



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

ADV5G-TWINS-ROBOTICS-PORT

Resumen del proyecto

Versión 1.0

Autores principales	Sandra Moreno Olivares, Sheila Sánchez Rodríguez, Miguel Saura Herreros , Universitat Politècnica de València
Distribución	
Entregado	30/03/2025

Avanzando-5G-Gemelos Digitales-Puertos (TSI-063000-2021-114)

Advertencia

Este documento contiene información confidencial.

Más información

Coordinador del proyecto

Prof. David Gomez-Barquero

Universitat Politecnica de Valencia

iTEAM Research Institute

Camino de Vera s/n

46022 Valencia

Spain

Agradecimientos

A todo el equipo de Iteam y Robotnik por su esfuerzo y dedicación.

Abstract

Este documento consiste en un resumen general del desarrollo realizado para el lote ADV5G-TWINS-ROBOTICS-PORT en el que se presentan los distintos casos de uso, se realiza una pequeña evaluación de las prestaciones y se muestran los resultados obtenidos.

Descripción

Definición final de los casos de uso y resultados de aplicaciones avanzadas 5G-IoT de gemelos digitales en tiempo real para entornos logísticos portuarios.

Abreviaturas

AI	Artificial Intelligence (Inteligencia artificial)
AMR	Autonomous Mobile Robot (Robot móvil autónomo)
CAD	Computer Aided Design (Diseño asistido por ordenador)
CPU	Central Processing Unit (Unidad central de procesamiento)
GPS	Global Positioning System (Sistema de posicionamiento global)
HMI	Human-Machine Interface (Interfaz hombre-máquina)
IoT	Internet Of Things (Internet de las cosas)
KPI	Key Performance Indicators (Indicadores claves de rendimiento)
LiDAR	Laser Imaging Detection and Ranging
ML	Machine Learning (Aprendizaje automático)
PLC	Programmable Logic Controller (Controlador lógicos programable)
PTZ	Pan-Tilt-Zoom (Panorámica-inclinación-zoom)
QoE	Quality of Experience (Calidad de la experiencia)
QoS	Quality of Service (Calidad de servicio)
RGBD	Red-Green-Blue-Depth (Rojo-verde-azul-profundidad)
SLAM	Simultaneous Localization And Mapping (Mapeo y localización simultáneos)

Índice de contenidos

1. Introducción	1
2. Casos de uso	1
2.1. Robots de inspección (surveillance & security).....	1
2.2. Robots de logística (transporte interior)	2
2.3. Conducción remota en un gemelo digital con Cockpit	3
3. Evaluación del despliegue del Edge	5
4. Resultados de la monitorización de la flota	6
5. Líneas de investigación futuras.....	10
6. Referencias.....	11

Índice de tablas

Tabla 1 - Latencias del sistema	11
--	-----------

1. Introducción

El proyecto Avanzando-5G-Gemelos-Digitales desarrolla réplicas virtuales 3D de entornos industriales y logísticos, como fábricas y puertos, con representación fotorrealista y actualización en tiempo real de objetos dinámicos (vehículos, robots, mercancías, personas) mediante datos sensoriales.

El lote ADV5G-TWINS-ROBOTICS-PORT se encarga de los sistemas de robótica avanzada basada en AI/ML en el entorno portuario. El sistema de análisis se basa en una plataforma de robótica en la nube (cloud-robotics, en inglés) capaz de gestionar una flota de robots y analizar los datos recogidos por estos.

2. Casos de uso

Este apartado define los casos de uso del proyecto, especificando también el potencial uso del análisis basado en robótica en la nube en gemelos digitales.

2.1. Robots de inspección (surveillance & security)

Este caso de uso se centra en la implementación de un robot móvil autónomo (AMR) especializado en tareas de inspección, vigilancia y seguridad (*surveillance & security*) en un entorno portuario. El modelo RB-WATCHER (Robot móvil RB-WATCHER, 2025) de Robotnik, ilustrado en la siguiente figura, se ha seleccionado para este propósito y desplegado durante la fase final del proyecto, incluyendo el piloto final realizado en las instalaciones del puerto de Valencia.



