



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

ADV5G-TWINS-ROBOTICS-FACTORY

Resumen final del proyecto Avanzando-5G-Gemelos-Digitales

Autores principales	ABB , Universitat Politècnica de València
Distribución	
Entregado	30/12/2024

Avanzando-5G-Gemelos Digitales-Industria (TSI-063000-2021-113)

Detalles del proyecto

Título del proyecto	CONTROL DE ROBOTS BASADO EN AI/ML EN GEMELOS DIGITALES EN ENTORNOS INDUSTRIALES
Acrónimo	ADV5G-TWINS-ROBOTICS-FACTORY
Título de actividad	Resumen final
Código	-
Fecha de comienzo	30/05/2023
Fecha fin	31/12/2024
N.º de Expediente	MY22/ITEAM/SE/77 Lote 5

Descripción

El proyecto coordinado Avanzando-5G-Gemelos-Digitales: Aplicaciones de gemelo digital en tiempo real empleando las tecnologías de 5G avanzado y 6G para entornos industriales y de logística, tiene como objetivo principal crear un laboratorio de aplicaciones 5G avanzadas y 6G para gemelos digitales en tiempo real en entornos industriales y logísticos.

Versiones y contribuciones

Versiones

#	Descripción	Contribuyentes
0.1	Borrador inicial	ABB
0.2	Versión final	ABB

Contribuyentes

Partner	Autores
ABB	Rodrigo Martinez

Revisores

Revisor	Partner
Luis Cascajar	ABB

Daniel Perez	ABB

Abreviaturas

AMR Automated Mobile Robot

Índice de contenidos

1. Introducción	1
2. Resumen tareas realizadas y entregables	3
2.1. Avanzando-5G-gemelos-digitales-industria-A8: Funcionalidad de inteligencia artificial basada en radar del gemelo digital para industria 4.0	3
2.1.1. Entregables	4
2.2. Avanzando-5G-gemelos-digitales-industria-A10: Funciones de control de robots basadas en AI/ML para industria 4.0	5
2.2.1. Entregables	6
3. Detalle actividades realizadas	7
3.1. Descripción casos de uso	7
3.2. Definición de KPIs	12
3.3. Arquitectura desarrollada	13
3.3.1. Sistema Offloading de datos para robots	13
3.3.2. Subsistema de control autónomo de robots móviles	14
3.3.3. 3. Subsistema de control manual de robots móviles	15
3.4. Pruebas en laboratorio	15
3.4.1. Laboratorio	15
3.4.2. Componentes utilizados	16
3.4.3. Resultados offloading	18
3.4.4. Resultados control de robot	21
3.5. Pruebas en entorno relevante	23
3.5.1. Entorno relevante	23
3.5.1.1. Configuración de la red	23
3.5.1.2. Configuración del Edge	25
3.5.2. Componentes utilizados	25
3.5.3. Resultados offloading	27
3.5.4. Resultados control robot	29
3.5.5. Medición de KPIs	32
3.5.5.1. Despliegue de red y Edge en 5TONIC	32

3.5.5.2.	Despliegue de red en 5TONIC y Edge UPV	33
----------	--	----

4. Conclusiones 33

Índice de figuras

Ilustración 1	Arquitectura general	8
Ilustración 2	Evasión de obstáculos	9
Ilustración 3	Localización y anclaje de carros de transporte	10
Ilustración 4	Localización de estaciones y ajuste de trayectorias automático	11
Ilustración 5	Uso de sensores en la localización de estaciones y ajuste de trayectorias automático	11
Ilustración 6	Arquitectura del sistema de offloading	13
Ilustración 7	Arquitectura del sistema de control autónomo	14
Ilustración 8	Arquitectura del sistema de control manual	15
Ilustración 9	Entorno de laboratorio	16
Ilustración 10	Plano de la zona de pruebas	16
Ilustración 11	AMR Tribot 3Tn	17
Ilustración 12	Cámara Intel real Sense	17
Ilustración 13	Lidar Hokuyo	17
Ilustración 14	LIDAR y cámara en el AMR	18
Ilustración 15	Detección de elementos por el object detector	19
Ilustración 16	Detección elementos por el object detector. Log de elementos detectados	19
Ilustración 17	Log del AMR Comm Manager	20
Ilustración 18	Visualización de elementos en el digital twin	20
Ilustración 19	Detección de elementos por el object detector y visualización en digital twin. Posición 1	21
Ilustración 20	Detección de elementos por el object detector y visualización en digital twin. Posición 2	21
Ilustración 21	Trayectoria de evasión parte 1	22
Ilustración 22	Trayectoria de evasión parte 2	22
Ilustración 23	Trayectoria de evasión parte 3	23
Ilustración 24	Plano del entorno relevante	23
Ilustración 25	Equipo terminal de comunicaciones	24
Ilustración 26	Diagrama de la solución X3 5G	24
Ilustración 27	Antenas	25

Ilustración 28 Características Intel NUC 11 Rugged.	25
Ilustración 29 AMR Tribot 3Tn	26
Ilustración 30 Cámara Intel real Sense	26
Ilustración 31 Lidar Hokuyo	26
Ilustración 32 Equipo terminal de comunicaciones	27
Ilustración 33 : AMR en el entorno de pruebas relevante equipado con una cámara, un lidar y un terminal de comunicaciones 5G	27
Ilustración 34 : Detección de una persona y una silla	28
Ilustración 35 : Visualización del AGV en el digital twin mientras se encuentra en movimiento	29
Ilustración 36 : Detección de dos sillas simultáneamente y visualización en el digital twin	29
Ilustración 37 : Recorrido realizado por AMR en automático si no hay obstáculos que impidan el paso	30
Ilustración 38 : AMR en movimiento se aproxima unas sillas que obstaculizan el paso	30
Ilustración 39 AMR en movimiento está cerca de las sillas que obstaculizan el paso, justo antes de realizar la maniobra de evasión	31
Ilustración 40 : Ruta del AMR (azul), posición del AMR (cruz roja), obstáculos detectados (círculos verdes).	31
Ilustración 41 : Ruta del AMR (azul), posición del AMR (cruz roja), obstáculos detectados (círculos verdes). Se superpone la maniobra de evasión calculada (amarillo)	32
Ilustración 42 : AMR realizando la maniobra de evasión	32

Índice de tablas

Tabla 1 Entregables A8	4
Tabla 2 Entregables A10	6

1. Introducción

Los gemelos digitales del proyecto Avanzando-5G-Gemelos-Digitales han consistido en réplicas virtuales 3D de un entorno industrial (fábrica) y logístico (puerto). Los gemelos digitales son capaces de mostrar una representación fidedigna (fotorrealista) de los escenarios reales considerados, y han generado modelos digitales independientes de objetos que existen en el escenario real y se pueden mover, y que se consideran relevantes para el control del escenario industrial. Ejemplos representativos son vehículos (camiones, barcos en el puerto, etc.), máquinas (robots), mercancías (contenedores) o personas. El escenario virtual estático y los modelos 3D de los objetos se crearon en una fase previa de diseño (por ejemplo, utilizando herramientas CAD). Los gemelos digitales son capaces de actualizar la posición de los objetos con movimiento en tiempo real.

Este proyecto va más allá de los gemelos digitales clásicos y se centra en la comunicación en tiempo real habilitada por (i) 5G avanzado (5G-A) para el Internet de las Cosas IoT (Internet of Things) para conectar máquinas y sensores a gran escala, (ii) computación en el borde (Edge) y en la nube (cloud), y (iii) la integración de herramientas analíticas de inteligencia artificial y aprendizaje automático AI/ML (Artificial Intelligence/Machine Learning) para dotar a los gemelos digitales de inteligencia que permita el rendimiento en tiempo real. El resultado es un modelo técnico para el desarrollo de gemelos digitales en tiempo real interoperables, aprovechando la tecnología 6G del futuro. La combinación de gemelos digitales y aplicaciones interactivas de diferentes fuentes ayudará a la industria a alcanzar mayores niveles de resiliencia.

Las principales actividades del proyecto coordinado Avanzando-5G-Gemelos-Digitales son:

- Probar la evaluación del rendimiento de un PoC de IoT de 5G-A.
- Diseño de una plataforma IoT-Edge-cloud autogestionada con inteligencia artificial.
- Comprobar el rendimiento de los cuellos de botella de tráfico para evaluar la integración de análisis de IA/ML en tiempo real.
- Diseñar y crear un laboratorio de aplicaciones 6G emblemático para gemelos digitales en tiempo real para entornos industriales logísticos.

Definición del objeto del contrato

Este contrato se centra en algoritmos de RADAR y robótica basados en Inteligencia Artificial y Machine Learning (AI/ML) que permitan la identificación y seguimiento de objetos, con el objetivo de actualizar gemelos digitales de un entorno industrial en tiempo real y optimizar la conducción

remota y/o autónoma de robots móviles en dicho entorno. Los gemelos digitales consisten en réplicas 3D virtuales de los objetos existentes en el entorno, tales como vehículos, mercancías, maquinaria o personas. A partir de los datos capturados por escáneres RADAR o LIDAR instalados tanto en el entorno como en los robots, se proporciona la información necesaria para su representación virtual, como el tipo de objeto y su localización. Los sistemas de control autónomo y manual de los robots móviles hacen uso de los datos recopilados por los gemelos digitales para una mayor percepción del entorno.

Las actividades desarrolladas son:

- Subproyecto Avanzando-5G-Gemelos Digitales para la Industria 4.0 (TSI-063000-2021-113)
 - Actividad A8: FUNCIONALIDAD DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL RADAR BASADA EN RADAR DEL GEMELO DIGITAL PARA INDUSTRIA 4.0.
- Subproyecto Avanzando-5G-Gemelos Digitales para la Industria 4.0 (TSI-063000-2021-113)
 - Actividad A10: FUNCIONES DE CONTROL DE ROBOTS BASADAS EN AI/ML PARA INDUSTRIA 4.0

La ejecución de estas actividades se ha requerido de la estrecha colaboración con otras actividades del proyecto coordinado Avanzando-5G-Gemelos-Digitales relacionadas con el diseño, desarrollo y validación de los gemelos digitales en tiempo real.

2. Resumen tareas realizadas y entregables

2.1. Avanzando-5G-gemelos-digitales-industria-A8: Funcionalidad de inteligencia artificial basada en radar del gemelo digital para industria 4.0

El contrato se ha centrado en las siguientes tareas:

- Colaboración en la definición de casos de uso, requisitos y KPIs para gemelos digitales en tiempo real en entornos industriales, en particular en cuanto al sistema de análisis radar basado en AI/ML.
- Análisis del estado del arte de las técnicas radar basadas en AI/ML que permiten la identificación y el seguimiento de objetos en tiempo real, así como aquellas capaces de proveer de inteligencia a los gemelos digitales en aplicaciones industriales, facilitando la digitalización en dichos entornos.
- Diseño, desarrollo, validar y optimización de un sistema de análisis radar de objetos basado en algoritmos AI/ML para actualizar en tiempo real gemelos digitales de un entorno industrial. Los algoritmos han sido entrenados en una fase previa de diseño a partir de la información recogida por sensores RADAR y/o LIDAR instalados tanto en el entorno como en robots móviles, de forma que en la fase de actualización en tiempo real han sido capaces de identificar
- información relevante como: tipo, orientación, velocidad o localización de un objeto. La información de los objetos identificada se ha complementado con la extraída por el lote ADV5G-TWINS-VIDEO para identificar y localizar los objetos modelados previamente, de forma que se actualizan los gemelos digitales en tiempo real con esta información. El sistema de análisis radar es también capaz de detectar obstáculos o patrones anómalos en el entorno industrial, que permiten a los gemelos digitales tomar decisiones en consecuencia. Toda la información recopilada se almacena en una base de datos interna para su posterior uso, la cual funciona sobre una infraestructura de computación distribuida (plataforma IoT-Edge-cloud).
- Virtualización de los algoritmos desarrollados para su ejecución en un nodo de Edge Computing desplegado en el entorno industrial (por las actividades del subproyecto Avanzando-5G-Gemelos-Digitales-Plataforma)
- Realización de pruebas piloto y demostraciones, tanto en los escenarios industriales del proyecto.

