

## Arquitectura de control para robots móviles operando en edificios inteligentes

Torres-Moreno, J. L.<sup>a,\*</sup>, Álvarez-Hervás, J. D.<sup>b</sup>, Muñoz-Rodríguez, M.<sup>b</sup>, Blanco-Claraco, J. L.<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Departamento de Ingeniería, ceiA3, CIESOL, Universidad de Almería, Ctra.Sacramento s/n, La Cañada de San Urbano, Almería, 04120, España

<sup>b</sup>Departamento de Informática, ceiA3, CIESOL, Universidad de Almería, Ctra.Sacramento s/n, La Cañada de San Urbano, Almería, 04120, España

### Resumen

En este trabajo se presenta una arquitectura de control para la navegación autónoma de robots móviles operando en edificios inteligentes, utilizando ROS 2, tecnología de banda ultraancha (UWB) y comunicación MQTT. El sistema propuesto se integra en un edificio que incorpora múltiples componentes, como un sistema de posicionamiento UWB, un servidor OPC UA, un software de monitorización EcoStruxure y un robot móvil equipado con sensores avanzados. La arquitectura permite la comunicación eficiente entre los diferentes subsistemas, facilitando la interoperabilidad y escalabilidad. Se desarrollaron nodos ROS 2 específicos para la integración de datos de localización, adquisición y transmisión de datos y navegación autónoma. Los resultados experimentales, tanto en simulación como en pruebas reales, validan la funcionalidad del sistema, destacando su capacidad para guiar al robot móvil e intercambiar datos con el edificio a través de MQTT. Este trabajo contribuye por tanto al desarrollo de soluciones avanzadas para la automatización y gestión eficiente de edificios inteligentes.

*Palabras clave:* Robots móviles, Sistemas robóticos autónomos, Navegación guiada y control, Robots móviles autónomos, Sistemas de posicionamiento

### Control architecture for mobile robots operating in smart buildings

#### Abstract

This work presents a control architecture for the autonomous navigation of mobile robots operating in smart buildings, using ROS 2, ultra-wideband (UWB) technology, and MQTT communication. The proposed system is integrated into a building that incorporates multiple components, such as a UWB positioning system, an OPC UA server, EcoStruxure monitoring software, and a mobile robot equipped with advanced sensors. The architecture allows efficient communication between the different subsystems, facilitating interoperability and scalability. Specific ROS 2 nodes were developed for the integration of localization data, data acquisition and transmission, and autonomous navigation. Experimental results, both in simulation and real tests, validate the system's functionality, highlighting its ability to guide the mobile robot and exchange data with the building via MQTT. This work thus contributes to the development of advanced solutions for the automation and efficient management of smart buildings.

*Keywords:* Mobile robots, Autonomous robotic systems, Guidance navigation and control, Autonomous Mobile Robots, Positioning Systems

### 1. Introducción

En los últimos años, la navegación de vehículos de guiado automático (AGV del inglés *Automated Guided Vehicles*) y de robots móviles autónomos (AMR del inglés *Autonomous Mobile Robots*) en interiores se ha convertido en un desafío para diversos sectores como: logística, sanidad, fabricación y/o edificios inteligentes. Uno de los métodos más precisos y eficaces para conseguir una navegación fiable en interiores es utili-

zar la tecnología de banda ultraancha (UWB del inglés *ultra-wideband*). A diferencia de los sistemas de posicionamiento tradicionales, como un sistema de posicionamiento global (GPS del inglés *Global Positioning System*) que tienen dificultades en entornos cerrados, la UWB permite proporcionar una localización de alta precisión que mejora la eficiencia y la autonomía de los AMR que operan en interiores. Entre otras ventajas, cabe destacar que el uso de UWB para el guiado de AMR en interiores permite una alta precisión y exactitud, un posicionamiento

\*Autor para correspondencia: jltmoreno@ual.es

del robot en tiempo real con baja latencia, una alta eficiencia energética debido al bajo consumo de los dispositivos basados en UWB comparados con otras tecnologías de posicionamiento o su escalabilidad.

