

ACG279/8b: Aprobación del Laboratorio Singular "WIN-NET-LAB".

- Aprobado en la sesión ordinaria de Consejo de Gobierno de 23 de mayo de 2025

Laboratorio Singular

**Wireless and INnovative NETworks
LAB**

(WIN-NET-LAB)

Firma (1): JORGE NAVARRO ORTIZ
En calidad de: Solicitante



1. Introducción

La transformación digital que impulsa la Industria 4.0 demanda la adopción de nuevas soluciones y tecnologías que mejoren los sistemas de producción industrial. Tradicionalmente, las aplicaciones en entornos industriales presentan requisitos temporales muy estrictos, lo que ha llevado al desarrollo de soluciones cableadas que a menudo resultan costosas, difícilmente interoperables, poco flexibles y, en algunos casos, propietarias. En este contexto, la tecnología *Time Sensitive Networking* (TSN) ha ganado popularidad como una solución clave para estos desafíos, siendo un pilar fundamental en la transición hacia la fábrica inteligente del futuro.

De manera similar, las redes móviles de quinta y sexta generación (5G y 6G) ofrecen una conectividad mejorada con altas prestaciones. En entornos industriales, estas tecnologías inalámbricas permiten que las plantas de producción sean más flexibles, autónomas y eficientes, pudiendo incluso complementar o reemplazar las tradicionales conexiones cableadas. 5G y 6G reducen los costes de instalación y mejoran la flexibilidad operativa.

La integración de tecnologías deterministas (TSN) con las redes 5G/6G en entornos industriales y de IoT (*Internet of Things*) se revela como crucial para satisfacer las estrictas demandas de la Industria 4.0, especialmente en lo que respecta a comunicaciones ultra fiables y de baja latencia (URLLC, *Ultra Reliable Low Latency Communications*), necesarias para la interconexión fluida, eficiente, robusta y flexible de máquinas, sensores, actuadores y robots.

Aunque estas soluciones atraviesan un momento prometedor, su experimentación, validación e implementación en entornos industriales reales aún se encuentran en una etapa temprana y mayormente experimental. Además, existen pocas plataformas de experimentación que cuenten con las funcionalidades y el equipamiento adecuados para evaluar de manera efectiva las soluciones y casos de uso propios de la Industria 4.0 y 5.0. Por todo lo anterior, se justifica la necesidad de un laboratorio singular (WIN-NET-LAB) que integre infraestructuras de vanguardia para desarrollar investigación disruptiva en redes de nueva generación, incluyendo la integración de comunicaciones 5G/6G, WiFi, IoT con redes deterministas (TSN). El laboratorio singular WIN-NET-LAB que el grupo de investigación WiMuNet (<https://wimunet.ugr.es>) propone proporcionará una plataforma esencial para el diseño, experimentación, puesta a punto y demostración de estas tecnologías en aplicaciones robóticas y de la Industria 4.0 y 5.0, tanto para la Universidad de Granada como para otros grupos de interés.

WIN-NET-LAB como laboratorio especializado, único y complementario a otros ya existentes en el panorama nacional, permitirá analizar los requisitos y características específicas de las redes industriales, probar el rendimiento de prototipos TSN y 5G/6G avanzados, y servir como prueba de demostración de la viabilidad de diferentes configuraciones de estas tecnologías en entornos industriales y de IoT reales.

Como resultado se espera generar conocimiento que permitan el uso eficiente de estas tecnologías por parte de todas las partes implicadas: investigadores, fabricantes, desarrolladores de servicios, integradores, proveedores de contenidos y operadores.

Firma (1): JORGE NAVARRO ORTIZ
En calidad de: Solicitante



WIN-NET-LAB estará abierto al tejido empresarial regional, nacional e internacional para proyectos y actividades de i+D+I, así como a otros laboratorios que pueden complementarse con las capacidades únicas del proyecto que se propone, persiguiendo una mayor competitividad de empresas, abriendo tanto nuevas líneas de investigación como de negocio.

En última instancia, los resultados que se obtengan en el laboratorio impulsarán la transformación digital de los procesos productivos, facilitando la creación de un ecosistema digital más eficiente, flexible y resiliente en los ámbitos de la Industria 4.0 y 5.0, situando a la Universidad de Granada como líder y actor principal en la generación de conocimiento en estos entornos.

Firma (1): JORGE NAVARRO ORTIZ
En calidad de: Solicitante



2. Singularidad de la investigación

La singularidad de WIN-NET-LAB radica en proporcionar una plataforma de vanguardia para la investigación en redes de nueva generación, facilitando la experimentación y demostración de comunicaciones 5G/6G, WiFi e IoT, comunicaciones deterministas, así como su uso en aplicaciones robóticas y de la Industria 4.0 y 5.0:

- **Red 5G y 6G de laboratorio:** Operando en bandas de frecuencia de hasta 6 GHz (*Frequency Range 1*) y en bandas milimétricas (*Frequency Range 2*, 24-30 GHz). Esta infraestructura permite evaluar sistemas 5G y 6G, tanto en su rendimiento extremo a extremo, como en funcionalidades clave, incluyendo URLLC, *Massive IoT*, *Network Slicing*, *Time Sensitive Communications*, patrones TDD, así como numerología escalable.

Además, este equipamiento facilita la creación de demostradores y prototipos para casos de uso realistas.

- **Red 5G privada para entornos de exterior e interior:** Compuesta por varias estaciones base y un núcleo de red 5G (RAN y CORE) conforme con 3GPP. Esta red se desplegará en el Centro de Investigación de Tecnologías de la Información y Comunicaciones (CITIC), y será de uso exclusivo de la UGR para sus investigaciones. Esta red 5G privada permitirá realizar mediciones de cobertura, propagación, canal inalámbrico, relación señal-ruido, retardo y movilidad, incluyendo traspasos entre celdas.

- **Equipamiento de redes deterministas:** el laboratorio cuenta con switches TSN, tarjetas TSN y nodos de configuración centralizada (CNC). Este equipamiento permite evaluar protocolos de sincronización como IEEE 1588 y IEEE 802.1AS, y funcionalidades avanzadas para transmisión determinista de datos con baja latencia, incluyendo *Time Aware Shaper* (IEEE 802.1Qbv), *frame pre-emption* (IEEE 802.1Qbu & 802.3br) y TSN asíncrono (IEEE 802.1Qcr).

La integración de esta infraestructura con 5G como un puente TSN virtual, como en el proyecto 6G-CHRONOS, posibilita la evaluación experimental de comunicaciones inalámbricas deterministas.

- **Infraestructura de redes Wi-Fi:** El laboratorio dispone de *routers* WiFi avanzados, lo que permite realizar pruebas con Wi-Fi 6, MU-MIMO, 160 MHz y configuraciones de red avanzadas. Esta infraestructura permite la investigación en conectividad de alta velocidad en entornos interiores con múltiples dispositivos concurrentes.