2.1.1. Entregables

Los entregables realizados se describen a continuación. Existen cuatro tipos de entregables: (i) Los entregables tipo documento, los cuales detallan el progreso técnico sobre una o varias de las tareas de I+D+i objeto del contrato; (ii) Los entregables tipo prototipo, los cuales son una implementación, normalmente hardware y software relacionada con el gemelo digital, de un sistema con ciertas funcionalidades mínimas; (iii) Entregables tipo software, los cuales consisten en un programa ejecutable; (iv) Los entregables tipo piloto de validación, que consisten en realizar pruebas de validación y demostración de casos de uso.

Tabla 1 Entregables A8

Código	Título	Tipo
D2.1	Definición de casos de uso, requisitos y KPIs de gemelos digitales en tiempo real para Industria 4.0	Documento
D2.2	Evolución de los casos de uso, requisitos y KPIs de gemelos digitales en tiempo real para Industria 4.0	Documento
D3.1	Diseño de gemelos digitales en tiempo real para Industria 4.0	Documento
S3.2	Software de análisis radar basado en AI/ML para gemelos digitales.	Software
D3.2	Desarrollo de gemelos digitales en tiempo real para Industria 4.0	Documento
P3.2	Prototipo de gemelo digital con inteligencia artificial basada en radares	Prototipo
D3.3	Informe final sobre el desarrollo de gemelos digitales en tiempo real para Industria 4.0	Documento
D4.1	Planificación del laboratorio y de los pilotos de gemelos digitales en tiempo real en entornos de Industria 4.0	Documento
P4.1	Creación del laboratorio y pilotos de gemelos digitales en tiempo real para Industria 4.0	Prototipo
D4.2	Puesta en marcha del laboratorio y de los pilotos de gemelos digitales en tiempo real para entornos de Industria 4.0	Documento
P4.2	Laboratorio y pilotos de gemelos digitales en tiempo real para Industria 4.0	Prototipo

VT4.1	Piloto de validación de gemelos digitales en tiempo real en entornos industriales	Pruebas de Validación
D4.3	Pruebas finales del laboratorio y pilotos de gemelos digitales en tiempo real en zonas industriales	Documento

2.2. Avanzando-5G-gemelos-digitales-industria-A10: Funciones de control de robots basadas en AI/ML para industria 4.0

El contrato se ha centrado en las siguientes tareas:

- Colaboración en la definición de casos de uso, requisitos y KPIs para gemelos digitales en tiempo real en entornos de Industria 4.0, en particular en cuanto a funcionalidades de control de robots móviles basadas en AI/ML.
- Análisis del estado del arte de las distintas herramientas analíticas de AI/ML que permiten o mejoran el control automático y manual de robots móviles en tiempo real, así como aquellas capaces de proveer de inteligencia a los gemelos digitales en aplicaciones de Industria 4.0, facilitando la digitalización en dichos entornos.
- Diseño, desarrollo, validación y optimización de un sistema de control autónomo de robots móviles en tiempo real basado en algoritmos AI/ML para gemelos digitales de un entorno industrial. Los algoritmos se han entrenado en una fase previa de diseño a partir de la información recogida por sensores instalados en los propios robots (cámaras, radares y otros sensores), de forma que en la fase de actualización en tiempo real son capaces de identificar información relevante como obstáculos, patrones o personas. Toda la información recopilada se ha almacenado en una base de datos interna para su posterior uso, la cual funciona sobre una infraestructura de computación distribuida (plataforma IoT-Edge-cloud). Esta información se complementa con la extraída por el lote ADV5G-TWINS-VIDEO y por la actividad de análisis radar (A8) de este lote, con el objetivo de proporcionar a los gemelos una mayor percepción del entorno que permita, entre otros, aplicar la ruta óptima y ajustar los parámetros de operación (por ejemplo, reducir la velocidad si se detectan personas).
- Colaboración en la integración de los gemelos digitales con los dos puestos de control (cockpits) inmersivos desarrollados por la actividad *A9 CONDUCCIÓN Y CONTROL REMOTO INMERSIVO (ADV5G-IMM-COCKPIT)* del subproyecto *Avanzando-5G-Inmersivo-Háptico (TSI-*

063000-2021-111), habilitando un sistema de conducción remota para controlar manualmente los robots móviles de forma asistida. Este sistema utiliza la inteligencia de los gemelos digitales y su percepción aumentada del entorno (la misma información que utiliza el sistema de control autónomo) para proporcionar al usuario información relevante sobre el entorno (en forma de interfaz gráfica, creada por la actividad ADV5G-TWINS-VISUALIZATION), además de sugerirle las acciones óptimas según la situación del entorno.

- Colaboración en la correcta comunicación de los datos enviados (sensores y telemetría) y recibidos (comandos de control) por los robots móviles a través del sistema de captura y comunicación (objeto del lote ADV5G-TWINS-VISUALIZATION), desarrollando si es necesario un software que traduce el lenguaje usado por cada robot al lenguaje estándar del gemelo digital.
- Realización de pruebas piloto y demostraciones.

2.2.1. Entregables

Los entregables realizados se describen a continuación. Existen cuatro tipos de entregables: (i) Los entregables tipo documento, los cuales detallan el progreso técnico sobre una o varias de las tareas de I+D+i objeto del contrato; (ii) Los entregables tipo prototipo, los cuales son una implementación, normalmente hardware y software relacionada con el gemelo digital, de un sistema con ciertas funcionalidades mínimas; (iii) Entregables tipo software, los cuales consisten en un programa ejecutable; (iv) Los entregables tipo piloto de validación, que consisten en realizar pruebas de validación y demostración de casos de uso.

Tabla 2 Entregables A10

Código	Título	Tipo
D2.1	Definición de casos de uso, requisitos y KPIs de gemelos digitales en tiempo real para Industria 4.0	Documento
D2.2	Evolución de los casos de uso, requisitos y KPIs de gemelos digitales en tiempo real para Industria 4.0	Documento
D3.1	Diseño de gemelos digitales en tiempo real para Industria 4.0	Documento
S3.3	Software de control de robots basado en AI/ML para gemelos digitales	Software
D3.2	Desarrollo de gemelos digitales en tiempo real para Industria 4.0	Documento

P3.3	Prototipo de gemelo digital con inteligencia artificial basada en robots móviles	Prototipo
D3.3	Informe final sobre el desarrollo de gemelos digitales en tiempo real para Industria 4.0	Documento
D4.1	Planificación del laboratorio y de los pilotos de gemelos digitales en tiempo real en entornos de Industria 4.0	Documento
P4.1	Creación del laboratorio y pilotos de gemelos digitales en tiempo real para Industria 4.0	Prototipo
D4.2	Puesta en marcha del laboratorio y de los pilotos de gemelos digitales en tiempo real para entornos de Industria 4.0	Documento
P4.2	Laboratorio y pilotos de gemelos digitales en tiempo real para Industria 4.0	Prototipo
VT4.1	Piloto de validación de gemelos digitales en tiempo real en entornos industriales	Pruebas de Validación
D4.3	Pruebas finales del laboratorio y pilotos de gemelos digitales en tiempo real en zonas industriales	Documento

3. Detalle actividades realizadas

3.1. Descripción casos de uso

En la siguiente imagen se observa el caso de uso de sensorización e incorporación de inteligencia artificial en el Edge empleado en el control de robots.

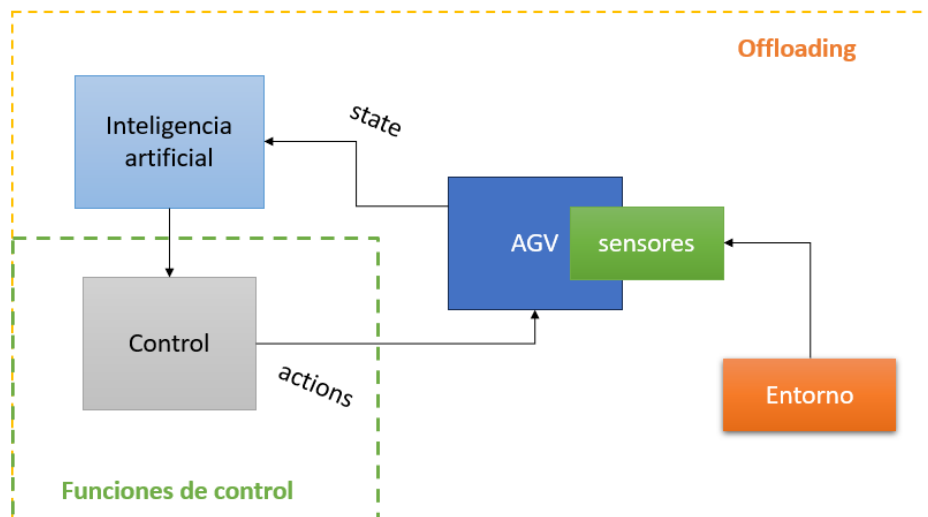


Ilustración 1 Arquitectura general

Los sensores captan la información del entorno. Los sensores se ubican en el AMR. La información captada por los sensores internos y externos se envía al Edge. Gracias a la inteligencia artificial se interpreta la información proveniente de los sensores y se detectan los elementos en el entorno. Esta información se envía al controlador en el Edge, el cual genera acciones de control para ajustar el comportamiento de los AMRs.

En este esquema se pueden identificar los siguientes elementos:

- Offloading:
 - o Sensorización de un AMR para obtener información sobre los elementos del entorno
 - o Envío de la información de los sensores a un sistema en el Edge
 - o Procesado de la información en el Edge para detectar los elementos en el entorno e interpretación del contexto cercano al AMR
- Control:
 - o En base a la información del contexto generación acciones de control para ser ejecutadas por el AMR
 - o Envío de las acciones de control del Edge al AMR
 - o Ejecución de las acciones de control por parte del AMR

Este caso de uso se ha probado en Burgos en entorno de laboratorio y en el 5tonic en entorno industria.