Ilustración 1 - Robotnik RB-WATCHER

El RB-WATCHER es un robot diseñado para vigilancia y seguridad, equipado con sensores avanzados como una cámara bispectral PTZ con visión térmica,

una cámara RealSense D435 para percepción 3D y un sensor LIDAR Robosense RS-HELIOS-16P para mapeo y navegación. Además, cuenta con GPS de alta precisión, una IMU y un módulo SLAM 3D desarrollado por Robotnik para mejorar la localización en entornos complejos. Su estructura garantiza resistencia a diversas condiciones gracias a su chasis IP54, micrófono IP65 y altavoces para exteriores.

El robot genera un mapa tridimensional del entorno, permitiendo definir puntos de interés donde debe realizar tareas como estacionamiento, carga de baterías o inspección. También analiza continuamente el entorno, detectando fuego, personas u objetos y activando alarmas configurables según la zona o situación.

El RB-WATCHER puede operar de forma autónoma o teleoperada, notificando anomalías como incendios o presencia no autorizada a través de alarmas enviadas por correo electrónico o mostradas en su interfaz web. Esta solución mejora la vigilancia al superar las limitaciones de los sistemas de cámaras estáticas.

El gemelo digital del robot ofrece varias ventajas, como visualización de mediciones en el entorno, monitoreo del estado del robot, acceso a telecontrol e históricos de datos. También permite comparar el estado de la infraestructura para detectar cambios y facilita la formación de operarios en la gestión y teleoperación del robot mediante simulación.

2.2. Robots de logística (transporte interior)

Este caso de uso se centra en el uso de robots de transporte de interiores para el reparto de paquetería en entornos controlados, en este caso en las instalaciones del ITEAM en la Ciudad Politécnica de la Innovación (CPI) de la *Universitat Politècnica de València* (UPV).

El robot móvil autónomo empleado en la última etapa del proyecto y en el piloto final de logística ha sido el modelo RB-THERON (Robot móvil RB-THERON, 2025) de Robotnik, que se puede observar en la siguiente figura. Se ha seleccionado dicho AMR, ya que está especialmente diseñado para proyectos escalables que requieren flexibilidad y modularidad, lo que le permite integrar de forma sencilla su sistema con la plataforma de *cloud-robotics* del proyecto.



Ilustración 2 - Robotnik RB-THERON

El robot móvil autónomo RB-THERON de Robotnik está equipado con dos láseres UST20LX, dos cámaras RGBD Intel D435F y una IMU myAHRs+, lo que le permite navegar, localizarse y detectar obstáculos con precisión. Su sistema de tracción mejorado y su PLC de seguridad garantizan un funcionamiento seguro en entornos colaborativos con personas.

A nivel de software, el RB-THERON incorpora un sistema de control, localización y navegación, junto con una interfaz HMI intuitiva para facilitar su manejo y monitoreo. Es capaz de generar un mapa bidimensional del entorno para su localización y la definición de puntos clave en tareas logísticas, como carga de baterías, estacionamiento y manipulación de mercancía (pick & place).

El gemelo digital del robot ofrece ventajas como la visualización de datos en el entorno, monitoreo de flota, telecontrol y acceso a históricos. Además, permite la simulación y validación de estrategias de planificación y facilita la formación de operarios en la gestión de misiones dentro de un entorno simulado.

2.3. Conducción remota en un gemelo digital con Cockpit

Este caso de uso se centra en la conducción remota de un robot móvil en un entorno portuario. El sistema de conducción remota que se va a emplear dispone de al menos un puesto de control inmersivo o *cockpit* (Sistema cockpit inmersivo, 2024), que es el resultado de combinar un asiento que incluye un volante y pedales, una CPU con tarjeta gráfica NVIDIA RTX, una configuración de tres pantallas, un chaleco háptico y unas gafas de realidad virtual que permite al usuario una vista como si se encontrara dentro del robot para poder teleoperarlo de forma más intuitiva. La siguiente ilustración muestra los periféricos principales del sistema cockpit inmersivo.