- **Infraestructura de IoT:** La infraestructura del laboratorio incluye múltiples *gateways* LoRaWAN (IMST *Lite Gateway*, Pycom *PyGate*) y nodos LoRaWAN como Pycom FiPy, Heltec LoRa32, TTGO LoRa32, entre otros. También disponemos de servidores de red y aplicación LoRaWAN virtualizados, así como sensores IoT personalizables. Cabe destacar que nuestra infraestructura LoRaWAN está disponible para experimentación por parte de la comunidad científica gracias a nuestra plataforma 6G-LoRaGRAN (<https://loragran.ugr.es/>), desarrollada dentro del proyecto europeo 6G-SANDBOX (único proyecto de academia de los 7 concedidos, de 36 propuestas realizadas, véase



<https://6g-sandbox.eu/6g-sandbox-1st-open-call-winners/>). 6G-LoRaGRAN integra nuestra red LoRaWAN con las redes troncales 5G de Málaga, Berlin y Granada, y permite el desarrollo de algoritmos de gestión de *network slicing* para LoRaWAN.

- **Tecnologías de red cableada y de medidas:** El laboratorio cuenta con *switches* Ethernet, SDN, herramientas de generación de tráfico, análisis de tráfico con *timestamp hardware* y contadores de pulso para medidas de sincronización. Esta infraestructura permite la medida y análisis de indicadores de rendimiento.

- **Robots móviles autónomos (AMR) y robots manipuladores móviles:** Las redes 5G y 6G introducen una nueva dimensión para conectar y operar robots móviles. Estos robots permiten evaluar el uso de 5G y 6G en la conexión y control de robots móviles en entornos exteriores e interiores. Este equipamiento permitirá evaluar el funcionamiento de robots móviles en entornos aprovechando las funciones nativas de la nube y de descarga de las redes 5G y 6G para permitir operaciones robóticas en la nube totalmente flexibles y colaborativas. El equipamiento incluye gafas de realidad extendida y guantes hápticos para experimentación en control remoto de robots.

- **Célula de ensamblaje industrial:** Esta plataforma real de Industria 4.0 y 5.0 simula un proceso de ensamblaje flexible y automatizado, compuesto por cinco etapas: ensamblaje, manipulación, inspección de calidad, transferencia y almacenamiento/expedición. Este equipo permite llevar a cabo experimentación y demostración sobre la posibilidad de introducir las tecnologías inalámbricas 5G-6G para reemplazar las tradicionales tecnologías cableadas en las comunicaciones de la Industria 4.0 y 5.0.

Firma (1): JORGE NAVARRO ORTIZ
En calidad de: Solicitante



3. Nivel tecnológico

La Universidad de Granada dispone del laboratorio singular *Smart Wireless Technologies Lab*: laboratorio para la caracterización electromagnética de dispositivos y antenas para frecuencias de microondas y milimétricas (<https://investiga.ugr.es/laboratorio-singular/smart-wireless-technologies-lab/>). Este laboratorio fue inicialmente financiado con el Subprograma Estatal de Infraestructuras Científicas y Técnicas de Equipamiento (Plan Estatal I+D+I 2013-2016) a través del proyecto UNGR15-CE-3311 “Laboratorio de Comunicaciones 5G y sus aplicaciones”, en cuya solicitud el grupo WiMuNet participó activamente. No obstante, este laboratorio singular desarrolla su actividad fundamentalmente en torno a la caracterización y medida de dispositivos de radiofrecuencia y de sistemas radiantes, principalmente enfocado a la banda de milimétricas, más que en las comunicaciones móviles propiamente dichas. Actualmente, el laboratorio es gestionado por el grupo TIC-244 (<https://swat.ugr.es/facilities-gear/>), con el que nuestro grupo colabora en diferentes aspectos de propagación y antenas. Por lo tanto, **WIN-NET-LAB** es complementario a este laboratorio singular y no equivalente. Mientras que el primero se enfoca exclusivamente en antenas y propagación, **WIN-NET-LAB** incluye infraestructuras 5G/6G con los segmentos de red de acceso radio (RAN) y la red troncal (core), integrando tecnologías de *network slicing*, redes deterministas (TSN) y *Software Defined Networks* (SDN).

En el entorno nacional existen diversas infraestructuras destinadas a la investigación y demostración en redes 5G/6G. Entre ellas, destacan:

- **5TONIC** (<https://www.5tonic.org/>). Ubicado en Madrid y fundado por Telefónica y el Instituto IMDEA Networks, su objetivo es crear un entorno global y abierto donde miembros de la industria y la academia puedan colaborar en proyectos de investigación e innovación relacionados con tecnologías 5G. Gracias a su colaboración con operadores y fabricantes (e.g., Telefónica, Huawei, Nokia, Ericsson, Cisco), 5TONIC cuenta con equipos, servicios y aplicaciones precomerciales.
- **Piloto 5G Galicia** (<https://gaiastech.xunta.gal/es/nodos/nodo-5g/telefonica-5g-galicia>)
 Gestionado por la Universidad de Vigo, trabaja tanto en casos de uso relevantes (vigilancia por reconocimiento facial, vigilancia marítima con drones, procesos críticos industriales, turismo con realidad aumentada, educación 4.0, Smart Campus, coche conectado, etc.) como en despliegues de red 5G (incluyendo técnicas de gestión de red con virtualización de redes, *edge computing*, *network slicing*, etc.). A pesar de ser una iniciativa muy interesante que aborda casos de uso relevantes y despliegues de red 5G, su enfoque principal parece estar en la demostración de casos de uso con equipamiento proporcionado por empresas colaboradoras, posiblemente con objetivos comerciales.

En el entorno regional (Andalucía) se pueden encontrar varios laboratorios relacionados con tecnologías 5G:



Registro Electrónico	ENTRADA
REGAGE25e00030770045	11/04/2025 - 14:14:29

- El grupo MobileNet de la Universidad de Málaga cuenta con infraestructura (<https://mobilenet.uma.es/infraestructura/>) para: una red LTE/Wi-Fi de interior (UMAHetNet), una red 5G de interior (UMA 5G Network y Crowd Cells) y una red 5G para emergencias (Emergency cloud).
- El grupo MORSE de la Universidad de Málaga dispone de una infraestructura (<https://morse.uma.es/morse-lab/>) para la investigación en 4G/5G, que incluye dos entornos diferenciados: uno de interior y otro de exterior. El despliegue de interior se basa en emuladores de Keysight para 4G y 5G, además de una cámara anecoica, terminales comerciales y equipamiento avanzado de monitorización. Su despliegue exterior se basa en una colaboración con Telefónica, que incluye celdas Nokia en el campus de la Universidad de Málaga. También cuentan con despliegues en la ciudad de Málaga, en el puerto y en Torremolinos.