Este caso de uso general permite la implementación de diferentes aplicaciones, entre otras:

- Realizar una evasión de obstáculos inteligente
- Localizar carros de transporte

- Autoajuste de trayectorias en estaciones
-

Evasión de obstáculos y personas inteligente

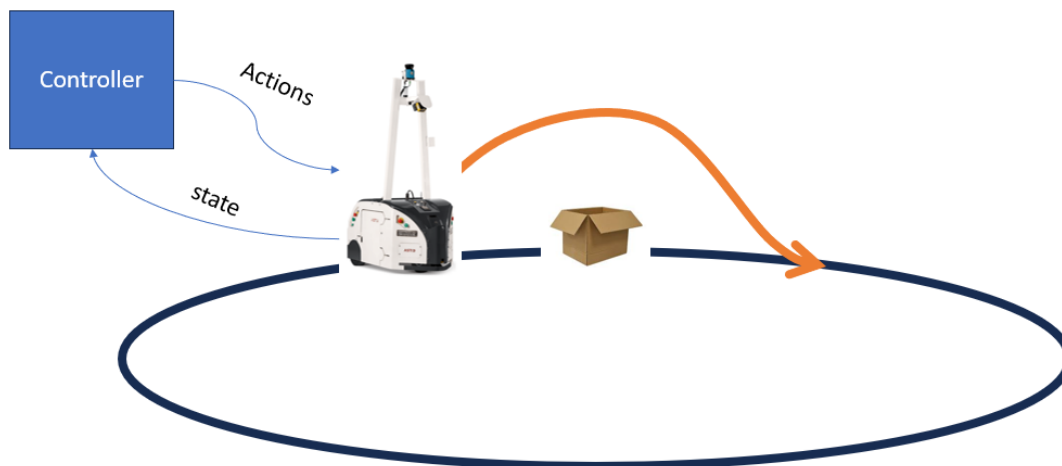


Ilustración 2 Evasión de obstáculos

Para maximizar la seguridad en las instalaciones y la predictibilidad del comportamiento, los AMRs industriales no circulan libremente al azar en el espacio de trabajo. En vez de ello, circulan siguiendo rutas predefinidas en la herramienta de navegación. Están equipados con elementos de seguridad de tal forma que si detectan un obstáculo en la ruta se detienen antes de colisionar con el obstáculo, normalmente detectan los obstáculos mediante un lidar de seguridad. Si detectan un obstáculo el AMR se detiene, y generan una alarma para que un operario retire el obstáculo.

Gracias a la sensorización y el procesamiento de información inteligente en el Edge, está operativa se realizade forma totalmente autónoma sin necesidad de operario. El AMR identifica el tipo de obstáculo, ajusta su comportamiento en base al tipo de obstáculo reconocido, y genera una trayectoria de escape considerando las características del mismo.

Los datos recogidos por los sensores una vez procesados en el offloading permiten detectar el tipo de elemento en la trayectoria del AMR.

Localización y anclaje de carros de transporte

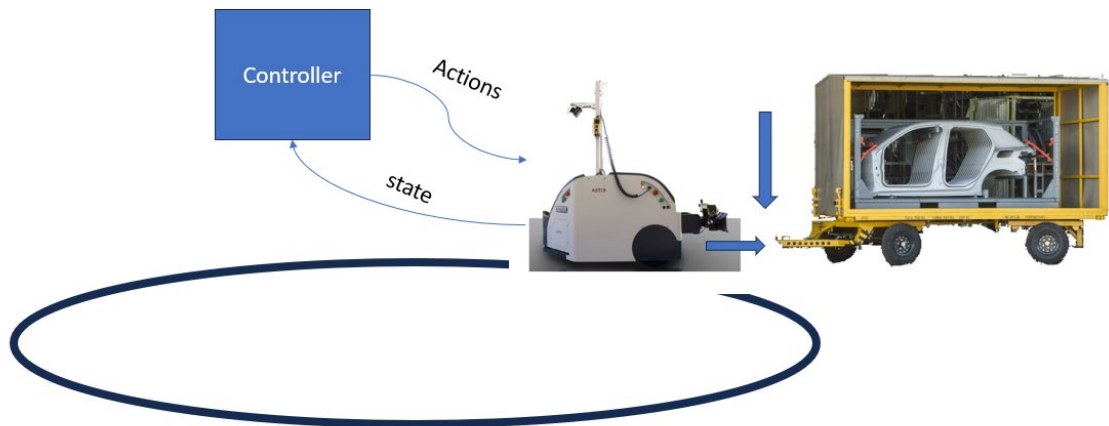


Ilustración 3 Localización y anclaje de carros de transporte

En la actualidad, las posiciones de los carros de transporte son almacenadas de forma estática en base de datos durante la puesta en marcha de las instalaciones. Posteriormente, durante la operativa de producción, las máquinas se dirigen a esas posiciones fijas para recoger y depositar los carros, y no pueden percibir las desviaciones respecto de la posición almacenada en la fase de puesta en marcha. Las desviaciones pueden ser notables por ejemplo en estructuras metálicas largas, donde un pequeño error de ángulo se traduce en un gran error en la posición del extremo del contenedor. Esta situación, hace que sea difícil la convivencia entre sistemas de transporte manuales y automáticos en el depósito y recogida de contenedores.

Algunas veces, es necesario colocar centradores para poder absorber las imprecisiones en el posicionamiento de las cargas; pero si la imprecisión es muy alta, el uso de centradores puede no ser suficiente. Los sensorización y el procesado permite absorber de forma “inteligente” estas desviaciones en el posicionamiento. Este enfoque, elimina la necesidad de centradores, posibilita trabajar con mayores niveles de imprecisión y ruido en la navegación y habilita la convivencia entre sistemas manuales y automáticos.

Los datos recogidos por los sensores una vez procesados en el offloading permiten detectar la posición del carro de transporte. Conocida la posición de la estación el controlador en el Edge genera las acciones de control necesarias para el anclaje del carro en la posición en la que se encuentre.

Localización de estaciones y ajuste de trayectorias automático

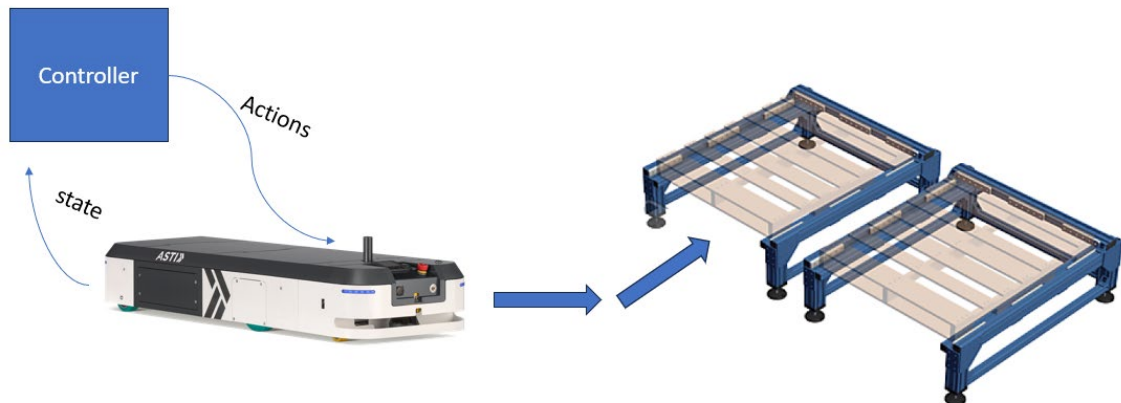


Ilustración 4 Localización de estaciones y ajuste de trayectorias automático

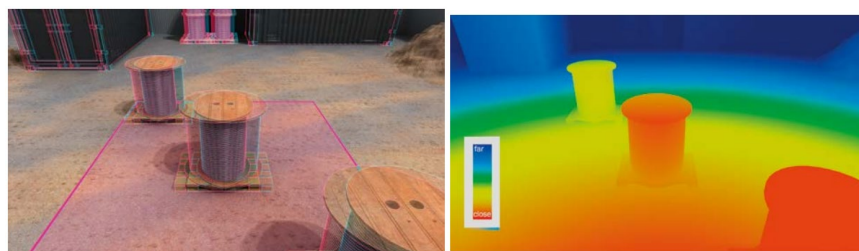


Ilustración 5 Uso de sensores en la localización de estaciones y ajuste de trayectorias automático

En la actualidad, en los sistemas de AMRs, las estaciones de recogida y entrega poseen emplazamientos fijos. Por lo tanto, la configuración o distribución espacial del almacenamiento y las estaciones de trabajo no puede modificarse durante la operativa de producción. La distribución espacial es un factor determinante de la capacidad productiva, la modificación de la distribución, por tanto, permite modular esta capacidad. La flexibilidad en la capacidad de producción es un elemento clave para la construcción de los sistemas productivos bajo demanda característicos de la industria 4.0. El autoaprendizaje de estaciones elimina la rigidez en la programación de estaciones, permitiendo modificar su emplazamiento de forma dinámica, lo que facilita la reconfiguración de los almacenes, favoreciendo la producción bajo demanda.

Los datos recogidos por los sensores una vez procesados en el offloading permiten detectar la posición de la estación. Conocida la posición de la estación el controlador en el Edge genera las acciones de control necesarias para el reajuste de la trayectoria.

3.2. Definición de KPIs

Se han definido un conjunto de KPIs para evaluar el rendimiento de la solución

Tabla 3 Conjunto de KPIs para evaluar el rendimiento de la solución

Id KPI	Nombre KPI	Descripción	Valor esperado
K1	Latencia Uplink Lidar	Tiempo transcurrido desde que los paquetes UDP o TCP salen del AMR hasta que llegan al EDGE. Datos Lidar	<20 ms
K2	Latencia Uplink video	Tiempo transcurrido desde que los paquetes UDP o TCP salen del AMR hasta que llegan al EDGE. Datos video	<25 ms
K3	Latencia Uplink AMR	Tiempo transcurrido desde que los paquetes UDP o TCP salen del AMR hasta que llegan al EDGE. Datos AMR	<20 ms
K4	Jitter uplink lidar	Variación de la latencia uplink. Datos lidar	<1%
K5	Jitter uplink video	Variación de la latencia uplink. Datos video	<1%
K6	Jitter uplink AMR	Variación de la latencia uplink. Datos AMR	<2%
K7	Latencia downlink	Tiempo transcurrido desde que los paquetes UDP o TCP salen del Edge hasta que llegan al AMR	<20 ms
K8	Jitter downlink	Variación de la latencia Edge-AMR	<1%
K9	Ancho de banda sensores	Ancho de banda consumido por el envío de la información de los sensores	>2Mbps
K10	Latencia percibida en la aplicación	Tiempo transcurrido desde que el AMR está esperando una acción del EDGE, hasta que comienza la ejecución de la acción recibida del EDGE.	<3s
K11	Tiempo medio de detección	Tiempo necesario para procesar la información de	<1s

		los sensores y la detección del elemento en cuestión. Como el tiempo puede ser diferente en función del elemento a identificar si medirá el tiempo medio	
K12	Número de elementos detectados	Número de elementos diferentes que es capaz de detectar el sistema.	>=3