En la literatura es posible encontrar trabajos donde ya se aplica esta tecnología al guiado de robots móviles. Por ejemplo, en Lin and Yeh (2022) se utiliza la localización y mapeo visual simultáneos (vSLAM del inglés *visual Simultaneous Localization And Mapping*) para posicionamiento del robot móvil. Siendo ésta una técnica que puede perder precisión en interiores amplios integra la tecnología UWB para utilizar la restricción global del posicionamiento UWB y reducir los errores locales acumulados de la localización mediante vSLAM basada en el filtro de Kalman extendido (EKF del inglés *Extended Kalman Filter*). Por otro lado, en Liu et al. (2021) se fusionan la tecnología UWB con LiDARs 2D para mejorar la calidad del mapeado de un robot móvil. En este enfoque primero se utiliza la información proporcionada por la tecnología UWB y la odometría para optimizar la trayectoria para, posteriormente, incorporar los cierres de bucle basados en LiDAR para mejorar la precisión de la estimación de esta trayectoria. Finalmente, la trayectoria optimizada se combina con escaneos mediante LiDAR para producir el mapa de ocupación del entorno. Por último, en Bach et al. (2024) se usan dos módulos UWB en el robot móvil autónomo para estimar, simultáneamente, tanto la posición como el ángulo de rumbo, lo que puede resolver el problema de la acumulación de errores que se produce con el tiempo en los sensores internos. Para realizar esta estimación se propone un nuevo algoritmo basado en el EKF denominado filtro de Kalman ampliado con restricción de línea de base (BC-EKF). En los anteriores trabajos citados se puede observar que la tecnología UWB se puede utilizar para el guiado de robot móviles bien sea de manera individual o en conjunción con otras tecnologías, este último supuesto es el más habitual. Para el lector interesado, en Zhang et al. (2023) se puede encontrar una ampliación revisión sobre el estado del arte de AGVs y AMRs, con resultados de diferentes áreas de investigación pasadas y presentes incluyendo, además, una comparación entre varios principios de navegación de los AGV.

El objetivo de este trabajo es guiar a un AMR dentro del interior de un edificio bioclimático, con la finalidad de medir la temperatura interior en distintos recintos y poder obtener un mapa de calor preciso del edificio. El edificio donde el AMR tendrá que desarrollar su tarea es el Centro de Investigaciones de la Energía Solar (CIESOL) situado en el campus de la Universidad de Almería (UAL), ver figura 1. El edificio CIESOL es un centro mixto de la Universidad de Almería y de la Plataforma Solar de Almería (PSA), donde diversos investigadores de ambos centros desarrollan nuevas aplicaciones basadas en la energía solar. El edificio fue específicamente diseñado para el estudio del aprovechamiento de la radiación solar en la edificación. Así, además de laboratorios, equipamientos científicos y plantas piloto, el propio centro es una instalación científica en sí misma CIESOL (2024). Dentro de la vasta red de sensores de la que se dispone en el edificio se encuentra un sistema de localización mediante antenas de UWB (*anchors*) que permiten localizar a unos pequeños dispositivos portátiles (*tags*) que pueden llevar tanto los usuarios del edificio como algún dispositivo móvil que se mueva por el interior del mismo.

En la literatura se pueden encontrar trabajos relacionados con robot móviles en interiores de edificios dedicados a la tarea de medir la temperatura interior u otras variables climáticas. Por ejemplo, en Geng et al. (2022) se desarrolla un sistema de detección móvil basado en robots para monitorizar la temperatura del aire en un edificio. Las medidas recogidas por este sistema de medición móvil se compara con una densa red de sensores estacionaria también instalada en dicho edificio. Aunque el lector interesado puede encontrar en Alinezhad et al. (2024) una completa revisión sobre el estado del arte de la monitorización de variables climáticas por medio de AGVs.



Figura 1: Centro de Investigaciones de la Energía Solar (CIESOL).

Después de esta breve introducción al estado del arte del trabajo desarrollado, y habiendo remarcado el objetivo de este trabajo, el resto de este documento se estructura de la siguiente manera: la sección 2 está dedicada a describir los elementos principales que componen la arquitectura de control en la que deberá integrarse el robot móvil que se pretende emplear para monitorización de variables climáticas. Posteriormente, el código desarrollado en ROS 2 para lograr la integración y control del robot móvil es explicado en detalle en la sección 3. Los principales resultados obtenidos se presentan en la sección 4 para, finalmente, mostrar las principales conclusiones obtenidas en la sección 5.