Cabe destacar que, hasta donde llega nuestro conocimiento, no existe ningún laboratorio de investigación de ámbito nacional que integre redes deterministas TSN y 5G/6G en un entorno real de Industria 4.0 (con una cadena de montaje con actuadores y sensores) en un mismo despliegue. Así, con este nuevo equipamiento, se pretende posicionar a la Universidad de Granada a la vanguardia de las redes móviles B5G/6G aplicadas a la Industria 4.0, integrando Industria 4.0, redes deterministas y redes B5G/6G. Esto la colocará en una posición estratégica para futuras convocatorias europeas. El equipamiento disponible y el uso de redes 5G/6G de baja latencia permitirán el desarrollo de pilotos y la experimentación con aplicaciones avanzadas para la Industria 4.0, como cadenas de producción, robots móviles autónomos (AMR) y robots manipuladores móviles.

Respecto a redes IoT / LoRaWAN, existen diferentes despliegues realizados por grupos de investigación de diferentes universidades andaluzas y españolas, normalmente centradas en la realización de medidas mediante sensores. No obstante, hasta donde sabemos, no existe en España una red LoRaWAN de investigación que esté disponible para la comunidad científica, ni que incluya tecnología *network slicing* para LoRaWAN, ni que se integre con redes 5G/6G de diferentes centros de investigación a nivel europeo, tal como realiza nuestra plataforma 6G-LoRaGRAN.

Firma (1): JORGE NAVARRO ORTIZ
En calidad de: Solicitante



4. Hitos científicos

Hitos científicos alcanzados

El grupo de investigación solicitante acredita una dilatada experiencia en investigación con resultados relevantes que ponen de manifiesto la importancia y la singularidad de la infraestructura que se ha ido desarrollando a lo largo de los años. En particular, hemos obtenido financiación participando en los siguientes proyectos (últimos cinco años). Para cada uno de ellos se identifican los principales hitos alcanzados que avalan nuestra propuesta de laboratorio singular.

- **6GNETWORKS-LAB:** *AI-native 6G Deterministic Networking Lab for Industry 4.0 Use Cases*. Ministerio de Asuntos Económicos y Transformación Digital, TSI-064100-2022-019. Programa UNICO I+D. Duración: 01/2023-06/2025. Financiación: 637.132€.

Como resultado de este proyecto de infraestructura, WiMuNeT pretende desplegar una plataforma experimental consistente en un laboratorio avanzado con equipamiento industrial junto con una red de acceso y core 5G/6G completos, además de equipos de computación, de medida y tests, necesarios todos ellos para replicar una cadena de montaje (Industria 4.0) junto con robots móviles con conexiones inalámbricas 5G/6G.

Más información: <https://wimUNET.UGR.es/projects/6gnetworks-lab.php>

- **6G-CHRONOS:** *AI-assisted beyond 5G-6G arCHitectuRe with deterministic netWorking for iNdustrIal commuNicatiOnS*. Ministerio de Asuntos Económicos y Transformación Digital, TSI-063000-2021-28. Programa UNICO I+D. Duración: 01/2022-06/2025. Financiación: 820.979€.

6G-CHRONOS ha diseñado y desplegado un servicio de red B5G/6G que incorpora el paradigma de redes deterministas (TSN) en una red 5G proporcionando la latencia baja y determinista necesaria para escenarios de robótica conectada y sistemas autónomos en la Industria 4.0. Además, 6G-CHRONOS ha generado soluciones de vanguardia para llevar a cabo la interoperabilidad entre las redes B5G/6G y TSN. Esto ha sido posible gracias a la participación de destacadas empresas del sector como Telefonica I+D, Safran y Neutron. Así mismo, se han investigado diferentes técnicas de direccionamiento de tráfico (*traffic steering*) a través de una red de acceso inalámbrica multitecnología a fin de proporcionar multiconectividad a los usuarios. Este proyecto activo ha generado 2 tesis doctorales y 4 tesis en desarrollo; 12 comunicaciones a congresos, 1 patente y 9 publicaciones en revistas indexadas en el JCR, de entre las cuales destacamos [IV_1, IV_2].

Más información: <https://wimUNET.UGR.es/projects/6gchronos.php>



- **6G-INSPIRE:** *Enabling Native-AI Secure deterministic 6G networks for hyper-connected environments.* Ministerio de Ciencia e Innovación. PID2022-137329OB-C43. Duración: 09/2023-08/2026. Financiación: 225.000€.

En este proyecto se propone analizar y validar un conjunto de técnicas, herramientas y arquitecturas con soluciones basadas en Inteligencia Artificial (IA) y el Aprendizaje Automático (ML) como habilitadores de la tecnología 6G mediante la optimización de las redes, y la sincronización temporal. Como resultado es posible satisfacer las exigentes restricciones de latencia de las aplicaciones en tiempo real, incluyendo la e-salud, la teleasistencia y la Industria 4.0, y muchas otras. Este proyecto en curso implica 5 tesis en desarrollo y ha generado 4 comunicaciones a congresos y 3 publicaciones en revistas indexadas en el JCR, de entre las cuales destacamos [IV_3, IV_4].

Más detalles: <https://wimUNET.UGR.es/projects/6ginspire.php>

- **5G-CLARITY:** *Beyond 5G Multi-Tenant Private Networks Integrating Cellular, Wi-Fi, and LiFi, Powered by Artificial Intelligence and Intent Based Policy.* European Commission H2020, Grant number 871428. Duración: 11/2019-04/2022. Financiación: 393.125€.

En este proyecto internacional hemos desarrollado y demostrado un sistema B5G para redes privadas que integra tecnologías 5G, Wi-Fi y LiFi, y se gestiona mediante redes autónomas basadas en IA. El primer pilar de este proyecto es una red de acceso inalámbrico heterogénea que integra tres tecnologías: B5G (versión 16), Wi-Fi y LiFi. El segundo pilar es un novedoso plano de gestión basado en los principios de las redes SDN y la virtualización de funciones de red (NFV), e impulsado por algoritmos de IA, con el fin de permitir la segmentación de la red (*network slicing*) y la gestión autónoma de la red.

Este proyecto está desarrollado por un consorcio de empresas (entre las que figuran fabricantes y operadores líderes mundiales), centros de investigación y universidades: IHP, Ericsson, InterDigital, i2CAT, Gigasys Solutions, pureLiFi, Bosch, Accelleran, Telefónica I+D, Universidad de Edimburgo, Universidad de Granada y Universidad de Bristol.

En 5G-CLARITY el grupo solicitante ha generado 2 tesis doctorales y 4 tesis en desarrollo; 13 comunicaciones a congresos, 1 capítulo de libro, 1 patente, 1 *white paper*, 15 *deliverables* y 18 publicaciones en revistas indexadas en el JCR, de entre las cuales destacamos [IV_5-IV_8].