3.3. Arquitectura desarrollada

3.3.1. Sistema Offloading de datos para robots

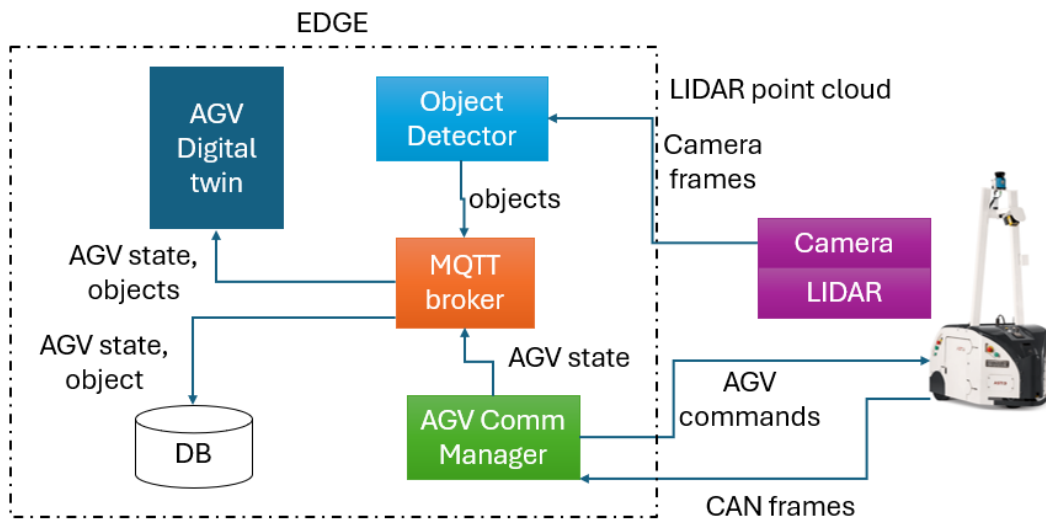


Ilustración 6 Arquitectura del sistema de offloading

La Ilustración 5 muestra la arquitectura del sistema de offloading de datos. El AMR envía la información del bus CAN al módulo AMR Comm manager mediante tramas UDP, este módulo ejecuta un diccionario para interpretar las tramas CAN y extraer las variables internas del AMR: posición, velocidad, estado, batería, etc. Esta información es compartida con el resto de los módulos a través de un bróker MQTT. Además, este módulo se encarga de mantener una comunicación constante con el AMR, de esta forma por razones de seguridad si por algún motivo la comunicación se interrumpe, el AMR automáticamente se detiene.

Por otro lado, la nube de puntos obtenida por el lidar y las imágenes capturadas por la cámara se envían directamente al módulo "Object Detector". Este módulo empleando inteligencia artificial como el algoritmo YOLO, detecta los objetos presentes en la escena e informa de sus propiedades al resto de módulos a través de MQTT. Los posibles objetos a

detectar han sido previamente almacenados en una base de datos, empleada para entrenar el algoritmo YOLO. De los objetos es relevante conocer el tipo de objeto y las dimensiones para poder realizar una maniobra de evasión.

El estado del AMR puede monitorizarse en una herramienta de simulación que actúe como digital twin del AMR. Mostrará una representación de la localización del AMR y de los objetos detectados. Se alimentará con la información recibida en tiempo real desde el bróker MQTT.

En todo momento se registra el estado del AMR y los objetos detectados en una base de datos para facilitar el análisis posterior de la información y la integración con otros subsistemas.

3.3.2. Subsistema de control autónomo de robots móviles

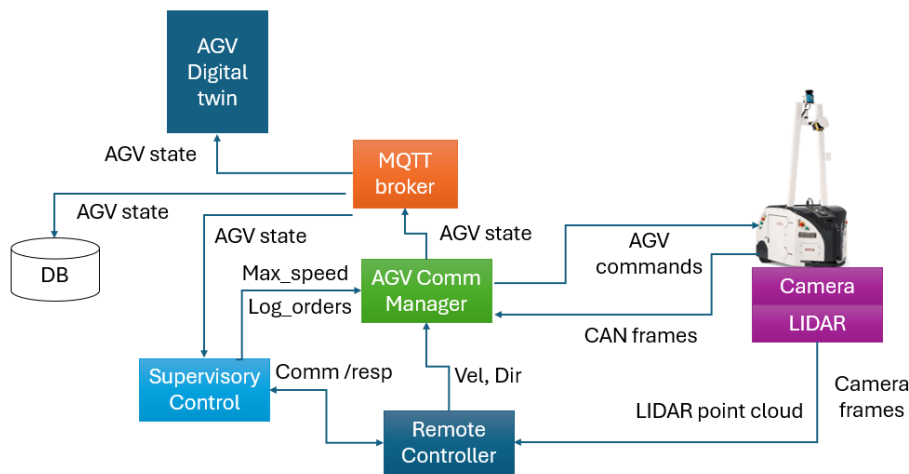


Ilustración 7 Arquitectura del sistema de control autónomo

La Ilustración 6 muestra la arquitectura del sistema de control autónomo. El AMR envía la información del bus CAN al módulo AMR Comm manager mediante tramas UDP, este módulo ejecuta un diccionario para interpretar las tramas CAN y extraer las variables internas del AMR: posición, velocidad, estado, batería, etc. Esta información es compartida con el resto de los módulos a través de un bróker MQTT. Además, este módulo se encarga de mantener una comunicación constante con el AMR, de esta forma por razones de seguridad si por algún motivo la comunicación se interrumpe, el AMR automáticamente se detiene.

El control supervisor conociendo el estado del AMR y el entorno envía ordenes al AMR para optimizar la operación logística y ajustar la velocidad de la operativa para maximizar la seguridad. Por ejemplo, en caso de detectarse personas en el entorno se reduce la velocidad máxima del AMR.

Un Remote Controller permite el seguimiento de consignas de movimiento en tiempo real. Este módulo envía consignas de velocidad y dirección al AMR para ajustar el movimiento. Por motivos de seguridad el funcionamiento del

Remote Controller está gobernado por el control supervisor, el modo de seguimiento de consignas debe estar habilitado por el control supervisor.

El estado del AMR puede monitorizarse en una herramienta de simulación que actúa como digital twin del AMR. Muestra una representación de la localización del AMR y de los objetos detectados. Se alimenta con la información recibida en tiempo real desde el bróker MQTT.

En todo momento se registra el estado del AMR y los objetos detectados en una base de datos para facilitar el análisis posterior de la información y la integración con otros subsistemas.

3.3.3. 3. Subsistema de control manual de robots móviles

La Ilustración 7 muestra la arquitectura del sistema de control manual. El sistema de control manual se integra desde el módulo Remote Controller. Cuando el sistema funciona en manual este módulo recibe los comandos del usuario y los transforma a consignas de velocidad y dirección.

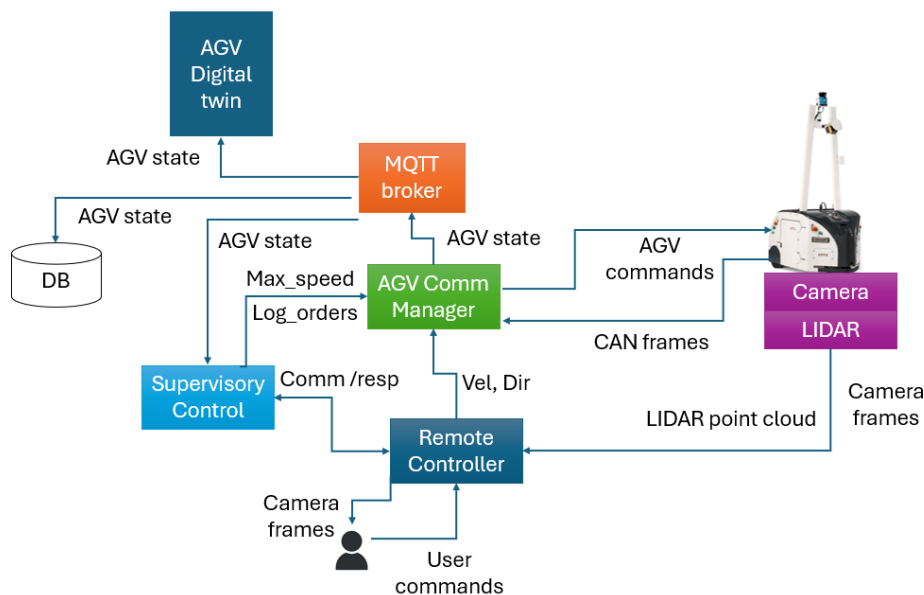


Ilustración 8 Arquitectura del sistema de control manual

El módulo también recibe los fotogramas de la cámara y se las muestra al usuario para habilitar el control remoto genuino del AMR. Este módulo también recibe la nube de puntos del LIDAR, si se detecta algún elemento en el campo de seguridad se notifica al usuario y se reduce automáticamente la velocidad máxima para garantizar una operación segura.

3.4. Pruebas en laboratorio

3.4.1. Laboratorio

Las pruebas de laboratorio se han realizado en el Laboratorio de Robótica de la Universidad de Burgos. Este laboratorio está equipado con herramientas

mecánicas y electrónicas, y equipos de instrumentación para el desarrollo de proyectos de Ingeniería Mecatrónica.

La Ilustración 8 muestra la zona de prueba del laboratorio donde se han realizado las pruebas de componentes y las pruebas de integración. La zona de pruebas tiene un tamaño de 7.5m x 8m.

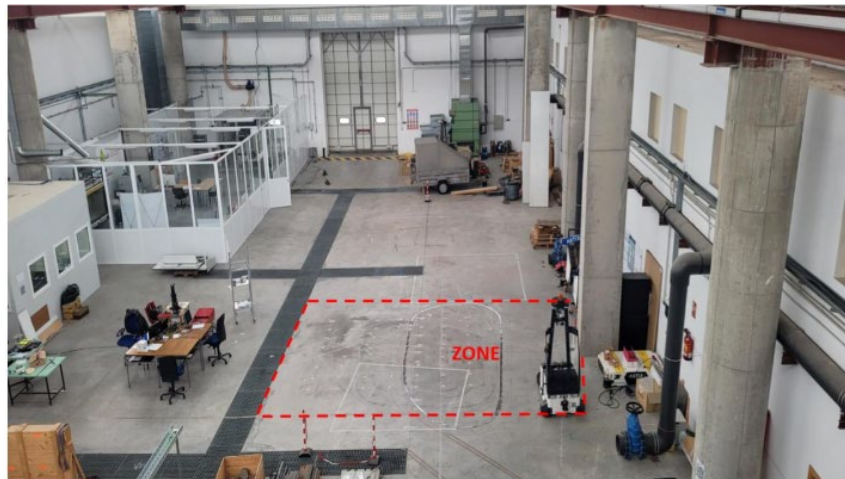


Ilustración 9 Entorno de laboratorio

En la figura anterior se puede observar el AMR describiendo una trayectoria.

La Ilustración 9 muestra un plano del entorno de laboratorio:

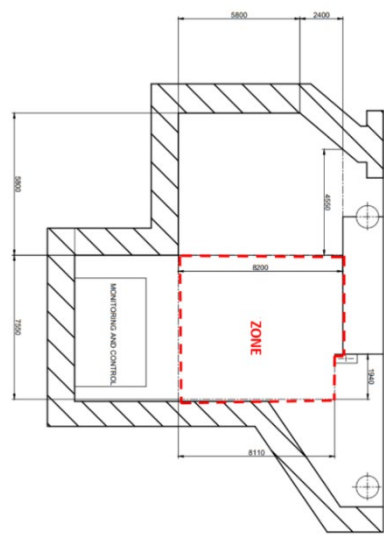


Ilustración 10 Plano de la zona de pruebas

3.4.2. Componentes utilizados

El AMR es un Tribot 3Tn (Ilustración 10) equipado con una cámara Intel real Sense (Ilustración 11) y un LIDAR Hokuyo (Ilustración 12). En la ilustración 45 se muestran estos elementos instalados en el AMR.