## 2. Elementos integrados en la arquitectura de control del edificio

En esta sección se describe la arquitectura de comunicaciones entre los diferentes dispositivos conectados en la red de sensores y actuadores distribuidos por todo el edificio CIESOL. La arquitectura está diseñada para permitir la integración de múltiples dispositivos y la transmisión eficiente de datos entre ellos. Se utilizan protocolos de comunicación estándar y tecnologías de red para garantizar la interoperabilidad y la escalabilidad del sistema. Gracias a este diseño ha sido posible la integración del robot móvil, tal y como se detallará más adelante. A continuación se describen los diferentes componentes de la arquitectura.

### 2.1. Sistema de posicionamiento UWB

Se trata de un sistema de localización en tiempo real (RTLS) que utiliza balizas UWB para determinar la posición de usuarios y dispositivos móviles dentro del edificio. Como se ha comentado en la introducción, una de las líneas de investigación

que se llevan a cabo en el edificio CIESOL está relacionada con el confort térmico, para lo cual se requiere de información acerca del nivel de ocupación de las diferentes estancias del edificio. Es por ello que, para la realización de experimentos, los usuarios portan un tag de localización. La señal procedente de todos los tags es gestionada por el software RTLS de Sewio, que ofrece una API a partir de la cual se pueden obtener las coordenadas de los tags mediante peticiones en REST, WebSocket, UDP o incluso SQL. Como se mostrará más adelante, se hará uso de la API WebSocket para la obtención de las coordenadas de los tags, que serán empleadas en el sistema de localización del robot móvil. En la figura 2 se muestra una del mapa de localización correspondiente a la primera planta del edificio.



Figura 2: Distribución de sensores y receptores de localización en la primera planta del edificio CIESOL.

## 2.2. Servidor OPC UA

Para poder implementar los algoritmos avanzados de control desarrollados en el centro de investigación CIESOL es necesario establecer la comunicación entre los entornos de programación y los autómatas. Para este propósito se utiliza KEPServerEX de Kepware, que es una plataforma de conectividad industrial que utiliza el protocolo OPC UA para integrar y comunicar datos de PLCs y otros dispositivos en tiempo real. Este software permite la recopilación segura y fiable de datos, facilitando la interoperabilidad entre diferentes sistemas y protocolos.

## 2.3. Software de monitorización EcoStruxure

El software EcoStruxure de Schneider Electric permite la supervisión y control centralizado de sistemas del edificio, como el sistema de climatización, o de iluminación, además de gestionar el consumo de energía en tiempo real. Facilita la visualización de datos y la creación de dashboards personalizados, permitiendo tomar decisiones informadas para mejorar la eficiencia energética y operativa. También gestiona alarmas y eventos críticos, asegurando una respuesta rápida a problemas.

Además, integra los datos de sensores y PLCs utilizando el protocolo BACnet, lo que posibilita la recopilación y análisis en tiempo real de las señales y consumos del edificio

## 2.4. Capa superior de control y supervisión

Esta es la capa superior de la arquitectura de control, en la que se utilizan lenguajes de alto nivel como MATLAB para la implementación de algoritmos de gestión eficiente de la energía y control térmico, optimizando el rendimiento del edificio. Estos algoritmos se comunican con los PLCs mediante OPC. Además, se realizan copias de seguridad de todos los datos y se emplean técnicas de análisis predictivo basadas en históricos, lo que permite anticipar tendencias y mejorar la eficiencia operativa y energética del sistema. En esta capa también es posible la configuración de un broker centralizado que integre todos los sensores del edificio, permitiendo la comunicación vía MQTT.

## 2.5. Robot móvil

El robot móvil Summit de Robotnik, con dirección doble Ackerman, ha sido equipado con un Lidar Hokuyo y una tarjeta de adquisición de datos (DAQ) Labjack U3 que permite leer los datos de un sensor de temperatura de tipo PT100. Incorpora un tag que permite su localización por medio del sistema UWB, denominado tag 36. Además, se ha modernizado su ordenador de a bordo y actualizado a ROS 2, lo que permite implementar todos los nodos que serán descritos en la siguiente sección sin necesidad de un computador adicional. Gracias a su conectividad WiFi, el robot puede integrarse en la arquitectura de control, como se mostrará a continuación. En la figura 3 se muestra una imagen del robot empleado.

