propuestas.

Este método crea un mapa del entorno subterráneo que puede utilizarse para tareas de navegación y evitación de obstáculos. Unido al modelado al trabajo de modelado descrito en la Sección 3.1, las capacidades de desplazamiento del robot BADGER serán mejoradas.

#### 3.2.2 Aplicación de planificación y control (uMAPS)

La operación del robot BADGER se cimienta en el desarrollo de una aplicación que habilita la planificación, la navegación y el control del funcionamiento en todos los niveles. En el proyecto ROBOSUB se ha mejorado la aplicación de control del robot BADGER. La arquitectura desarrollada permite integrar datos GIS (Geographic Information System) que se emplean para la planificación de trayectorias y tareas, localización y seguimiento del robot y mapeo el subsuelo que se utiliza para verificar y mejorar la información existente. También integra los algoritmos de control de bajo nivel del robot y un entorno de simulación para probar estos algoritmos. La Figura 7 muestra una visión general de la arquitectura del sistema con los componentes principales y subcomponentes. El sistema consta de tres módulos principales: i) aplicación web GIS; ii) Módulo de gestión de mapas; y iii) Sistema robótico BADGER.

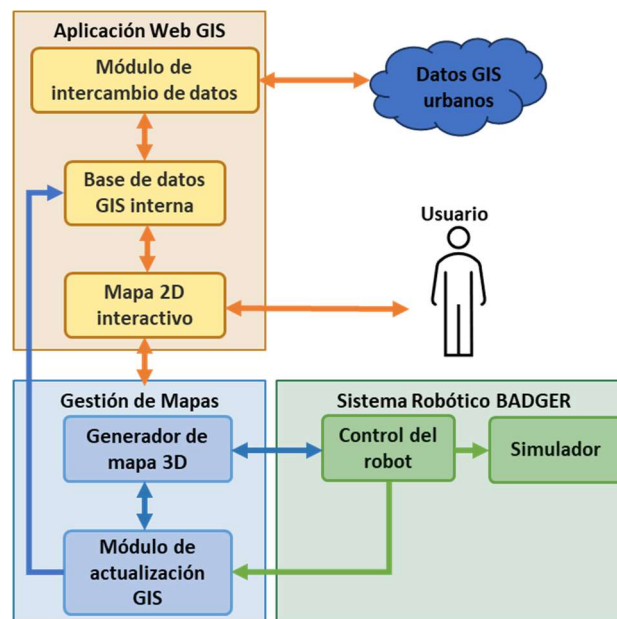


Figura 7. Arquitectura simplificada de la aplicación uMAPS

La operación de la aplicación uMAPS comienza con la selección por parte del usuario de un área de trabajo, un punto de entrada y un punto de salida del robot. Esta selección se realiza en un mapa 2D que se intercambia información con una base de datos GIS interna que, a su vez, interactúa con sistemas GIS urbanos externos. A partir de la información 2D del subsuelo se reconstruye un entorno 3D que se utiliza para la planificación de la trayectoria del robot, rellenando las partes faltantes de los datos. La trayectoria planificada se envía al módulo de control del robot que puede ejecutarse en el robot real o simularse para su verificación. Tanto el robot real como el simulado poseen sensores que detectan obstáculos. Esta información puede ser utilizada para la actualización de la información GIS de las fuentes externas públicas.

### 3.3 Movimiento robusto

El sistema de propulsión del robot BADGER está basado en un actuador hidráulico compuesto por un sistema de seis cilindros de empuje bidireccionales que permiten el avance y el direccionamiento del robot. Este sistema es muy complejo, voluminoso, pesado y que requiere mucha energía para generar la potencia hidráulica suficiente para obtener el empuje necesario en la perforación y, a la vez, auto-transportar el sistema mecánico del robot. Esta potencia se cifró en un mínimo de 4000N para perforar en terrenos arcillosos durante el desarrollo del proyecto BADGER. Estas características, unidas al reducido tamaño del robot, hacen que este sistema de movimiento del robot no sea robusto y cause múltiples problemas durante el control de la operación de perforación.