Ilustración 11 AMR Tribot 3Tn



Ilustración 12 Cámara Intel real Sense



Ilustración 13 Lidar Hokuyo



Ilustración 14 LIDAR y cámara en el AMR

3.4.3. Resultados offloading

El AMR se encuentra detenido en una posición estática, hay objetos y personas alrededor del AMR. Los datos del Lidar y los fotogramas de la cámara se envían al Edge donde son procesados por el Object detector. Este componente detecta objetos y personas. Los elementos detectados son visualizados en el digital twin.

Las ilustraciones siguientes muestran la imagen captada por la cámara Intel Real Sense en el momento en el cual el Object Detector detecta: una silla, una bicicleta y una persona. El objeto detectado se enmarca en un bounding box. El centro del bounding box indica el punto exacto del cual se toman las coordenadas del objeto. Encima del bounding box aparece una etiqueta con el nombre de la clase del objeto detectado. Al lado de la etiqueta nos muestra la confianza en la detección, el valor se muestra en tanto por 1. Por tanto, el valor máximo de confianza de detección es 1 y el mínimo es 0. Se puede observar que los niveles de confianza en la detección son bastante altos, por encima de 0.8.

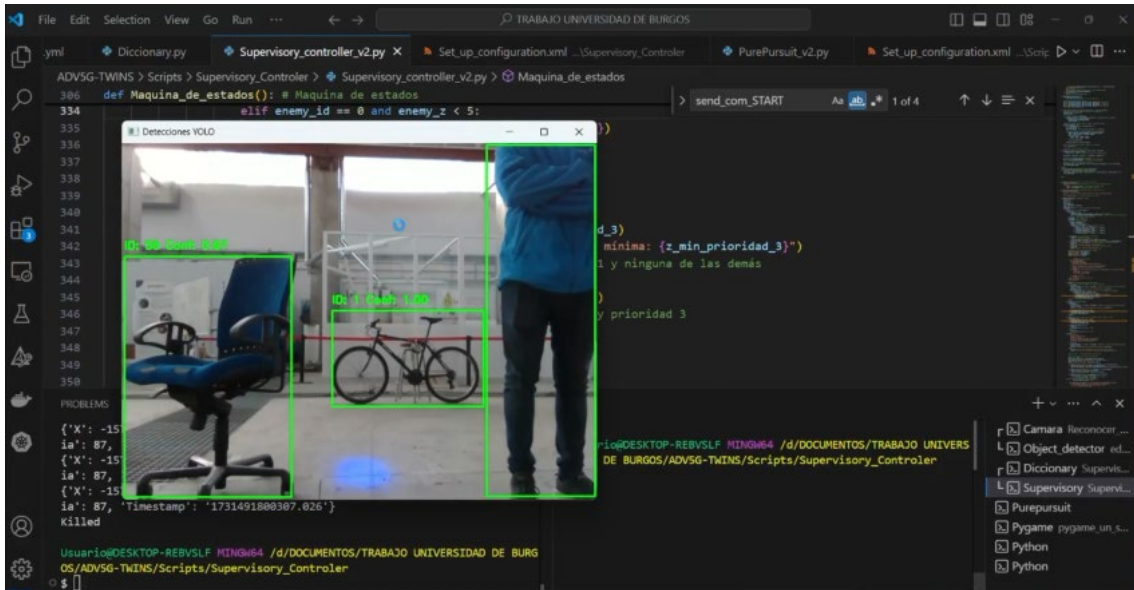


Ilustración 15 Detección de elementos por el object detector

La Ilustración 15 muestra el log del Object detector (recuadro naranja) mientras está en funcionamiento detectando la silla, la bicicleta y la persona.

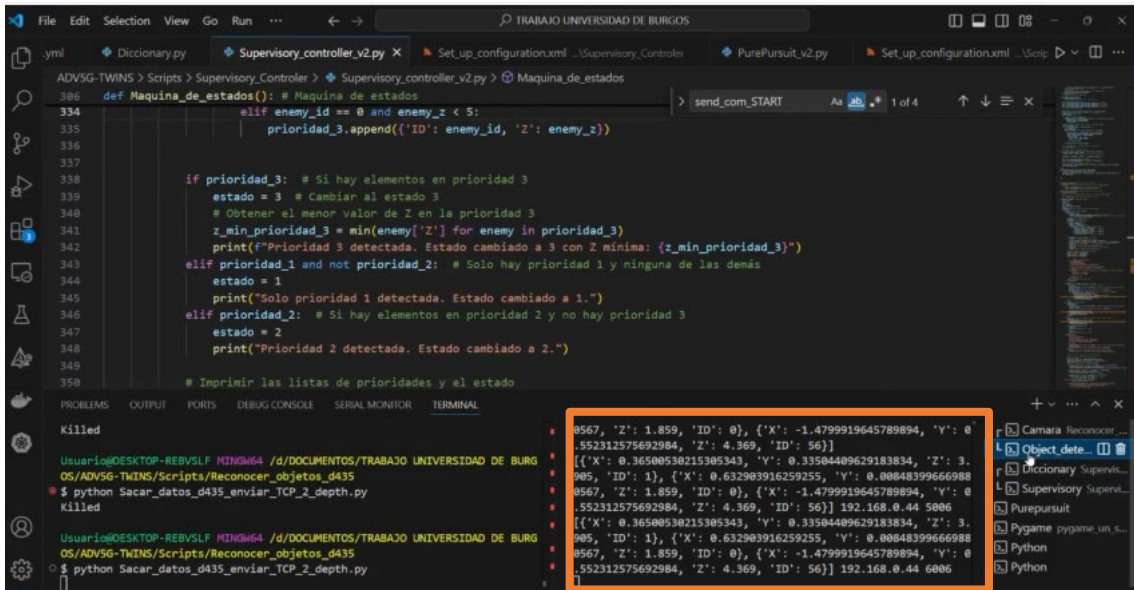


Ilustración 16 Detección elementos por el object detector. Log de elementos detectados

La Ilustración 16 muestra el log del AMR Comm Manager (recuadro naranja) recibiendo la información del AMR.

```

334     elif enemy_id == 0 and enemy_z < 5:
335         prioridad_3.append({'ID': enemy_id, 'Z': enemy_z})
336
337
338     if prioridad_3: # Si hay elementos en prioridad 3
339         estado = 3 # Cambiar al estado 3
340         # Obtener el menor valor de Z en la prioridad 3
341         z_min_prioridad_3 = min(enemy['Z'] for enemy in prioridad_3)
342         print(f"Prioridad 3 detectada. Estado cambiado a 3 con Z mínima: {z_min_prioridad_3}")
343     elif prioridad_1 and not prioridad_2: # Solo hay prioridad 1 y ninguna de las demás
344         estado = 1
345         print("Solo prioridad 1 detectada. Estado cambiado a 1.")
346     elif prioridad_2: # Si hay elementos en prioridad 2 y no hay prioridad 3
347         estado = 2
348         print("Prioridad 2 detectada. Estado cambiado a 2.")
349
350     # Imprimir las listas de prioridades y el estado

```

```

{'X': -157.757, 'Y': -45.877, 'Yaw': 268.319091796875, 'V': 0.0, '% Bateria': 87, 'Timestamp': '1731491800266.824'}
{'X': -157.757, 'Y': -45.877, 'Yaw': 268.319091796875, 'V': 0.0, '% Bateria': 87, 'Timestamp': '1731491800307.026'}
{'X': -157.757, 'Y': -45.877, 'Yaw': 268.319091796875, 'V': 0.0, '% Bateria': 87, 'Timestamp': '1731491800307.026'}
killed

```

Ilustración 17 Log del AMR Comm Manager

En la Ilustración 17 se visualizan los elementos detectados (silla, bicicleta, persona) en el digital twin

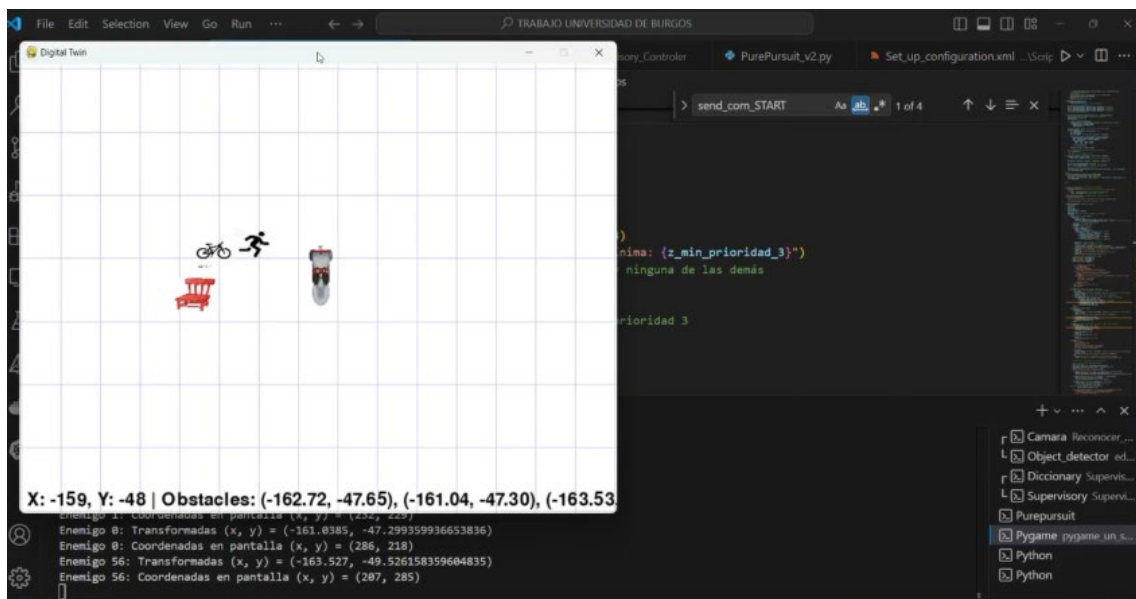


Ilustración 18 Visualización de elementos en el digital twin

Las ilustraciones 18 y 19 muestran la detección simultanea de una bicicleta y una persona. Los elementos son correctamente detectados por el object detector y representados simultáneamente en el digital twin.