Ilustración 3 - Periféricos principales del sistema cockpit inmersivo

El sistema se basa en la misma plataforma de cloud robotics que el control autónomo, pero se centra en proporcionar al usuario información del entorno mediante una interfaz gráfica. Su objetivo es permitir la conducción remota del robot con una sensación de telepresencia realista, transmitiendo vídeo en tiempo real con la velocidad y seguridad necesarias.

Para ello, tanto el robot como la estación de control remoto utilizan conectividad 5G, facilitada por antenas instaladas en el puerto y en el ITEAM. A nivel técnico, se requiere el uso de protocolos seguros y de baja latencia, junto con mecanismos que reduzcan la velocidad o detengan el robot si la conexión no cumple los requisitos mínimos de seguridad.

Durante las primeras etapas del proyecto, se emplearon dos SUMMIT-XL del ITEAM en pruebas realizadas en el velódromo de la UPV. En la fase final, se implementó el control remoto del RB-WATCHER en el puerto de Valencia y del RB-THERON en el entorno del ITEAM.

El gemelo digital aporta ventajas como la visualización y monitoreo del robot, acceso a históricos, comparación del estado de infraestructura y recreación de trayectorias para análisis o simulación. También facilita la formación de operarios en teleoperación mediante simulación.



Ilustración 4 - SUMMIT-XLs en el velódromo de la UPV

3. Evaluación del despliegue del Edge

Para evaluar la latencia total de la plataforma *cloud-robotics* del proyecto ADV5G-TWINS-ROBOTICS-PORT, es necesario considerar las distintas latencias involucradas en el proceso.

Cada robot ejecuta un agente ROS local que envía sus datos a un agente Telegraf local, el cual los almacena y los transmite al agente Telegraf desplegado en el Edge de la UPV. Este último almacena los datos en la base de datos InfluxDB, desde donde pueden ser monitorizados a través de Grafana o el Monitor de Flota.

Por tanto, este ciclo o flujo de datos implica múltiples etapas de procesamiento y transmisión, cada una de las cuales contribuye a la latencia total del sistema.

La **latencia total del sistema**, denominada **T_{total}**, se compone de las latencias individuales introducidas en los diferentes puntos del proceso:

$$\mathbf{T_{total}} = T_{ROS} + T_{Telegraf_local} + T_{Network_local_to_edge} + T_{Telegraf_edge} + T_{InfluxDB}$$

Con el propósito de obtener métricas fiables de las latencias que conforman el sistema, se realizaron mediciones continuas durante un período de tres horas, asegurando así promedios estadísticamente significativos.

Los datos relacionados con las latencias de los agentes de Telegraf (“T_{Telegraf_local}”, “T_{Network_local_to_edge}” y “T_{Telegraf_edge}”) obtenidos mediante los distintos *inputs.ping plugins* de Telegraf pueden visualizarse directamente haciendo las consultas correspondientes en el Grafana del Edge.

La siguiente tabla recoge los valores medios obtenidos tras las tres horas de duración de las pruebas de cada una de las latencias que componen el sistema.

Latencia del sistema	Min (m/s)	Avg (m/s)	Max (m/s)	Derv (m/s)
T_ROS	0,013	0,017	0,025	0,003
T_Telegraf_local	0,116	0,163	0,212	0,037
T_Network_local_to_edge	7,67	8,20	8,92	0,498
T_Telegraf_edge	180,0	266,0	414,0	94,6
T_InfluxDB	1,527	1,543	1,593	0,035

Tabla 1 - Latencias del sistema

Finalmente, para obtener la latencia total media del sistema se deben sumar los valores de la columna denominada "Avg", de la tabla anterior, de cada una de las latencias que conforman dicho sistema.