Con estas premisas, se ha desarrollado en el proyecto ROBOSUB un novedoso concepto de actuador basado en hilos de Aleación con Memoria de Forma (SMA de sus siglas en inglés) para el desplazamiento de objetos pesados y alto desplazamiento (patente pendiente). Los actuadores basados en SMA ofrecen numerosas ventajas en el diseño de actuadores robóticos, como un tamaño compacto, una alta relación potencia/peso y un funcionamiento silencioso. Por el contrario, tienen un desplazamiento de entre el 8% y el 4% del total de la longitud del hilo y una dinámica lenta.

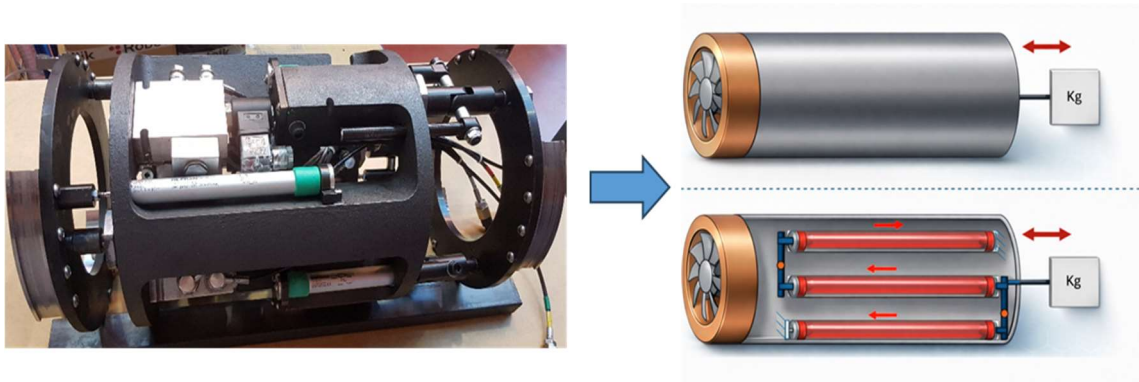


Figura 8. Articulación original del robot BADGER (izquierda) y modelo del prototipo de articulación basada en SMA (derecha)

Para el verificar el concepto de actuador se ha realizado un banco de pruebas experimental para testear diferentes configuraciones que permitan generar al menos 4000N con un desplazamiento máximo de 100mm. Este banco permite probar diferentes configuraciones mecánicas del actuador y configuraciones variables de los cables SMA [21]. Además, consta de sistemas de generación de carga y sensorización para realizar los test y extraer datos que permitan diseñar el actuador. En la Figura 9 se puede ver el modelo del banco de pruebas construido donde (1) y (3) son los hilos SMA de avance, (2) sistema de multiplicación de movimiento, (4) sensor de posición, (5) hilo de recuperación de SMA y (6) sistema de generación de carga y sensorización de fuerza.