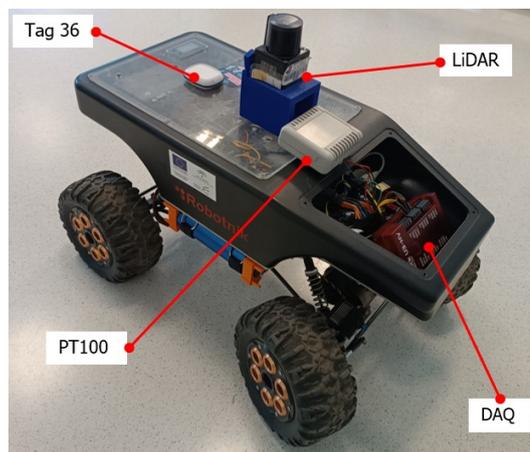


Figura 3: Robot móvil con sensor LiDAR 2D, termopar PT100, tag de localización y tarjeta DAQ.

## 3. Arquitectura ROS 2

En esta sección se describen los nodos principales que componen la arquitectura ROS 2, que permiten la integración del robot móvil en la arquitectura de control principal del edificio CIESOL. En la figura 4 se muestran los nodos y sus interconexiones, cuyos fundamentos son descritos a continuación.

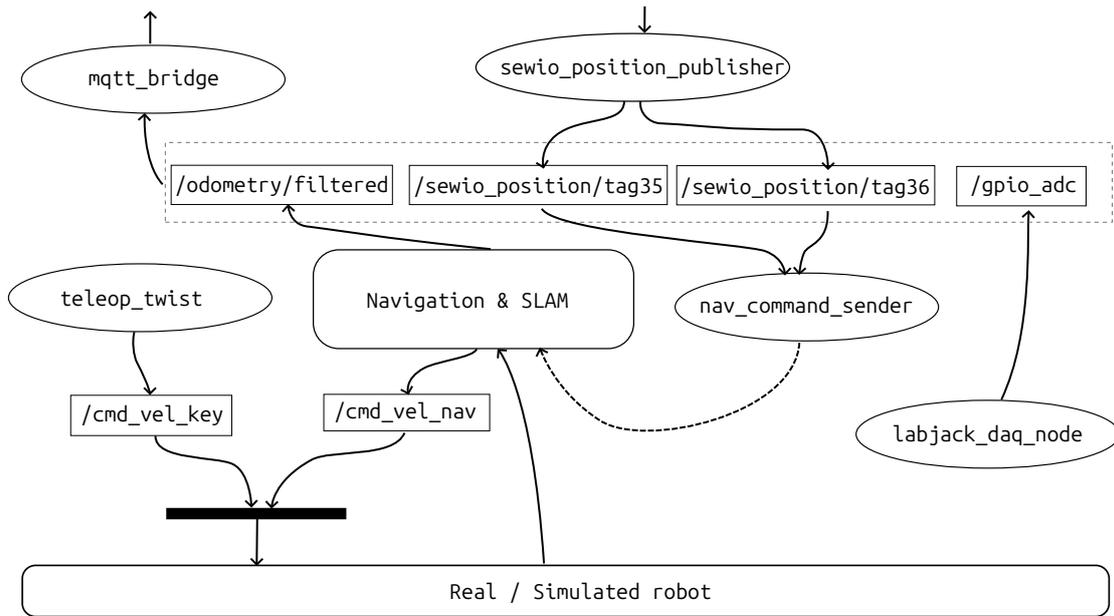


Figura 4: Nodos principales de la arquitectura implementada en ROS 2.

### 3.1. Nodo SewioPositionPublisher

El nodo `SewioPositionPublisher` es un componente desarrollado en ROS 2 que permite recibir y publicar las posiciones de múltiples tags en tiempo real. Este nodo se conecta a un servidor WebSocket para suscribirse a flujos de datos específicos y publica las posiciones de los tags en tópicos ROS 2. A continuación, se describe su funcionamiento.

El nodo utiliza la biblioteca `websocket` para establecer una conexión con un servidor remoto, desde el cual recibe datos de posición de los tags identificadas como “35” y “36”. Estos datos se procesan y se publican en los tópicos `sewio_position/tag35` y `sewio_position/tag36`, respectivamente, utilizando mensajes del tipo `PoseStamped`.

La inicialización del nodo incluye la creación de publicadores para cada tag, la configuración de un temporizador que ejecuta periódicamente la publicación de posiciones y el inicio de un hilo separado para gestionar la conexión WebSocket. Los datos recibidos a través del WebSocket se procesan en un método denominado `on_message`, donde se extraen las coordenadas X e Y y se actualizan las posiciones almacenadas. Posteriormente, una función denominada `publish_positions` publica estas posiciones en los tópicos correspondientes.