$$\begin{aligned}
 \mathbf{T_{total}} &= T_{ROS} + T_{Telegraf_local} + T_{Network_local_to_edge} + \\
 &T_{Telegraf_edge} + T_{InfluxDB} = 0,017 + 0,163 + 8,20 + 266,0 + 1,543 \\
 &= \mathbf{275,923 \text{ ms}}
 \end{aligned}$$

Con lo que la latencia total del sistema de la plataforma *cloud-robotics* desarrollada en el lote ADV5G-TWINS-ROBOTICS-PORT es inferior a 276 ms.

4. Resultados de la monitorización de la flota

Una vez se ha desplegado correctamente la plataforma *cloud-robotics* del proyecto y los robots se encuentran encendidos y enviando datos al Edge de la UPV, se han realizado varias pruebas de consultas para verificar que los usuarios autenticados en el sistema y con acceso a la base de datos puedan visualizar o extraer datos de los robots del InfluxDB del Edge.

La siguiente ilustración demuestra de manera exitosa que un usuario autenticado en el sistema es capaz de acceder a los datos de los tres casos de uso almacenados en la base de datos del Edge de la UPV para su posterior análisis.

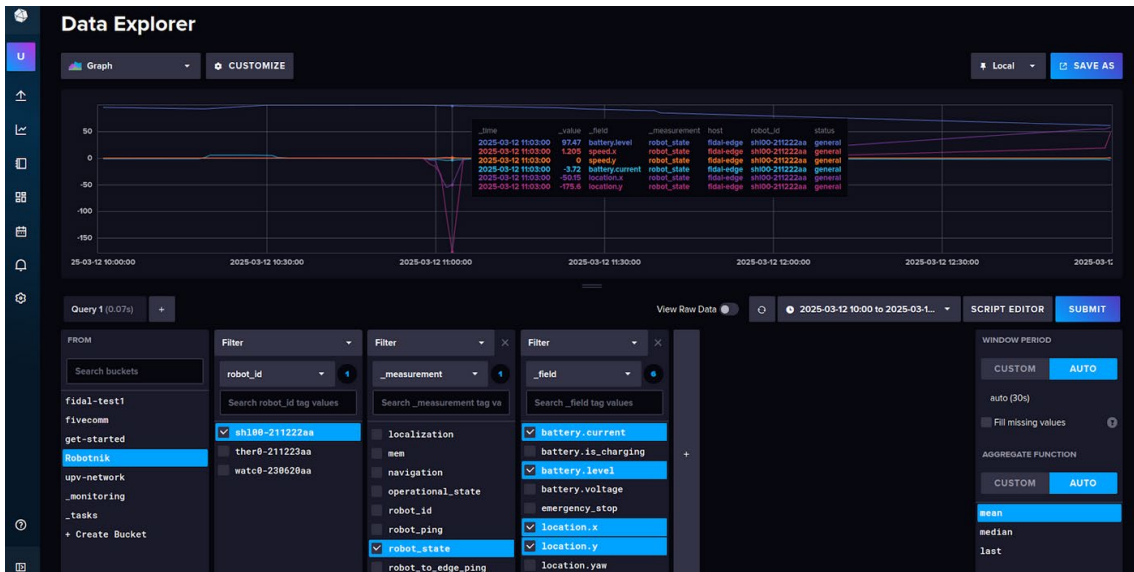


Ilustración 5 - Correcto almacenamiento de los datos en InfluxDB

Por otra parte se ha comprobado que usuarios autenticados en el sistema de la plataforma *cloud-robotics* desarrollada en el lote ADV5G-TWINS-ROBOTICS-PORT, pueden visualizar correctamente los datos almacenados en la base de datos a través de Grafana y crear *dashboards* con las gráficas que crean necesarias para su visualización y análisis.

La siguiente ilustración demuestra que un usuario autenticado en el sistema y con derechos de acceso puede acceder a Grafana, entrar en un *dashboard* y visualizar o editar los datos representados.