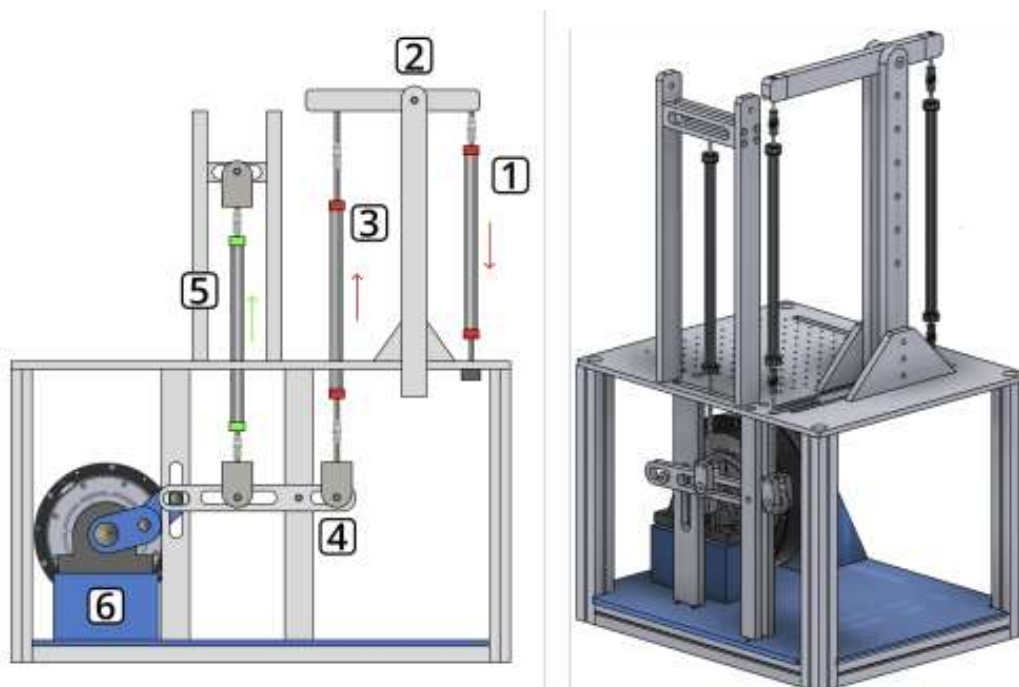


Figura 9. Banco de pruebas del actuador basado en SMA para el robot BADGER

## 4 Conclusiones

El proyecto ROBOSUB ha supuesto un avance significativo en el desarrollo de sistemas robóticos autónomos para la construcción subterránea sin zanja, abordando las limitaciones fundamentales identificadas en el robot BADGER y en las tecnologías HDD existentes.

Los trabajos realizados han permitido avanzar en tres líneas tecnológicas complementarias que, en conjunto, dotan al sistema de una mayor capacidad de operación autónoma en entornos subterráneos urbanos complejos. En primer lugar, la integración de técnicas de inteligencia artificial para la caracterización del subsuelo para mejorar sustancialmente el conocimiento previo del entorno de perforación, reduciendo la incertidumbre y los riesgos operativos. Derivado de este primer objetivo, los módulos que habilitan la operación del robot, así como su propio diseño han podido ser mejorados. En primer lugar, el sistema de navegación subterránea basado en el algoritmo uSLAM y la aplicación de planificación y control uMAPS constituyen parte de una arquitectura que permite al robot operar con un nivel de autonomía hasta ahora no alcanzado en sistemas HDD de pequeño diámetro. En segundo lugar, el nuevo concepto de actuador basado en aleaciones con memoria de forma (SMA) abre una vía prometedora para dotar al sistema de un mecanismo de propulsión más compacto, robusto y eficiente energéticamente que el sistema hidráulico original, aunque su validación experimental completa constituye aún un trabajo en curso.

Los resultados obtenidos sitúan al sistema en un nivel de madurez tecnológica superior al TRL 4 alcanzado en el proyecto BADGER, acercando la tecnología de perforación direccional horizontal robotizada a una aplicación práctica en entornos urbanos reales. No obstante, persisten retos pendientes relacionados con la integración completa de los subsistemas desarrollados, la validación en condiciones de campo más exigentes con diferentes tipos de suelo.

En términos de impacto, las tecnologías desarrolladas en ROBOSUB contribuyen directamente a los objetivos de la Agenda Urbana Europea y el Pacto Verde, al reducir la necesidad de excavación a cielo abierto y sus consecuentes efectos sobre la contaminación, la congestión del tráfico y la perturbación de la actividad ciudadana. El trabajo futuro se orientará hacia la integración y validación conjunta de todos los módulos desarrollados, con el objetivo de demostrar la operación autónoma completa del sistema en un entorno subterráneo urbano real.

## 5 Referencias

- [1] Spain PIB Data. Recuperado 20/05/2026, de <https://datosmacro.expansion.com/pib/espana?anio=2024>
- [2] Smart cities | European Commission. Recuperado 20/05/2026, de [https://ec.europa.eu/info/eu-regional-and-urban-development/topics/cities-and-urban-development/city-initiatives/smart-cities\\_en](https://ec.europa.eu/info/eu-regional-and-urban-development/topics/cities-and-urban-development/city-initiatives/smart-cities_en)
- [3] Pollution From Construction - Sustainable Build. Recuperado 20/05/2026, de <https://sustainablebuild.co.uk/pollutionfromconstruction/>
- [4] The European Green Deal. Recuperado 20/05/2026, de <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/HTML/?uri=CELEX:52019DC0640&from=ET>
- [5] Urban Agenda for the EU | FUTURIUM | European Commission. (s. f.). Recuperado 28 de diciembre de 2021, de <https://ec.europa.eu/futurium/en/urban-agenda/>
- [6] European Digital transition. Recuperado 20/05/2026, de [https://ec.europa.eu/reform-support/what-we-do/digital-transition\\_en](https://ec.europa.eu/reform-support/what-we-do/digital-transition_en)
- [7] Broere, W. (2016). Urban underground space: Solving the problems of today's cities. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 55, 245-248. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2015.11.012>
- [8] Trenchless Technology: An overview of the Methods. Recuperado 22/05/2026, de <https://www.constrofacilitator.com/trenchless-technology-an-overview-of-the-methods/>
- [9] Archived Design | Iowa Statewide Urban Design and Specifications. (s. f.). Recuperado 14 de enero de 2022, de <https://iowasudas.org/archived-design/>