Más información: <https://wimUNET.UGR.es/projects/5gclarity.php>

- **6G-LoRaGRAN:** *Integration of the University of Granada's LoRaWAN network in the 6G SANDBOX connectivity infrastructure.* European Commission H2020. 6G-SANDBOX Open Call for New Infrastructures and Functionalities. Duración: 09/2023-02/2024. Financiación: 60.000€.

Firma (1): JORGE NAVARRO ORTIZ
En calidad de: Solicitante



6G-LoRaGRAN ha incorporado la red LoRaWAN de la UGR en la infraestructura de conectividad 6G-SANDBOX. Esta integración permite, a nivel internacional, realizar experimentación remota en el ámbito de LoRaWAN. La red de la UGR se compone de una red operativa y una red de laboratorio (diseñada y mantenida por el grupo de investigación solicitante). 6G-LoRaGRAN facilita la experimentación remota de LoRaWAN utilizando las motas y la infraestructura LoRaWAN de la UGR. Se ha implementado una solución de segmentación de red (*network slicing*) en la red de acceso de radio LoRaWAN que permite asignar recursos de radio específicos para motas pertenecientes a diferentes verticales.

Más información: <https://wimUNET.ugr.es/projects/6gloragran.php>

Además de lo anterior, WiMuNet acumula experiencia en el diseño y modelado de arquitecturas de redes centrales 5G basadas en *Redes Definidas por Software y Virtualización de Funciones de Red* (por ejemplo, PID2019-108713RB-C53, TEC2016-76795-C6-4-R, TIN2013-46223-P, GENIL-PYR-2014-18 y GENIL-PYR-2014-20) en colaboración con destacados grupos de investigación nacionales de la UPC, la UC3M, i2CAT y UPV/EHU. WiMuNet cuenta con experiencia investigadora en IoT y comunicaciones de sensores (por ejemplo, B-TIC-568-UGR20, A-TIC-241-UGR18, TEC2011-27516, Acción Europea ICT COST IC 1304). El grupo también ha obtenido financiación (EQC2019-005605-P, EQC2018-004988-P y UNGR15-CE-3311) para infraestructuras de investigación y equipamiento científico, en particular para el desarrollo de un Laboratorio 5G.

A modo de resumen, a lo largo de su actividad el grupo solicitante acredita haber participado en más de 32 proyectos de investigación competitivos (2 proyectos europeos, 2 proyectos UNICO-5G, 14 proyectos nacionales) y 15 contratos de investigación para la transferencia de tecnología. Como resultados se han generado 12 tesis doctorales más 5 tesis en desarrollo, 26 TFM, 43 TFG, 148 comunicaciones a congresos, 13 libros o capítulos de libro, 12 patentes, 15 *deliverables* y 94 publicaciones en revistas indexadas en el JCR.

Más información: <https://wimUNET.ugr.es/publications.php>.

Hitos científicos esperados

La experiencia investigadora acumulada y el alto nivel competitivo para captar fondos sitúan a WiMuNeT en una posición estratégica sólida para liderar un laboratorio puntero en España. El laboratorio singular solicitado permitirá potenciar extraordinariamente las líneas de investigación desarrolladas en la Universidad de Granada, produciendo un salto cualitativo en su investigación y por tanto posibilitando el liderazgo nacional e internacional de la Universidad de Granada en el ámbito de las redes 5G Avanzadas/6G en general, y en particular de las *Redes Deterministas*, del uso de Inteligencia Artificial, y de la integración de 5G Avanzado/6G en las Industrias 4.0. y 5.0. Además, apoyándonos en los avances tecnológicos y los bancos de prueba experimentales desarrollados por la Universidad de Granada en el ámbito de 5G Avanzado/6G en los proyectos de investigación descritos anteriormente, el laboratorio solicitado permitirá avanzar en las líneas de trabajo descritas a continuación, posibilitando así alcanzar hitos científicos experimentales más ambiciosos en futuros proyectos.

Firma (1): JORGE NAVARRO ORTIZ
En calidad de: Solicitante



Línea 1: Redes 6G deterministas.

Time Sensitive Networking y *Deterministic Networking* (DetNet) son dos tecnologías diseñadas para satisfacer las necesidades de varias industrias, como audio/video profesional, redes eléctricas, banca, redes de transporte celular, y la Industria 4.0. TSN es un conjunto de estándares IEEE 802 que tiene como objetivo definir una tecnología de red convergente de capa 2 (L2) que garantice el transporte determinista de los flujos a través de redes IEEE 802. Por otro lado, DetNet puede considerarse como una extensión de TSN para proporcionar rutas con QoS (Quality of Service) determinista sobre segmentos de enrutamiento de Capa 3 (L3).

3GPP versión 16 (Release-16) propone una arquitectura que permite la integración de 5G y TSN con el objetivo de sustituir las conexiones cableadas por conexiones inalámbricas en redes de la Industria 4.0. En particular 3GPP Rel-16 permite encapsular el sistema 5G de modo que aparezca como un puente TSN virtual y, por lo tanto, para la red cableada TSN el sistema 5G aparece como un puente TSN más. Para lograr esta transparencia, la arquitectura de 3GPP Release-16 introduce funciones de traductor en los extremos de la red 5G, tanto en el UE (*User Equipment*) como en la UPF (*User Plane Function*).

Hito 1: Evaluación experimental de estaciones base URLLC para la integración 5G-TSN.

El correcto funcionamiento de la integración 5G-TSN basada en la arquitectura propuesta en el Release-16 requiere retardos extremo-a-extremo de la red 5G muy bajos (en torno al milisegundo o inferiores). Para alcanzar estos bajos retardos se evaluarán soluciones de baja latencia, como la transmisión radio con espaciados de subportadora (SCS) de 60 kHz y 120 kHz, con la consiguiente reducción de la duración del slot 250 μs y 125 μs, la planificación mini-slot, que permite la asignación de recursos de 7 y 2 símbolos OFDM (*Orthogonal Frequency-Division Multiplexing*) en la interfaz radio, así como la optimización de la configuración de transmisión TDD (*Time Division Duplex*) para obtener un menor retardo. La disponibilidad de las estaciones base en el laboratorio permitirá evaluar experimentalmente el impacto del sistema 5G incorporando estas soluciones de baja latencia en el rendimiento del puente TSN virtual y de la red TSN que incorpora dicho puente virtual. Adicionalmente, se evaluarán experimentalmente despliegues tanto de interior, con estaciones-base implementadas con SDR (*Software-defined radio*), como en exterior, con estaciones-base implementadas con RRH (*Remote Radio Head*) y vBBU (*Virtual Baseband Unit*).

Hito 2: Evaluación experimental de la interfaz radio para la integración 5G-TSN.