Ilustración 6 - Correcta visualización de datos en Grafana

Además, se procede a verificar que las interfaces HMI de los robots cumplen con las funcionalidades y a evaluar la correcta implementación y operatividad

de las características diseñadas para la interacción y control de los robots del proyecto.

En las siguientes ilustraciones se pueden evaluar varias funcionalidades del HMI:

- **Acceso autenticado:** Permite solo a usuarios autorizados visualizar la interfaz del robot.
- **Gestión de mapas:** Permite cambiar, crear y eliminar mapas, deteniendo la localización durante los cambios.
- **Localización en el mapa:** Muestra en tiempo real la posición del robot respecto a los elementos de su entorno.
- **Estado de navegación y localización:** Visualiza la ubicación del robot y los datos obtenidos de sus LiDAR.
- **Monitoreo de batería:** Indica el nivel exacto de carga mediante un icono, que muestra también si se encuentra cargando.
- **Estado de operación y control:** Muestra información en tiempo real sobre el funcionamiento del robot y el estado de sus tareas.
- **Visualización de cámaras:** Permite seleccionar y maximizar la vista de distintas cámaras instaladas.
- **Alertas y notificaciones:** Incluye iconos y ventanas emergentes para informar sobre eventos críticos.

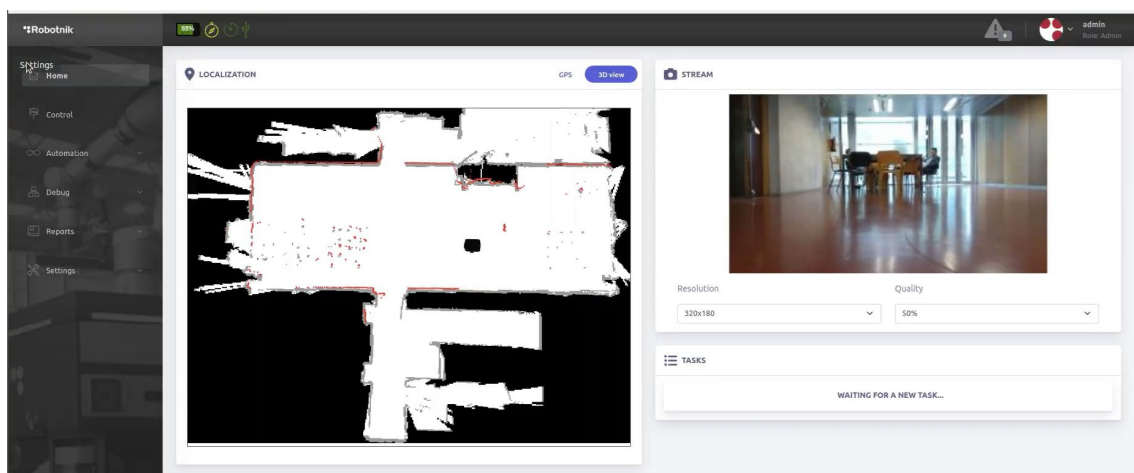


Ilustración 7 - Visualización de la localización y navegación y generación de mapas.