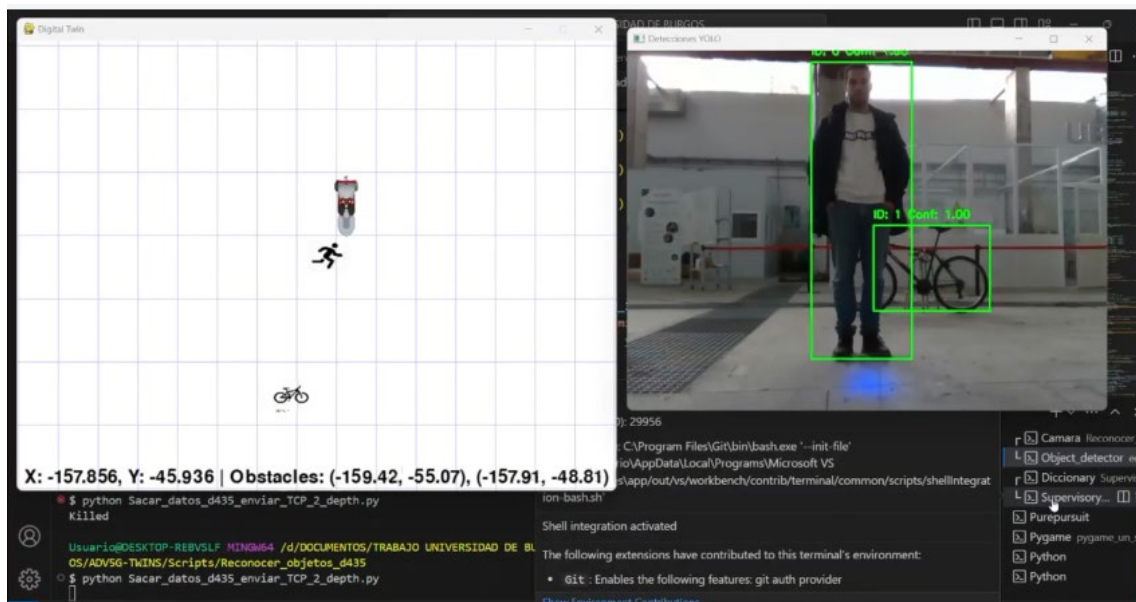


Ilustración 19 Detección de elementos por el object detector y visualización en digital twin. Posición 1

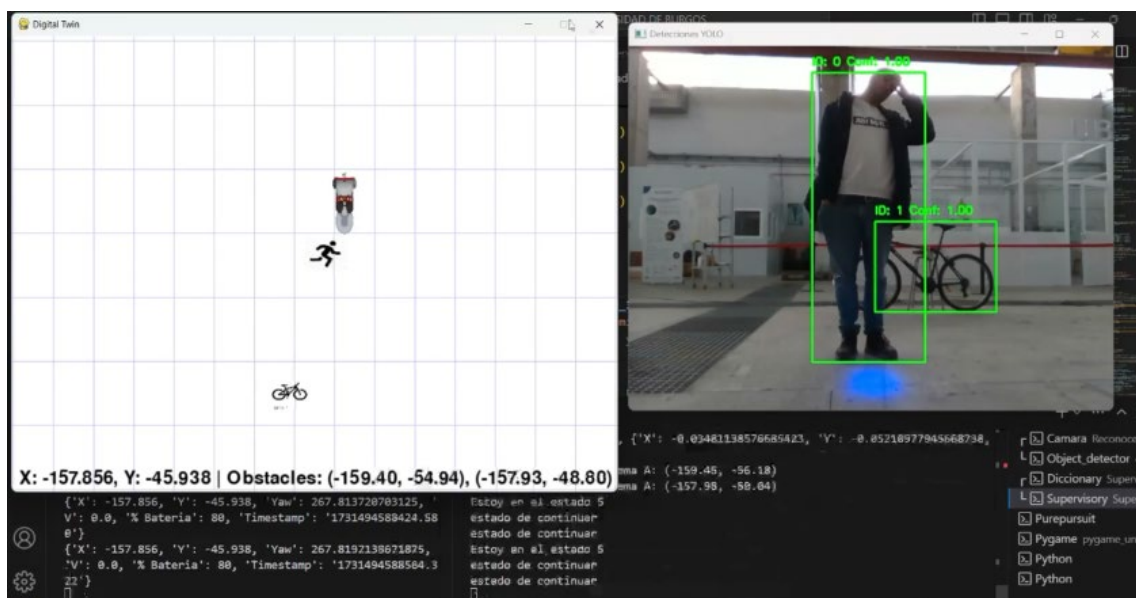


Ilustración 20 Detección de elementos por el object detector y visualización en digital twin. Posición 2

3.4.4. Resultados control de robot

El módulo Object Detector detecta una silla en la escena. El módulo Supervisory Control genera una trayectoria de evasión, considerando la posición del AMR y la posición del objeto en la escena. Para ello emplea una curva de Bezier con 3 puntos: uno en la posición del AMR, otro a una distancia lateral del objeto y otro por detrás del objeto.

Esa trayectoria se envía al Remote Controller. Este módulo genera las consignas de velocidad y dirección del AMR para que el robot siga efectivamente la trayectoria de evasión deseada.

En el video, el objeto percibido en la escena es una silla y se puede observar como el AMR genera y sigue una trayectoria de evasión (Ilustración 20-22). En estas imágenes se han superpuesto los puntos de paso empleados para genera la trayectoria (circulo azul) y la posición del objeto a esquivar (cruz naranja).

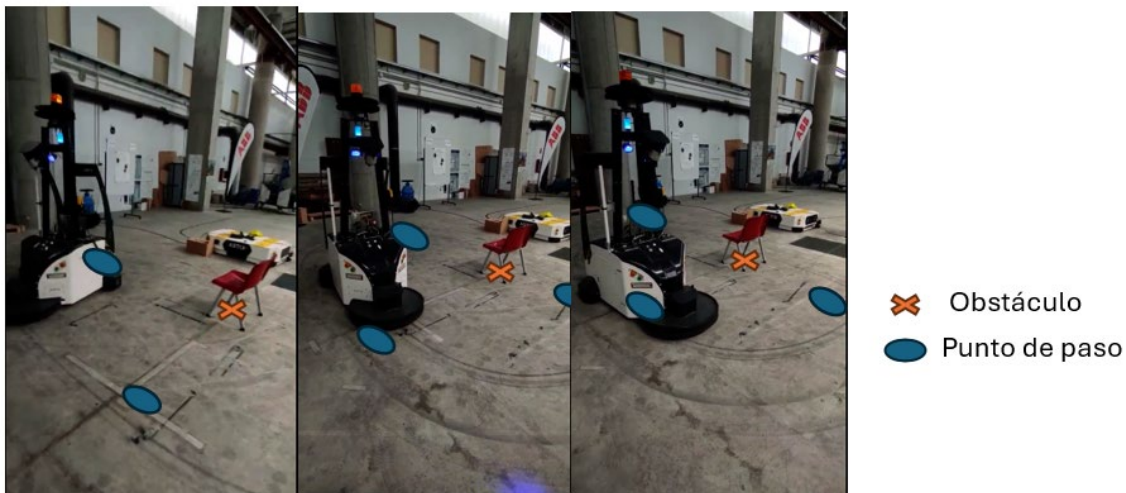


Ilustración 21 Trayectoria de evasión parte 1



Ilustración 22 Trayectoria de evasión parte 2

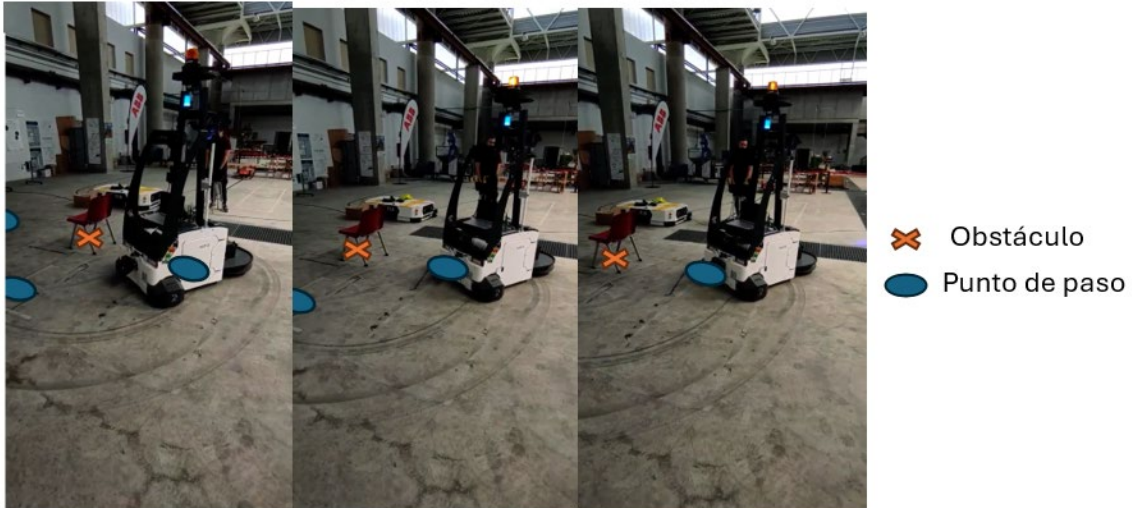


Ilustración 23 Trayectoria de evasión parte 3

3.5. Pruebas en entorno relevante

3.5.1. Entorno relevante

Las pruebas se han realizado en el aparcamiento de IMDEA Networks. En la Ilustración 23 se muestra el plano de IMDEA Networks y la ubicación del aparcamiento.

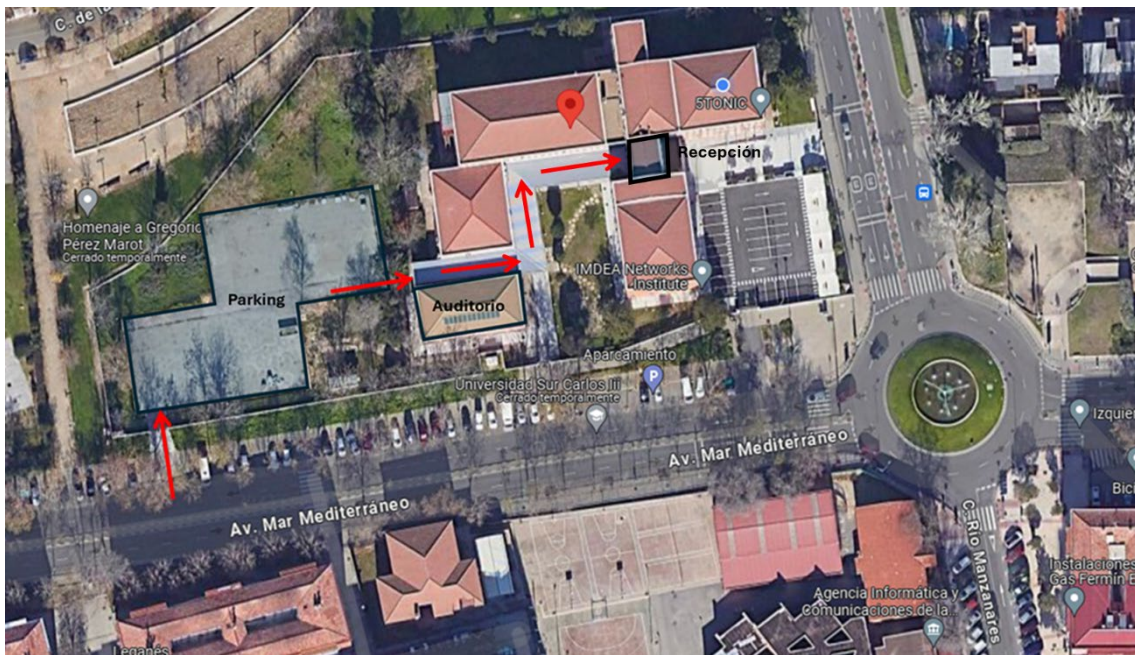


Ilustración 24 Plano del entorno relevante

3.5.1.1. Configuración de la red

La principal área de cobertura es la sala de experimentación (X3, mostrada en la Ilustración 24), que es la principal instalación de experimentación de 5Tonic. El objetivo de esta área no es sólo tener acceso a la tecnología 5G, sino

también a las herramientas de experimentación como, por ejemplo, el marco KPI o el panel gráfico de los experimentos.