Una de las características principales de 5G ha sido la introducción de la operación en la banda *Frequency Range 2* en la interfaz radio, lo que proporciona mayores anchos de banda para la operación con espaciados de subportadora (SCS, *Subcarrier Spcaing*) elevados, como 60 kHz y 120 kHz. Actualmente, para lograr los requisitos de ultra alta confiabilidad, la mayoría de los despliegues comerciales para redes de la Industria 4.0 se realizan entre 3,4 y 3,8 GHz, donde el canal de propagación es relativamente rico en términos de eficiencia de difracción [IV_9]. Sin embargo, en 6G prevemos el uso de frecuencias milimétricas además de bandas por debajo de 6 GHz para redes industriales durante la próxima década [IV_10]. A este respecto, mediciones recientes muestran que, contrariamente a lo esperado, el bloqueo de señales causado por la propagación en la banda de milimétricas no es tan severo en plantas industriales de producción [IV_11]. La

Firma (1): JORGE NAVARRO ORTIZ
En calidad de: Solicitante



disponibilidad de equipos que operen en la banda de milimétricas permitirá evaluar experimentalmente el impacto del sistema 5G operando en la banda de milimétricas con SCS de 60 kHz y 120 kHz en el rendimiento del puente TSN virtual y de la red TSN que incorpora dicho puente virtual.

En este sentido, cabe esperar que 6G explote anchos de banda aún mayores en la banda de milimétricas, con SCS por encima de 120 kHz, y por tanto con reducciones aún mayores del slot y por tanto del retardo en la interfaz radio.

Hito 3: Evaluación experimental de soluciones de sincronización para la integración 5G-TSN.

La arquitectura del 3GPP Release-16 para la integración de 5G y TSN se basa fundamentalmente en que el sistema 5G opera como un *Reloj Transparente (Transparent Clock)*. Este hito consiste en evaluar experimentalmente la precisión de la sincronización proporcionada por dicho modelo de *Reloj Transparente* y verificar su capacidad para cumplir con el requisito de 1 μs establecido por el 3GPP para el sistema 5G. El laboratorio solicitado permitirá identificar las fuentes de imprecisiones de sincronización, así como evaluar su contribución al error de tiempo entre la entrada y la salida del sistema 5G y su impacto en el rendimiento general de la sincronización de tiempo. Adicionalmente, el laboratorio permitirá evaluar experimentalmente diferentes escenarios de sincronización temporal y casos de uso en redes 5G Avanzadas/6G. Así mismo, el laboratorio permitirá evaluar experimentalmente el beneficio proporcionado por otras soluciones de sincronización como por ejemplo *Reloj Frontera (Boundary Clock)* [IV_12].

Hito 4: Evaluación experimental de soluciones TSN nativas para 6G.

Para que la nueva generación inalámbrica 6G se afiance definitivamente en el entorno de la Industria 4.0, y reemplace a la conectividad cableada, esta debe proporcionar una confiabilidad determinista de grado similar a la cableada en una variedad de escenarios. Típicamente, 6G operará en entornos industriales con dispositivos estáticos interconectados que interactúen localmente, o incluso en enjambres de sensores y actuadores en robots y drones que se muevan rápidamente y que necesiten interconectarse entre sí, además de conectarse directamente a la red cuando estén separados del enjambre.

En la actualidad, las comunicaciones sensibles al tiempo, con TSN como tecnología dominante, tienen un rango de cobertura muy limitado y nula movilidad. La integración de la red inalámbrica 5G y TSN, con la red 5G actuando como un puente TSN virtual, evolucionarán en 6G para proporcionar un servicio TSN nativo, incluso en áreas extensas (y remotas) incrementando drásticamente las coberturas actuales y facilitando la movilidad [IV_11].

En este hito, se pretende explorar nuevas modalidades de TSN, como por ejemplo TSN Asíncrono (IEEE 802.1Qcr) y *frame pre-emption* (IEEE 802.1Qbu & 802.3br), como tecnologías potenciales para proporcionar en el futuro TSN nativo en áreas extensas e incluyendo movilidad. TSN Asíncrono incluye colas de prioridad y reguladores de tráfico por salto que limitan las ráfagas de datos, y por tanto permiten limitar el retardo máximo de los paquetes de un flujo [IV_13]. La gran ventaja de TSN Asíncrono es que no está basado en la sincronización gPTP (*Generalized Precision Time Protocol*) de todos los conmutadores de la red, lo cual facilita la escalabilidad de la red y abre por tanto nuevas posibilidades en áreas extensas. Aunque actualmente no existen conmutadores TSN

Firma (1): JORGE NAVARRO ORTIZ
En calidad de: Solicitante



comerciales que implementen el estándar IEEE 802.1Qcr, los equipos conmutadores TSN comerciales suelen soportar IEEE 802.1Qbu & 802.3br y IEEE 802.1Qbv, que incluyen colas de prioridad, pero no reguladores de tráfico. Por tanto, se podrán realizar evaluaciones experimentales para las modalidades *frame pre-emption* (IEEE 802.1Qbu & 802.3br) y TSN Asíncrono (IEEE 802.1Qcr) pero sin regulación de tráfico.

Línea 2: AI/ML para redes 6G.

En los últimos años se está investigando notablemente la aplicación de AI/ML a los sistemas 5G Avanzados de diversas formas, incluyendo el uso en algoritmos de capa 1 y 2 (como estimación de canal, ecualización, planificación de paquetes, etc), en optimización de despliegues (p.ej. configuración de los haces de antena), y para la automatización de despliegues y configuraciones de red 5G extremo a extremo, tal que se pueda lidiar con la complejidad de la orquestación a través de múltiples dominios y capas de red.

Hito 5: Evaluación experimental de soluciones AI/ML para la configuración de redes TSN síncronas y asíncronas.

Como parte del proyecto 6G-CHRONOS, WiMuNeT se encuentra actualmente diseñando soluciones de IA/ML que llevan a cabo la configuración automática de los parámetros de TSN tanto en su modalidad síncrona como asíncrona para cumplir con los requisitos de retardo de las aplicaciones críticas. El laboratorio solicitado permitirá el despliegue de un número mayor de conmutadores TSN y equipos de cómputo, por lo que abrirá la posibilidad de evaluar experimentalmente el rendimiento de la red TSN bajo la configuración de las soluciones AI/ML propuestas en topologías complejas con un número elevado de conmutadores.

Hito 6: Evaluación experimental de soluciones AI/ML para la orquestación de redes 5G-TSN.