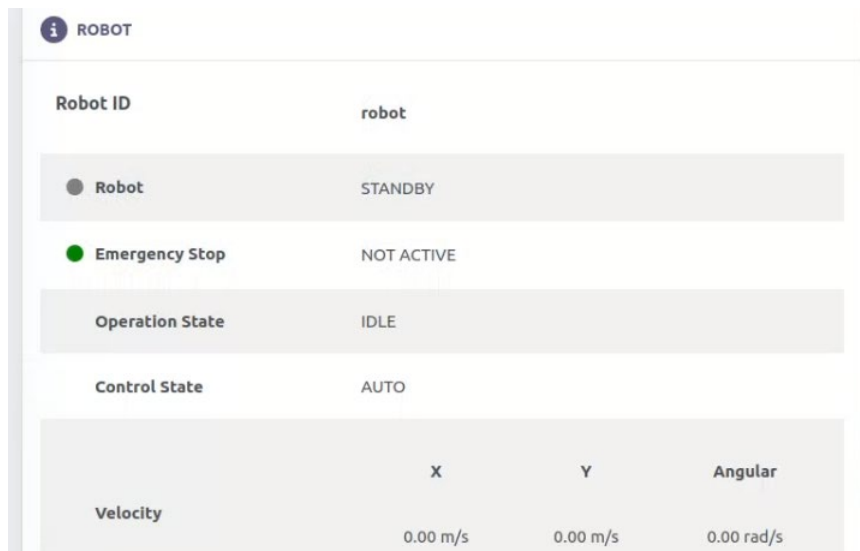


Ilustración 8 - Estado de control y de operación del robot en el HMI

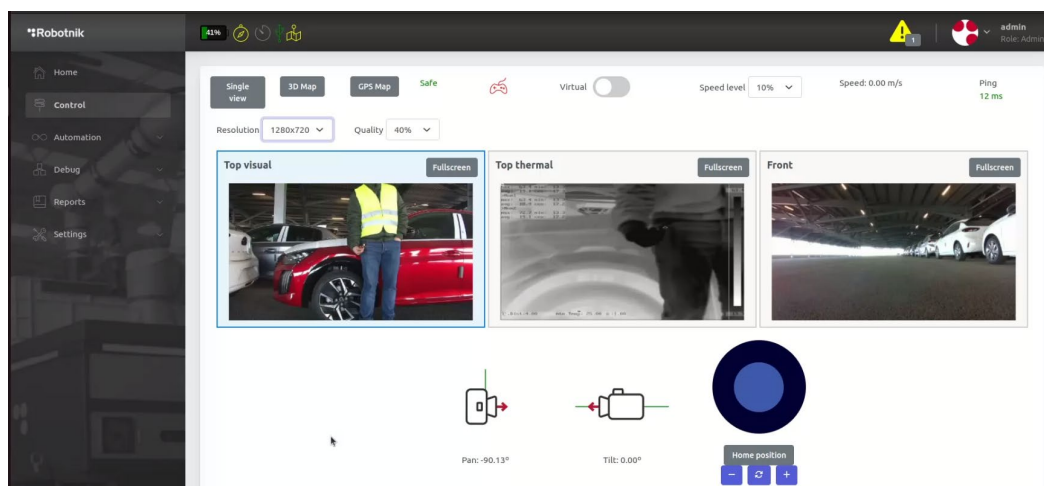


Ilustración 9 - Indicadores de alarmas y alertas desde el HMI

Finalmente, se procede a verificar que las interfaces HMI del Monitor de Flota, o en inglés *Fleet Monitor*, para la supervisión y el control de la flota robótica del proyecto, cumplen con las funcionalidades especificadas previamente.

La siguiente ilustración demuestra que el Monitor de Flota ofrece un punto de acceso único para la gestión de la flota, visualizando en la pestaña “Robot control” todos los robots que componen la flota, incluyendo sus datos esenciales (como número de serie y dirección IP correspondiente) y el estado de ejecución en el que se encuentran.