El nodo también maneja la conexión WebSocket mediante el método `start_websocket`, que establece la conexión, envía mensajes de suscripción para los tags y gestiona posibles errores o cierres de la conexión. Se trata por tanto de un nodo que actúa como un puente entre un servidor WebSocket y el sistema ROS 2, integrando datos de localización en tiempo real.

### 3.2. Nodo MqttBridge

El nodo `MqttBridge` es un componente desarrollado en Python que actúa como un puente entre el ecosistema ROS 2 y la capa superior de control descrita en la sección 2, utilizando el protocolo MQTT para la transmisión de datos. Su principal objetivo es facilitar la interoperabilidad y la integración de sistemas robóticos en plataformas IoT.

Este nodo se suscribe a varios *topics* de ROS 2, como `/sewio_position/tag35`, `/odometry/filtered` y `/gpio_adc`, para recopilar datos de posición, odometría y sensores analógicos, respectivamente. Los datos recibidos son procesados para transformarlos en coordenadas absolutas o en estructuras organizadas, como señales de sensores. Posteriormente, esta información se publica en un broker MQTT en formato JSON, permitiendo su uso en plataformas IoT como FIWARE. La gestión de la conexión MQTT se realiza mediante la biblioteca `paho-mqtt`, que incluye mecanismos de reconexión en caso de fallos. A continuación, se muestra un ejemplo de datos publicados por este nodo:

```
{
  "device_id": "ciesbot",
  "service": "ciesol",
  "timestamp": 1743092796,
  "attributes": {
    "tag35_position": {
      "x": 5,
      "y": -22
    },
    "tag36_position": {
      "x": 3.64,
      "y": -21.5
    },
    "robot_position": {
      "x": 17.18,
      "y": -14.56
    },
    "daq_data": {
      "values": {
        "sensor_1": 1.2,
        "sensor_2": 2.5,
        "sensor_3": 3.7,
        "sensor_4": 4.1
      }
    }
  }
}
```

```

    }
  }
}

```

### 3.3. Nodo LabjackNode

El nodo LabjackNode, desarrollado en C++, está diseñado para integrar dispositivos de adquisición de datos (DAQ) LabJack U3 en sistemas ROS 2. Este nodo permite leer datos de sensores analógicos conectados al dispositivo LabJack y publicarlos en un tópico de ROS 2, facilitando su uso en aplicaciones robóticas.

El nodo establece una conexión con el dispositivo LabJack mediante una biblioteca de bajo nivel, configurando los pines como entradas analógicas y habilitando el modo de *streaming* para la adquisición continua de datos. Los valores analógicos leídos se convierten en voltajes utilizando la información de calibración del dispositivo y se publican en el tópico `/gpio_adc` en formato `Float32MultiArray`. Además, permite configurar dinámicamente la frecuencia de publicación mediante un parámetro llamado `publish_rate`.

Este nodo es especialmente útil en proyectos donde se requiere la integración de sensores analógicos en sistemas robóticos, como sensores de temperatura para monitoreo ambiental o control térmico, ofreciendo interoperabilidad con ROS 2, flexibilidad en la configuración de parámetros y eficiencia en la adquisición de datos en tiempo real.

### 3.4. Nodo NavCommandSender

El nodo NavCommandSender es un componente desarrollado en ROS 2 que permite la navegación autónoma de un robot utilizando el sistema de navegación Nav2. Este nodo recibe datos de posición de dos tags a través de tópicos ROS 2 y utiliza el paquete `nav2_simple_commander` para localizarse y gestionar la navegación hacia un objetivo definido.

El nodo comienza inicializando el sistema de navegación mediante la clase `BasicNavigator`, configurando una posición inicial predeterminada y esperando a que Nav2 esté activo. Posteriormente, se suscribe a los tópicos `sewio_position/tag35` y `sewio_position/tag36`, que proporcionan las posiciones de los tags en formato `PoseStamped`.

Cuando se recibe un mensaje del tópico del tag “36”, el nodo actualiza la posición inicial del robot si la navegación aún no ha comenzado. Para ello, utiliza el método `create_pose_stamped`, que genera un mensaje `PoseStamped` con las coordenadas y orientación especificadas. Una vez configurada la posición inicial, el nodo espera la posición objetivo de la etiqueta “35”.