Este hito se refiere al desarrollo de soluciones de IA/ML que coordinen y ayuden a la orquestación de los diferentes dominios de la red integrada 5G-TSN para cumplir con los requisitos de latencia extremo-a-extremo. En la RAN, mecanismos de IA/ML serán empleados para optimizar la asignación de recursos radio. En la red de transporte, las técnicas de IA/ML son adecuadas para optimizar el funcionamiento de TSN. En este marco, dado que se ejecutarán múltiples agentes de IA, existe la necesidad de colaboración, de modo que se pueda garantizar la convergencia del aprendizaje y mejorar el rendimiento. La disponibilidad de equipos en el laboratorio tales como conmutadores TSN, equipos 5G y equipos de cómputo permitirá evaluar experimentalmente el rendimiento de la red integrada 5G-TSN bajo las soluciones AI/ML para la orquestación propuestas.

Hito 7: Evaluación experimental de soluciones AI/ML basadas en aprendizaje de transferencia y federado.

Prevedemos que los sistemas 6G empleen AI/ML de una manera más fundamental que en el enfoque de 5G. Esperamos pasar de la IA como una mejora en 5G a la IA como base para el diseño y la optimización en 6G [IV_14]. En este sentido, el aprendizaje de transferencia y el aprendizaje federado jugarán papeles críticos. Primero, los sistemas deberán ser entrenados fuera de línea en entornos de simulación en la medida suficiente para que se puedan establecer las comunicaciones básicas y, posteriormente, re-entrenarse en operación para optimizar el rendimiento. Por lo tanto, habrá una transferencia de aprendizaje de la simulación a la red real. Por otra parte, los distintos nodos de la red, así

Firma (1): JORGE NAVARRO ORTIZ
En calidad de: Solicitante



como los dispositivos tendrán que aprender conjuntamente para satisfacer requisitos extremo-a-extremo, por lo que el aprendizaje federado desempeñará un papel clave.

WiMuNeT establece como hito estudiar y diseñar la cooperación multiagente mediante ML federado, tal que los agentes aprenden a tomar decisiones a través de sus observaciones locales y cooperen para los mismos objetivos del sistema. La disponibilidad de equipos en el laboratorio solicitado permitirá evaluar experimentalmente el rendimiento de soluciones AI/ML basadas en aprendizaje de transferencia y federado aplicadas a la red integrada 5G-TSN.

Línea 3: Aplicación en redes de la Industria 4.0 y más allá.

Es bien conocido que hay múltiples protocolos definidos para redes de comunicación industriales algunos de los cuales están basados específicamente en Ethernet IEEE802.3 (p.ej. EtherCAT, Ethernet/IP, PROFINET, CC-Link IE Field o Modbus TCP), mientras que otras son tecnologías inalámbricas diseñadas específicamente para comunicaciones industriales (ISA100.11a, WirelessHART, IO-Link). Esto da como resultado una gran variedad de protocolos y hardware en las plantas de producción, lo que dificulta lograr la interconectividad necesaria para la Industria 4.0. Para superar esta dificultad, TSN se está diseñando tal que permita proporcionar una conectividad convergente en dichas redes de comunicaciones industriales. Adicionalmente, 5G/6G permitirán eliminar el cableado, lo que dará un salto cualitativo a las redes industriales, incrementando los rangos de cobertura geográfica y facilitando la movilidad.

Si bien está siendo innovador el hecho de aplicar 5G al concepto de Industria 4.0, anticipamos que 6G dará pasos significativos en la transformación de los procesos de fabricación y producción [IV_15]. La madurez de las redes industriales dependerá de la adopción exitosa de las tecnologías de acceso de radio actuales y futuras a los casos de uso clave de la Industria 4.0 y más allá. Se prevé que las redes industriales sean privadas, centrándose en la confiabilidad extrema y la latencia ultra baja. Los casos de uso de implementación clave son: 1) comunicación entre sensores y robots; 2) comunicaciones a través de múltiples robots para la coordinación de tareas; y 3) comunicación entre operadores de fábrica humanos y robots; y 4) comunicación para los sistemas de gestión industriales (pe.j. MES - *Manufacturing Execution System*, SCADA - *Supervisory Control And Data Acquisition*, etc).

Por todo ello, WiMuNeT se ha marcado como línea de trabajo el despliegue de un sistema de producción de una fábrica de la Industria 4.0 con una red industrial que sirva como banco de pruebas que permitirá 1) conocer mejor los requisitos y características de las redes industriales, 2) probar el rendimiento de los prototipos TSN y 5G Avanzado/6G desarrollados, y 3) servir como prueba de demostración de la viabilidad de tecnologías TSN y 5G Avanzado/6G en entornos industriales. En última instancia esto permitirá adaptar/optimizar los diseños de TSN y 5G Avanzado/6G para este tipo de entornos. Los sistemas de fabricación flexible incorporan comunicaciones PLC-sensores (como cámaras de visión artificial), PLC-actuadores, PLC-interfaces HMI (hombre-máquina), PLC-robots, o PLC-sistemas de gestión. La disponibilidad de un laboratorio singular permitirá disponer de dicho banco de pruebas en el que alcanzar, entre otros, los siguientes hitos.

Hito 8: Análisis de tecnologías y caracterización del tráfico en sistemas de producción industriales.



Este hito consiste en el análisis de los procesos de comunicación, así como las tecnologías y protocolos de comunicación empleados por los componentes de los sistemas de producción industriales actuales. En particular, el laboratorio permitirá analizar los protocolos tradicionales basados en Ethernet en tiempo real que se utilizan en aplicaciones de automatización industrial, así como el funcionamiento de los sistemas de control de procesos industriales. Igualmente, se pretende realizar un análisis del tráfico de datos generado por los dispositivos de los procesos de producción industrial, incluyendo los PLC (*Programmable Logic Controller*) y los dispositivos actuadores y sensores de las células de ensamblaje, así como guantes hápticos y robots móviles (AGV - *Automatic Guided Vehicle*, AMR - *Autonomous Mobile Robot*).

Hito 9: Evaluación experimental del uso de redes 5G-TSN en la red de gestión industrial y en las comunicaciones PLC-sensor y PLC-actuador.

Este hito consiste, por un lado, en evaluar experimentalmente el uso de los prototipos TSN y 5G Avanzado/6G en la red de gestión industrial. Para ello se sustituirá la red cableada entre los PLCs y los equipos de gestión como el MES por los prototipos TSN y 5G Avanzado/6G desarrollados. Por otro lado, se pretende evaluar experimentalmente el uso de los prototipos TSN y 5G Avanzado/6G en las comunicaciones PLC-sensor y PLC-actuador. Estas comunicaciones requieren ultra baja latencia además de confiabilidad. Para ello se sustituirán los enlaces cableados entre los PLCs y sensores y actuadores por los prototipos TSN y 5G Avanzado/6G desarrollados.

Hito 10: Evaluación experimental del uso de redes 5G-TSN en el control remoto de brazos robotizados mediante guantes hápticos y de robots móviles.