- [10] Martínez, S., Álvarez, S., & Balaguer, C. (2019). Robot for Autonomous Underground Trenchless Operations, Mapping and Navigation System Handbook (S. Martínez, S. Álvarez, & C. Balaguer, Eds.; First Ed.). Universidad Carlos III de Madrid.
- [11] Zanelidin, E., Al Khatib, O., & Ahmed, W. (2020). Investigating the use of no-dig technologies for underground utilities in developing countries. *Innovative Infrastructure Solutions*, 5(1). <https://doi.org/10.1007/s41062-020-0265-5>
- [12] BADGER | RoBot for Autonomous unDerGround trenchless opERations, mapping and navigation. (s. f.). Recuperado 14 de septiembre de 2020, de <https://www.badger-robotics.eu/>
- [13] Vartholomeos, P., Marantos, P., Karras, G., Menendez, E., Rodriguez, M., Martínez, S., & Balaguer, C. (2021). Modeling, gait sequence design, and control architecture of BADGER underground robot. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 6(2). <https://doi.org/10.1109/LRA.2021.3056068>
- [14] Mizushina, A., Omori, H., Kitamoto, H., Nakamura, T., Osumi, H., & Kubota, T. (2015). Study on Geotechnical Tests with a Lunar Subsurface Explorer Robot Using a Peristaltic Crawling Mechanism. *SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration*, 8(4), 242-249. <https://doi.org/10.9746/JCMSI.8.242>
- [15] Robotic Tunneling Worm for Operation in Harsh Environments. Recuperado 26/05/2026, de [https://www.researchgate.net/publication/228602515\\_Robotic\\_Tunneling\\_Worm\\_for\\_Operation\\_in\\_Harsh\\_Environments/figures?lo=1](https://www.researchgate.net/publication/228602515_Robotic_Tunneling_Worm_for_Operation_in_Harsh_Environments/figures?lo=1)
- [16] Peristaltic Conduit with Stiff Structure and Compliant Skin | ARPA-E. 26/05/2026, de <https://arpa-e.energy.gov/programs-and-initiatives/search-all-projects/peristaltic-conduit-stiff-structure-and-compliant-skin>
- [17] Yang, F., & Ma, J. (2019). Deep-learning inversion: A next-generation seismic velocity model building method. *Geophysics*, 84(4). <https://doi.org/10.1190/geo2018-0249.1>
- [18] Liu, B., Guo, Q., Li, S., Liu, B., Ren, Y., Pang, Y., Guo, X., Liu, L., & Jiang, P. (2020). Deep Learning Inversion of Electrical Resistivity Data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 58(8). <https://doi.org/10.1109/TGRS.2020.2969040>
- [19] Guevara, H. J. P., Barrientos, J. H., Rodríguez, O. D., Guevara, V. M. P., Cárdenas, O. L., & Torres, M. L. D. G. (2017). Estimation of Hydrological Parameters from Geoelectrical Measurements. En *Electrical Resistivity and Conductivity*. <https://doi.org/10.5772/67990>
- [20] Aleardi, M., Vinciguerra, A., & Hojat, A. (2021). A convolutional neural network approach to electrical resistivity tomography. *Journal of Applied Geophysics*, 193. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2021.104434>
- [21] Menocal, J. G., Díaz, S. M. de la C., & Copaci, D. (2025). Diseño de actuadores de alta carga basados en aleaciones con memoria de forma. *Jornadas de Automática*, (46), 46. <https://doi.org/10.17979/JA-CEA.2025.46.12242>