Al recibir un mensaje del tópico del tag “35”, el nodo genera una nueva pose objetivo o meta y comienza la navegación hacia esa posición utilizando el método `goToPose` de `BasicNavigator`. Durante la navegación, el nodo verifica periódicamente el progreso mediante un temporizador. Si la tarea de navegación se completa, el nodo evalúa el resultado y registra la información correspondiente en los logs. Finalmente, el nodo se apaga automáticamente tras completar la tarea. Por tanto, este nodo permite integrar datos de localización en tiempo real con el sistema de navegación Nav2, facilitando el movimiento autónomo del robot desde una posición inicial hasta un objetivo definido por tags de posicionamiento.

### 3.5. Otros nodos empleados

Se usan, además, otros nodos como `teleop_twist`, los incluidos en el stack Nav2 o el nodo `twist_mux`, que se encarga de multiplexar las consignas de dirección del robot provenientes tanto del sistema de teleoperación como del de navegación autónoma, gestionando las prioridades en función de las especificaciones impuestas.

## 4. Experimentación y resultados preliminares

La sección experimental de este trabajo se centra en la validación de la arquitectura de control propuesta. Para ello se plantean dos experimentos: El primero se desarrolla bajo la metodología *Hardware-in-the-loop* (HIL), en la que se combinan elementos software y hardware en un mismo entorno de simulación, mientras que en el segundo se emplean todos los elementos hardware involucrados.

### 4.1. Experimento 1 - Simulación HIL

Este ensayo permitió validar la arquitectura de control mediante un procedimiento acelerado de pruebas al combinar elementos hardware, como el sistema de posicionamiento por balizas, el sistema SCADA o la tarjeta DAQ, con simuladores. Todos los nodos presentados en la Sección 3 pudieron ser ejecutados, empleando un simulador de robot y un modelo virtual del edificio (figura 5). El ensayo consistió en que, partiendo de una posición inicial del robot en la que se ubica en la sala de juntas, el nodo NavCommandSender se suscribe a la posición de destino correspondiente al tag “35”, que es portado por un usuario ubicado en el laboratorio número 5 del edificio y envía la meta al sistema de navegación del robot para que se traslade a dicha posición. Puesto que el robot es simulado, su ubicación no puede ser publicada a partir del Tag a bordo (ID 36), sino que es publicada a partir de los algoritmos de localización. Todas las variables de interés, incluidas las lecturas de la DAQ, son publicadas a través de MQTT, de lo que se desprende que la arquitectura de control cumple satisfactoriamente su función. En el mapa de la esquina superior izquierda de la figura 5 se muestra la ruta seguida por el robot simulado.

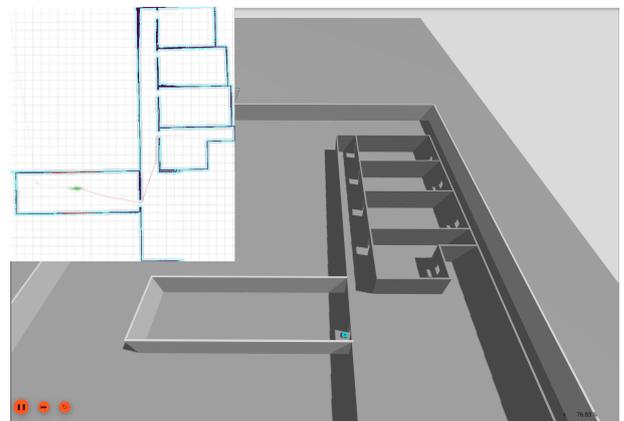


Figura 5: Entorno de simulación empleado en el experimento 1, incluyendo en la esquina superior izquierda el mapa y la trayectoria generados por el sistema de navegación.

## 4.2. Experimento 2 - Ensayo con robot real

El segundo experimento consiste en la utilización del robot real para poner a prueba la toma de datos reales teniendo en cuenta la ubicación exacta en la que se realizan las lecturas con la DAQ. En esta ocasión, el robot será guiado mediante teleoperación y su posición será publicada por el nodo `SewioPositionPublisher` a partir del tag 36 a bordo del robot, y enviada a la capa superior de control mediante el nodo `MqttBridge`. La trayectoria descrita por el robot comienza en un extremo del pasillo de acceso a los laboratorios. Desde este punto, el robot avanza hasta la puerta del laboratorio número 5, y accede a él. A continuación, gira sobre sí mismo, sale del laboratorio y continúa por el pasillo hasta acceder al siguiente laboratorio. Vuelve a salir y continúa hasta el final del pasillo, donde se concluye el experimento. En la figura 6 se muestra la trayectoria obtenida a partir de los datos registrados por el sistema UWB sin la aplicación de ninguna técnica de filtrado.