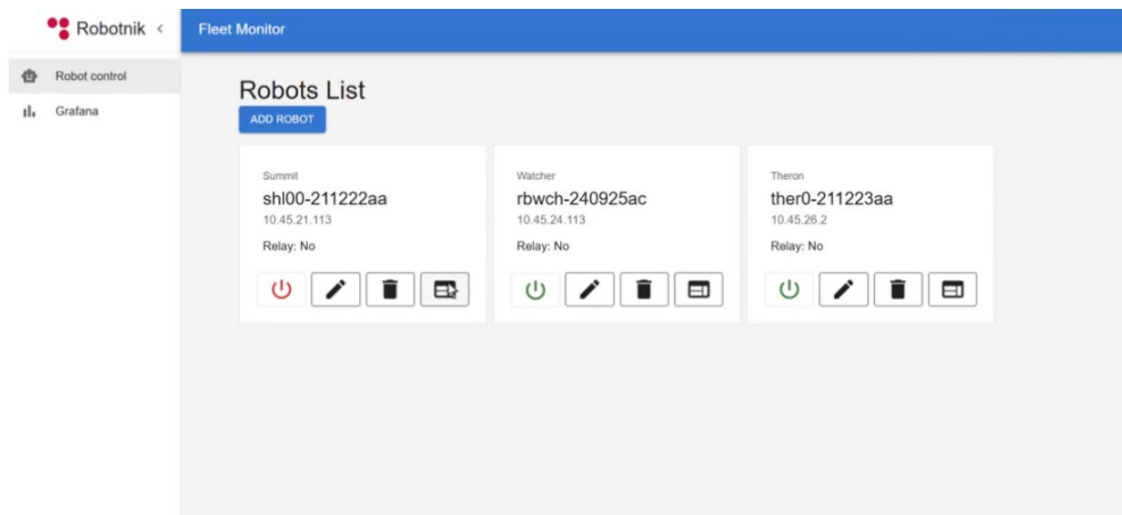


Ilustración 10 - HMI del monitor de flota

5. Líneas de investigación futuras

Este apartado plantea posibles líneas de investigación futuras en el campo de las aplicaciones avanzadas 5G-IoT de gemelos digitales en tiempo real para entornos logísticos portuarios.

Las futuras líneas de investigación más destacadas en el uso de aplicaciones avanzadas 5G-IoT de gemelos digitales en tiempo real para entornos logísticos portuarios serían las siguientes:

- Desarrollo de gemelos digitales para optimización de rutas y entrega en tiempo real.
- Implementación de sistemas de inspección automatizados utilizando sensores y cámaras de alta resolución con procesamiento de inteligencia artificial.
- Aplicación de Big Data para análisis predictivo y toma de decisiones en operaciones portuarias.
- Desarrollo de sistemas de seguridad avanzados utilizando reconocimiento de matrículas y vigilancia mejorada.
- Desarrollo de aplicaciones de realidad aumentada y virtual para formación y simulación de circulación en escenarios portuarios.
- Implementación de sistemas de monitoreo en tiempo real para la verificación y control del estado de infraestructuras y flotas robóticas..
- Investigación en la aplicación de Network Slicing para personalizar la red 5G según las necesidades específicas de diferentes operaciones portuarias.
- Desarrollo de sistemas de gestión energética inteligente para fomentar la sostenibilidad en los puertos.
- Implementación de soluciones IoT para el seguimiento y gestión de activos portuarios en tiempo real.

Estas líneas de investigación podrían contribuir significativamente al avance de las aplicaciones 5G-IoT en entornos logísticos portuarios, mejorando la eficiencia, seguridad y sostenibilidad de las operaciones.

6. Referencias

1. *Robot móvil RB-THERON*. (13 de 01 de 2025). Obtenido de Robotnik: <https://robotnik.eu/es/productos/robots-moviles/rb-theron>
2. *Robot móvil RB-WATCHER*. (08 de 01 de 2025). Obtenido de Robotnik: <https://robotnik.eu/es/productos/robots-moviles/rb-watcher>
3. *Robot móvil SUMMIT-XL*. (08 de 01 de 2025). Obtenido de Robotnik: <https://robotnik.eu/products/mobile-robots/rb-summit>
4. *Sistema cockpit inmersivo*. (10 de 12 de 2024). Obtenido de Next Level Racing: <https://nextlevelracing.com/products/next-level-racing-flgt-formula-1-and-gt-simulator-cockpit/?lang=es>
5. *Thermal PTZ Cameras*. (09 de 01 de 2025). Obtenido de Link: <http://zuian.jp/products/thermal-ptz-cameras>