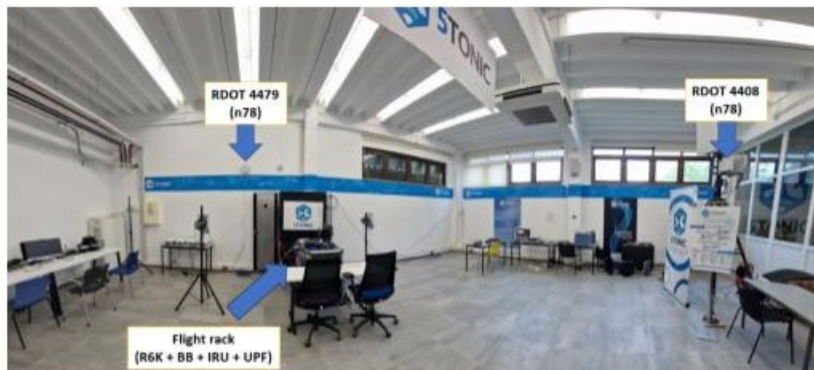


Ilustración 25 Equipo terminal de comunicaciones

En esta sala de experimentación se despliegan antenas interiores y exteriores para cubrir tanto la instalación de experimentación como el espacio exterior de 5Tonic.

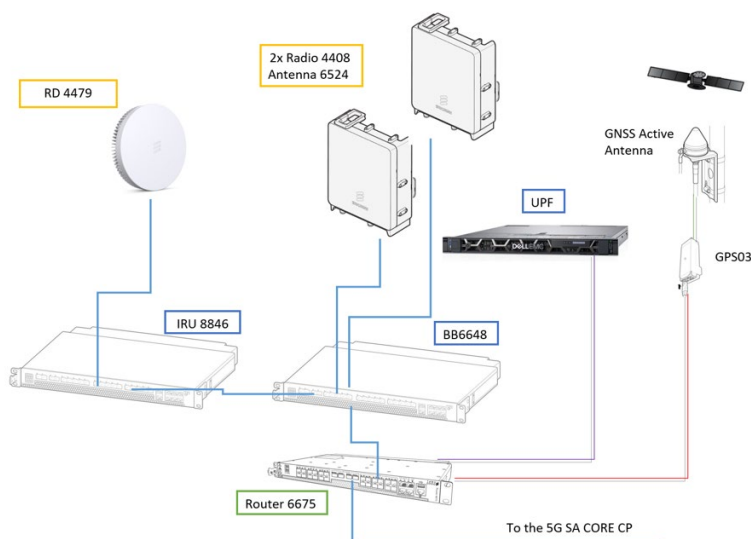


Ilustración 26 Diagrama de la solución X3 5G

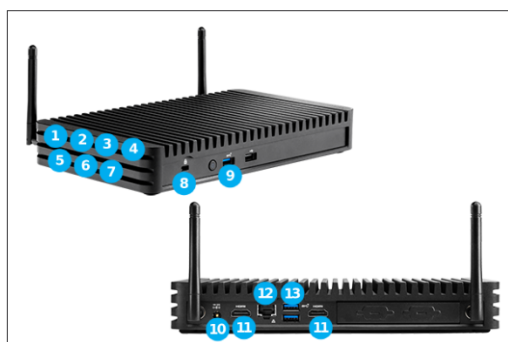
Las antenas proporcionan cobertura 5G NR SA de banda media (3,5 GHz) en la banda n78. El diagrama anterior también muestra la antena activa GNSS, utilizada para la sincronización horaria de los equipos RAN, incluidos gNB y rúters.



Ilustración 27 Antenas

3.5.1.2. Configuración del Edge

El servidor de aplicaciones empleado para correr las aplicaciones en el Edge es un Intel NUC 11 Rugged, con las siguientes características:



1. Intel® Core™ i5-1135G7 (i5-1145G7 if vPro is selected)
2. Intel® Iris™ Xe Graphics
3. 8GB LPDDR4X RAM
4. M.2 2280 key M and 22x42/80 key M slot for PCIe x4 Gen3 NVMe / AHCI or SATA3 SSD
5. 1x internal USB 3.0 header
6. 2x internal USB 2.0 headers
7. 2x RS232 serial port headers
8. Kensington Lock with Base Security
9. 1x front USB 3.1 gen 2 type A port
10. 12 - 24V DC rear jack, internal 2x2 power connector (12 -24V
11. Two HDMI 2.0a
12. Intel® i219-LM 10/100/1000 Mbps RJ45 Ethernet
13. 2x rear USB 3.1 gen 2 type A ports

Ilustración 28 Características Intel NUC 11 Rugged.

3.5.2. Componentes utilizados

El AMR es un Tribot 3Tn (Ilustración 28) equipado con una cámara Intel real Sense (Ilustración 29) y un LIDAR Hokuyo (Ilustración 30) .Para las comunicaciones 5G emplea el terminal de comunicaciones de la Ilustración 31. En la Ilustración 32 se muestran estos elementos instalados en el AMR, encontrándose el AMR en el entorno de pruebas relevante.



Ilustración 29 AMR Tribot 3Tn



Ilustración 30 Cámara Intel real Sense



Ilustración 31 Lidar Hokuyo



Ilustración 32 Equipo terminal de comunicaciones

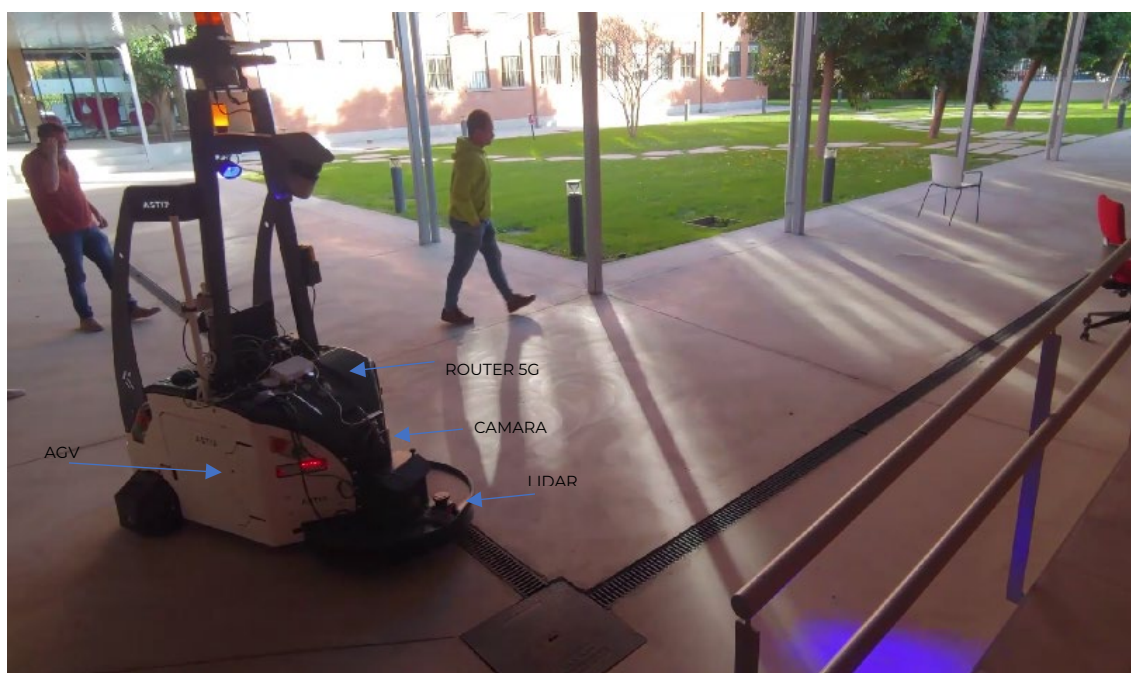


Ilustración 33 : AMR en el entorno de pruebas relevante equipado con una cámara, un lidar y un terminal de comunicaciones 5G

3.5.3. Resultados offloading

El AMR se mueve describiendo una trayectoria cíclica, los datos del Lidar y los frames de la cámara se envían al Edge donde son procesados por el Object detector. Este componente detecta objetos y personas.

Las ilustración 33 muestra la imagen captada por la cámara Intel Real Sense en el momento en el cual el Object Detector detecta una silla y una persona.

El elemento detectado se enmarca en un bounding box. En el centro de cada bounding box se puede observar una cruz. El centro del rectángulo indica el punto exacto del cual se toman las coordenadas del objeto. Encima del bounding box aparece una etiqueta con el nombre de la clase del objeto detectado. Al lado de la etiqueta nos muestra la confianza en la detección, el valor se muestra en tanto por 1. Por tanto, el valor máximo de confianza de detección es 1 y el mínimo es 0.

La ilustración 34 muestra la representación del AMR en el digital twin. En la parte de debajo de la ventana del digital twin se muestran las coordenadas del AMR y la presencia de obstáculos. La posición y la orientación del AMR en la pantalla se actualiza con el movimiento del AMR en tiempo real.

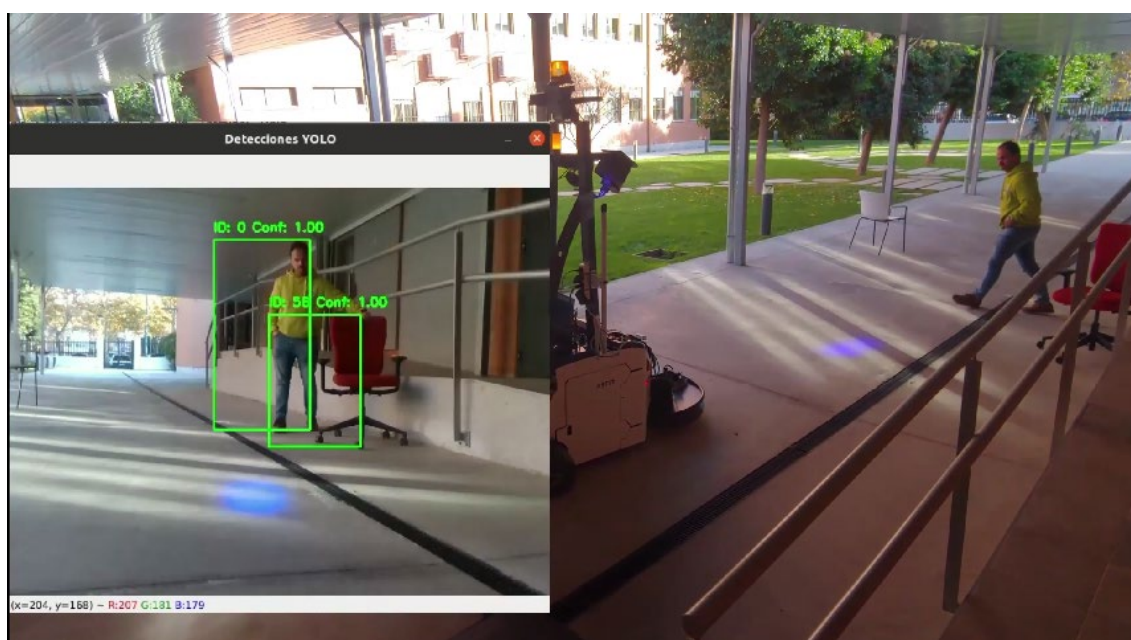


Ilustración 34 : Detección de una persona y una silla



Ilustración 35: Visualización del AGV en el digital twin mientras se encuentra en movimiento

Las ilustración 35 muestra simultáneamente los elementos detectados por el Object Detector (izquierda) y su representación en el digital twin (derecha). Las imágenes se van actualizando con el movimiento del AMR. Se puede observar la detección de dos sillas.