Este hito consiste en evaluar experimentalmente el uso de los prototipos TSN y 5G Avanzado/6G en las comunicaciones para el control remoto de brazos robotizados mediante guantes hápticos, así como el control remoto de robots móviles que interactúen con una célula de producción industrial. Estas comunicaciones requieren ultra baja latencia además de confiabilidad. Para ello se sustituirá la red cableada entre el guante háptico y los brazos robotizados por los prototipos TSN y 5G Avanzado/6G desarrollados. En el caso de los robots móviles, se tratará de mover al borde de la red aquellas tareas de alto coste computacional que involucren procesos basados en inteligencia artificial aplicando el paradigma de computación en el borde (*edge computing*).

Referencias:

[IV_1] O. Adamuz-Hinojosa, P. Ameigeiras, P. Muñoz and J. M. Lopez-Soler, "UE Blocking Probability Model for Planning 5G Guaranteed Bit Rate (GBR) RAN Slices," in *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 72, no. 9, pp. 12124-12138, Sept. 2023, doi: 10.1109/TVT.2023.3266526.

[IV_2] Navarro-Ortiz, J.; Ramos-Munoz, J.J.; Delgado-Ferro, F.; Canellas, F.; Camps-Mur, D.; Emami, A.; Falaki, H. Combining 5G New Radio, Wi-Fi, and LiFi for Industry 4.0: Performance Evaluation. *Sensors* **2024**, *24*, 6022. <https://doi.org/10.3390/s24186022>.

[IV_3] O. Adamuz-Hinojosa, L. Zanzi, V. Sciancalepore, X. Costa-Pérez, "MAREA: A Delay-Aware Multi-time-Scale Radio Resource Orchestrator for 6G O-RAN", in *IEEE Transactions on Communications (Early Access)*, Mar. 2025, doi: 10.1109/TCOMM.2025.3552296.

Firma (1): JORGE NAVARRO ORTIZ
En calidad de: Solicitante



[IV_4] O. Adamuz-Hinojosa, P. Ameigeiras, P. Muñoz and J. M. Lopez-Soler, "Computationally Efficient UE Blocking Probability Model for GBR Services in Beyond 5G RAN," in IEEE Access, vol. 12, pp. 39270-39284, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3377112.

[IV_5] O. Adamuz-Hinojosa, V. Sciancalepore, P. Ameigeiras, J. M. Lopez-Soler and X. Costa-Pérez, "A Stochastic Network Calculus (SNC)-Based Model for Planning B5G uRLLC RAN Slices," in IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 22, no. 2, pp. 1250-1265, Feb. 2023, doi: 10.1109/TWC.2022.3203937.

[IV_6] T. Cogalan et al., "5G-CLARITY: 5G-Advanced Private Networks Integrating 5G NR, WiFi, and LiFi," in IEEE Communications Magazine, vol. 60, no. 2, pp. 73-79, February 2022, doi: 10.1109/MCOM.001.2100615.

[IV_7] J. Prados-Garzon, P. Ameigeiras, J. Ordonez-Lucena, P. Muñoz, O. Adamuz-Hinojosa and D. Camps-Mur, "5G Non-Public Networks: Standardization, Architectures and Challenges," in IEEE Access, vol. 9, pp. 153893-153908, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3127482.

[IV_8] J. Navarro-Ortiz, P. Romero-Diaz, S. Sendra, P. Ameigeiras, J. J. Ramos-Munoz and J. M. Lopez-Soler, "A Survey on 5G Usage Scenarios and Traffic Models," in IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 22, no. 2, pp. 905-929, 2020, doi: 10.1109/COMST.2020.2971781.

[IV_9] Study on Channel Model for Frequencies From 0.5 to 100 GHz (Release 14), document 3GPP TR 38.901, Dec. 2019.

[IV_10] H. Tataria, M. Shafi, A. F. Molisch, M. Dohler, H. Sjöland and F. Tufvesson, "6G Wireless Systems: Vision, Requirements, Challenges, Insights, and Opportunities," in Proceedings of the IEEE, vol. 109, no. 7, pp. 1166-1199, July 2021, doi: 10.1109/JPROC.2021.3061701.

[IV_11] Viswanathan and P. E. Mogensen, "Communications in the 6G Era," in IEEE Access, vol. 8, pp. 57063-57074, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2981745.

[IV_12] H. Shi, A. Aijaz and N. Jiang, "Evaluating the Performance of Over-the-Air Time Synchronization for 5G and TSN Integration," 2021 IEEE International Black Sea Conference on Communications and Networking (BlackSeaCom), 2021, pp. 1-6, doi: 10.1109/BlackSeaCom52164.2021.9527833.

[IV_13] J. Prados-Garzon and T. Taleb, "Asynchronous Time-Sensitive Networking for 5G Backhauling," in IEEE Network, vol. 35, no. 2, pp. 144-151, March/April 2021, doi: 10.1109/MNET.011.2000402.

[IV_14] K. B. Letaief, W. Chen, Y. Shi, J. Zhang and Y. -J. A. Zhang, "The Roadmap to 6G: AI Empowered Wireless Networks," in IEEE Communications Magazine, vol. 57, no. 8, pp. 84-90, August 2019, doi: 10.1109/MCOM.2019.1900271.

[IV_15] H. Tataria, M. Shafi, A. F. Molisch, M. Dohler, H. Sjöland and F. Tufvesson, "6G Wireless Systems: Vision, Requirements, Challenges, Insights, and Opportunities," in



Proceedings of the IEEE, vol. 109, no. 7, pp. 1166-1199, July 2021, doi:
10.1109/JPROC.2021.3061701.

Firma (1): JORGE NAVARRO ORTIZ
En calidad de: Solicitante



Este documento firmado digitalmente puede verificarse en <https://sede.ugr.es/verifirma/>
Código seguro de verificación (CSV): 90D9F3795A07B4193E856B7C6D381633

5. Proyectos de investigación del laboratorio singular

WIN-NET-LAB desempeñará un papel central en el desarrollo de proyectos de investigación punteros en el ámbito de las redes 6G, con un enfoque en la inteligencia artificial nativa, las comunicaciones deterministas y la aplicación en entornos industriales. Actualmente, en sus instalaciones se llevan a cabo los siguientes proyectos de investigación financiados por organismos nacionales:

1. Enabling Native-AI Secure Deterministic 6G Networks for HyPer-connected Environments (6G-INSPIRE)

Investigadores principales: P. Muñoz-Luengo, J. Navarro-Ortiz

Entidad financiadora: Ministerio de Ciencia e Innovación de España

Referencia: PID2022-137329OB-C43

Duración: 09/2023 – 08/2026

Presupuesto: 225.000 €

Descripción:

El proyecto **6G-INSPIRE** se enmarca en la estrategia de consolidación de España como un referente en la investigación y desarrollo de la tecnología 6G, impulsando la innovación y contribuyendo al avance de las infraestructuras digitales del futuro. Su objetivo principal es abordar los desafíos tecnológicos de las redes privadas y altamente interconectadas de 6G, explorando soluciones innovadoras en inteligencia artificial, sincronización temporal precisa y comunicaciones deterministas de extremo a extremo (E2E).