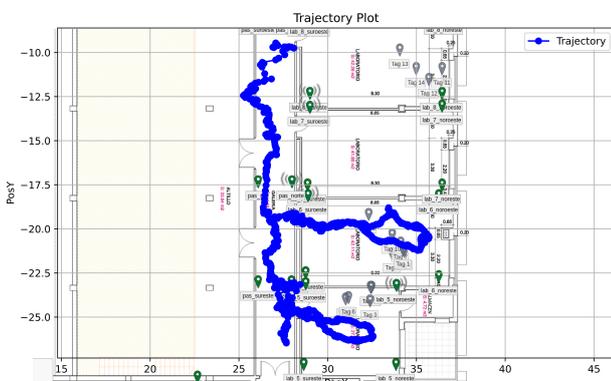


Figura 6: Trayectoria del robot real durante el experimento 2, estimada por el sistema UWB. Unidades en m.

## 5. Conclusiones

En este trabajo se ha presentado una arquitectura de control para la navegación autónoma de robots móviles en interiores de edificios inteligentes, integrando tecnologías avanzadas como ROS 2 y UWB. La arquitectura propuesta permite la interoperabilidad entre múltiples subsistemas, incluyendo un sistema de posicionamiento UWB, un broker MQTT y un robot móvil equipado con una tarjeta de adquisición de datos.

Los resultados obtenidos en los experimentos, tanto en simulación como en pruebas reales, validan la funcionalidad del sistema. En el experimento HIL, se demostró la capacidad del

sistema para integrar datos de localización y navegación en tiempo real, mientras que en el experimento con el robot real se verificó la precisión del sistema UWB para registrar trayectorias y asociarlas con datos de sensores.

En conclusión, este trabajo contribuye al desarrollo de soluciones avanzadas para la automatización y gestión eficiente de edificios inteligentes, destacando la escalabilidad y flexibilidad de la arquitectura propuesta. Futuras líneas de investigación podrían incluir la optimización de algoritmos de navegación, la integración de técnicas de filtrado para mejorar la precisión del sistema de localización y la utilización del robot para la calibración de la red de sensores del edificio así como la elaboración de mapas de confort térmico.

## Agradecimientos

Esta publicación es parte del proyecto de I+D+i TED2021-131655B-I00, financiado por AEI/10.13039/501100011033/ y “Unión Europea NextGenerationEU”.

## Referencias

- Alinezhad, E., Gan, V., Chang, V. W.-C., Zhou, J., 2024. Unmanned ground vehicles (ugvs)-based mobile sensing for indoor environmental quality (ieq) monitoring: Current challenges and future directions. *Journal of Building Engineering* 88, 109169.  
URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S235271022400737X>  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2024.109169>
- Bach, S.-H., Khoi, P.-B., Yi, S.-Y., 2024. Global uwb system: A high-accuracy mobile robot localization system with tightly coupled integration. *IEEE Internet of Things Journal* 11 (9), 16618–16626.
- CIESOL, 2024. CIESOL. Último acceso: 2 de abril de 2025.  
URL: <https://ciesol.com/>
- Geng, Y., Yuan, M., Tang, H., Wang, Y., Wei, Z., Lin, B., Zhuang, W., 2022. Robot-based mobile sensing system for high-resolution indoor temperature monitoring. *Automation in Construction* 142, 104477.  
URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926580522003508>  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104477>
- Lin, H.-Y., Yeh, M.-C., 2022. Drift-free visual slam for mobile robot localization by integrating uwb technology. *IEEE Access* 10, 93636–93645.
- Liu, R., He, Y., Yuen, C., Lau, B. P. L., Ali, R., Fu, W., Cao, Z., 2021. Cost-effective mapping of mobile robot based on the fusion of uwb and short-range 2-d lidar. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics* 27 (3), 1321–1331.
- Zhang, J., Yang, X., Wang, W., Guan, J., Ding, L., Lee, V. C., 2023. Automated guided vehicles and autonomous mobile robots for recognition and tracking in civil engineering. *Automation in Construction* 146, cited by: 81.  
DOI: [10.1016/j.autcon.2022.104699](https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104699)