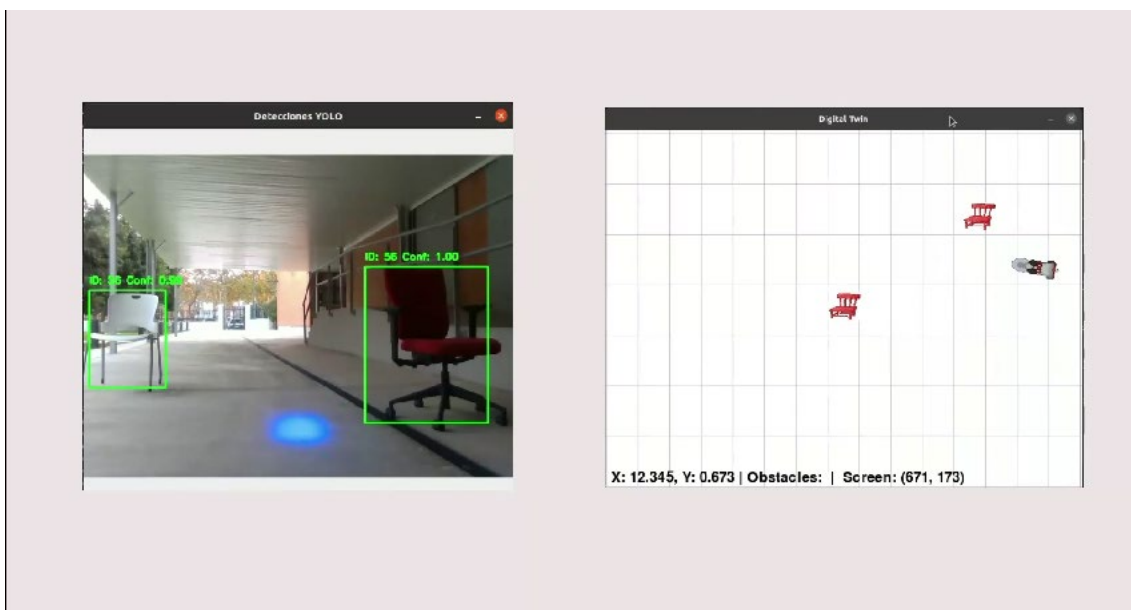


Ilustración 36: Detección de dos sillas simultáneamente y visualización en el digital twin

3.5.4. Resultados control robot

El AMR se mueve describiendo la trayectoria cíclica que se muestra en la Ilustración 36. Los datos del Lidar y los frames de la cámara se envían al Edge donde son procesados por el Object detector. Este componente detecta objetos y personas.

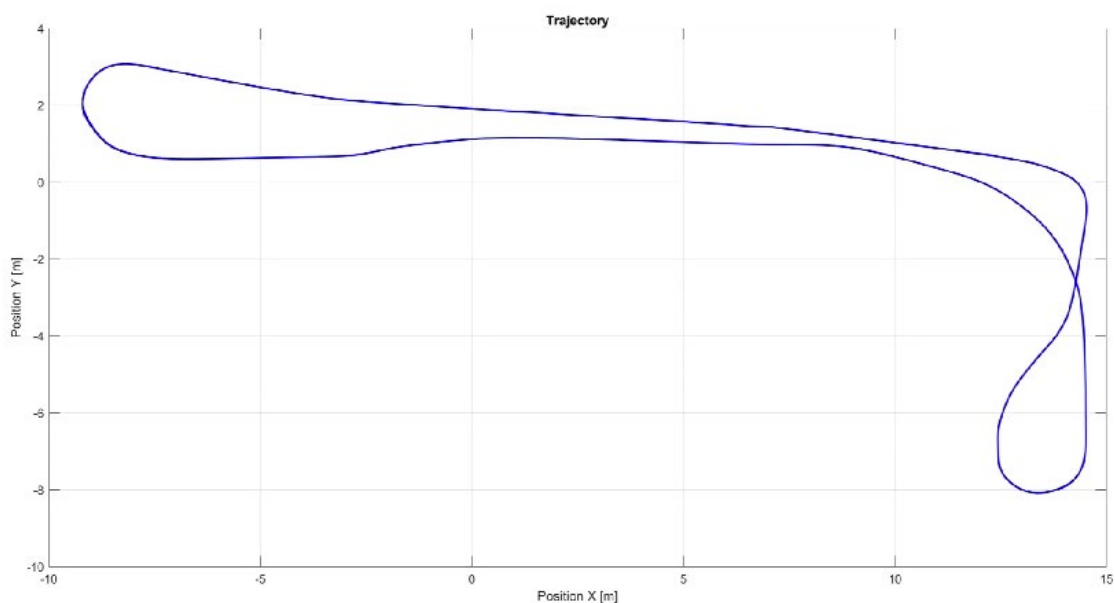


Ilustración 37 : Recorrido realizado por AMR en automático si no hay obstáculos que impidan el paso

El módulo Object Detector detecta sillas en la escena (Ilustraciones 37-38). El módulo Supervisory Control genera una trayectoria de evasión, considerando la posición del AMR y la posición del objeto en la escena. Para ello emplea una curva de Bezier con 3 puntos: uno en la posición del AMR, y dos a una distancia lateral del objeto (Ilustración 40). Esa trayectoria se envía al Remote Controller. Este módulo genera las consignas de velocidad y dirección del AMR para que el robot siga la trayectoria de evasión deseada.

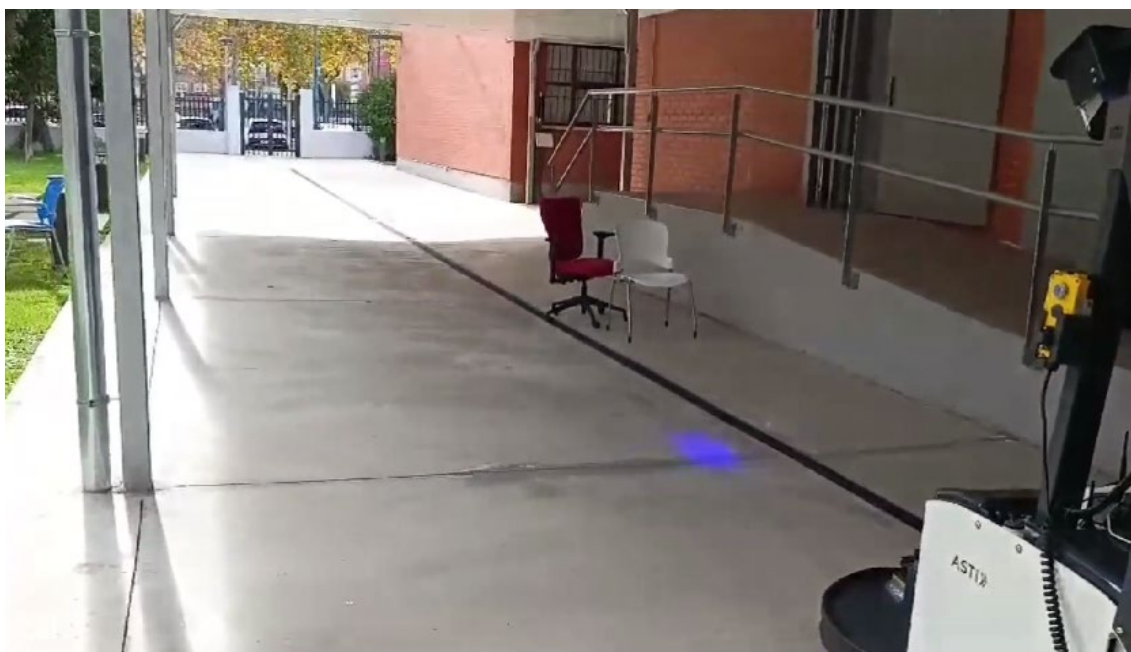


Ilustración 38 : AMR en movimiento se aproxima unas sillas que obstaculizan el paso



Ilustración 39 AMR en movimiento está cerca de las sillas que obstaculizan el paso, justo antes de realizar la maniobra de evasión



Ilustración 40 : Ruta del AMR (azul), posición del AMR (cruz roja), obstáculos detectados (círculos verdes).



Ilustración 41: Ruta del AMR (azul), posición del AMR (cruz roja), obstáculos detectados (círculos verdes). Se superpone la maniobra de evasión calculada (amarillo)



Ilustración 42: AMR realizando la maniobra de evasión

3.5.5. Medición de KPIs

3.5.5.1. Despliegue de red y Edge en 5TONIC

Tabla 4 KPIs de despliegue de red y Edge en 5TONIC

Id KPI	Nombre KPI	Valor esperado	Valor medido
--------	------------	----------------	--------------

K1	Latencia Uplink Lidar	<20 ms	8.78 ms
K2	Latencia Uplink video	<25 ms	8.9 ms
K3	Latencia Uplink AMR	<20 ms	8.89 ms
K4	Jitter uplink lidar	<1%	44.93%
K5	Jitter uplink video	<1%	43.40%
K6	Jitter uplink AMR	<2%	43.16%
K7	Latencia downlink	<20 ms	9.76 ms
K8	Jitter downlink	<1%	34.09%
K9	Ancho de banda sensores	>2Mbps	6 Mbps
K10	Latencia percibida en la aplicación	<3s	<2s
K11	Tiempo medio de detección	<1s	0.83563s
K12	Número de elementos detectados	>=3	3

3.5.5.2. Despliegue de red en 5TONIC y Edge UPV

Tabla 5 KPIs de despliegue de red en 5TONIC y Edge UPV

Id KPI	Nombre KPI	Valor esperado	Valor medido
K1	Latencia Uplink Lidar	<20 ms	18.96 ms
K2	Latencia Uplink video	<25 ms	19.57 ms
K3	Latencia Uplink AMR	<20 ms	18.21 ms
K4	Jitter uplink lidar	<20%	18.7%
K5	Jitter uplink video	<20%	23.7%
K6	Jitter uplink AMR	<20%	20%
K9	Ancho de banda sensores	>2Mbps	60 Mbps
K10	Latencia percibida en la aplicación	<3s	<2s
K11	Tiempo medio de detección	<1s	810 ms
K12	Número de elementos detectados	>=3	3

4. Conclusiones

En el proyecto se diseña una arquitectura que permite la ejecución de casos de uso que combinen inteligencia artificial y funcionalidades de control de robots. La arquitectura se implementa y se valida en laboratorio y en un entorno relevante con un AMR industrial.

Los valores promedio de latencia en todas las pruebas (uplink y downlink) se encuentran dentro de los valores esperados (<20 ms o <25 ms, según corresponda), lo cual es un indicador positivo de la capacidad del sistema para cumplir con los requisitos de tiempo real.

Gracias a los resultados del proyecto se podrán incorporar estas nuevas capacidades perceptivas y reactivas en los AMR, habilitando la implantación de procesos logísticos y productivos más flexibles y resilientes.