Uno de los pilares fundamentales de 6G-INSPIRE es la integración de la inteligencia artificial (IA) y el aprendizaje automático (ML) como elementos clave para la optimización y gestión de redes 6G. Se desarrollará una plataforma impulsada por IA que permitirá garantizar requisitos estrictos de latencia en aplicaciones en tiempo real, como la e-salud, la teleasistencia y la Industria 4.0. Esta plataforma será responsable de la orquestación del ciclo de vida de las funciones de IA, incluyendo la recopilación de datos, el entrenamiento de modelos y la asignación de recursos.

Otro aspecto crítico del proyecto es la implementación de redes con sincronización temporal de alta precisión, esencial para satisfacer las demandas de latencia ultra baja en entornos industriales y aplicaciones críticas. Para ello, se explorará la integración de las redes celulares con *Time-Sensitive Networking* (TSN), una tecnología clave para garantizar comunicaciones deterministas de extremo a extremo. 6G-INSPIRE investigará soluciones para lograr una sincronización precisa y una coordinación eficiente entre dominios de red, asegurando una asignación óptima del tráfico de red entre TSN y los flujos de calidad de servicio (QoS) en 6G.

Asimismo, el proyecto abordará la adaptación de funciones y herramientas usadas en la implementación del paradigma *Network Functions Virtualization* (NFV), buscando optimizar la ejecución de servicios virtualizados sin comprometer el rendimiento. Además, se estudiarán estrategias de gestión de tráfico en redes de acceso inalámbrico



multitecnología, integrando soluciones de multiconectividad que combinen tecnologías como 5G, 6G y Wi-Fi 6, con el fin de mejorar la cobertura, la fiabilidad y la capacidad de transmisión de datos.

Para validar las soluciones propuestas, 6G-INSPIRE desarrollará un demostrador experimental que se integrará con infraestructuras de prueba de otros socios del proyecto. Este demostrador incluirá la implementación de una red privada 6G con capacidades TSN, la sincronización avanzada entre ambas tecnologías, un prototipo de multiconectividad y la aplicación de la plataforma de IA para la optimización dinámica de la red.

Con este enfoque innovador, 6G-INSPIRE no solo contribuirá a la evolución de las redes 6G, sino que también proporcionará soluciones tecnológicas clave para mejorar la fiabilidad, la seguridad y la eficiencia de las comunicaciones en entornos críticos y altamente interconectados.

2. AI-native 6G Deterministic Networking Lab for Industry 4.0 Use Cases (6GNETWORKS-LAB)

Investigador principal: P. Ameigeiras

Entidad financiadora: Ministerio de Asuntos Económicos y Transformación Digital de España

Referencia: TSI-064100-2022-019

Duración: 01/2023 – 06/2025

Presupuesto: 637.132 €

Descripción: El avance hacia la Cuarta Revolución Industrial (Industria 4.0) conlleva una transformación digital profunda en los procesos productivos, donde la conectividad inalámbrica avanzada y las redes deterministas desempeñarán un papel fundamental. En este contexto, **6GNETWORKS-LAB** se posiciona como un laboratorio de experimentación clave para el desarrollo e implementación de soluciones innovadoras basadas en redes 5G/6G avanzadas y TSN, con el objetivo de crear un ecosistema digital más eficiente, flexible, resiliente y tolerante a fallos en entornos industriales.

Uno de los retos fundamentales en la Industria 4.0 es la necesidad de comunicaciones inalámbricas ultra fiables y de baja latencia que permitan la interconexión fluida de máquinas, sensores, actuadores y robots. Para ello, las tecnologías avanzadas de 5G/6G están llamadas a complementar e incluso reemplazar las conexiones cableadas tradicionales, reduciendo costes de instalación y aumentando la flexibilidad operativa en el suelo de producción. Al mismo tiempo, TSN proporciona mecanismos para garantizar comunicaciones deterministas, asegurando un rendimiento predecible en términos de latencia y tasa de bits, algo esencial para aplicaciones industriales en tiempo real.

A pesar del potencial de la integración entre TSN y las redes 5G/6G avanzadas, actualmente estas tecnologías se encuentran en una fase incipiente a nivel experimental, y no existen plataformas de prueba suficientemente desarrolladas para evaluar su aplicabilidad en entornos industriales. **6GNETWORKS-LAB** surge para llenar este vacío,

Firma (1): JORGE NAVARRO ORTIZ
En calidad de: Solicitante



estableciendo una infraestructura de experimentación con las capacidades necesarias para analizar y validar casos de uso clave en la Industria 4.0.

Las principales contribuciones de este proyecto estarán centradas en el desarrollo de:

- Soluciones de comunicaciones ultra fiables y de muy baja latencia en la banda milimétrica, permitiendo conexiones inalámbricas de alto rendimiento en entornos industriales.
- Mecanismos avanzados de sincronización para la integración eficiente de redes 5G/6G con TSN, asegurando un control preciso del tráfico de red en tiempo real.
- Algoritmos basados en inteligencia artificial (IA) y aprendizaje automático (ML) para la gestión, orquestación y configuración dinámica de redes que combinen tecnologías 5G/6G avanzadas con TSN.
- Un demostrador de integración 5G/6G-TSN aplicado a casos de uso industriales críticos, incluyendo:
 - Gestión inteligente de infraestructuras industriales, optimizando la conectividad y el rendimiento de la red en fábricas inteligentes.
 - Comunicación entre controladores lógicos programables (PLC) y sensores/actuadores, asegurando la transmisión confiable de datos en entornos de automatización industrial.
 - Control remoto de brazos robóticos mediante sensores hápticos, permitiendo interacciones precisas y en tiempo real en tareas industriales avanzadas.

6GNETWORKS-LAB nos dota de un entorno de prueba pionero que permitirá explorar, validar y acelerar la adopción de tecnologías deterministas basadas en 6G e IA en la Industria 4.0. Esta infraestructura proporcionará conocimientos fundamentales para la digitalización de los procesos industriales y contribuirá significativamente a la evolución de las infraestructuras de comunicación del futuro.

3. AI-assisted Beyond 5G-6G Architecture with Deterministic Networking for Industrial Communications (6G-CHRONOS)

Investigadores principales: P. Ameigeiras, J. Navarro-Ortiz

Entidad financiadora: Ministerio de Asuntos Económicos y Transformación Digital de España

Referencia: TSI-063000-2021-28

Duración: 01/2022 – 12/2024

Presupuesto: 820.979 €

Firma (1): JORGE NAVARRO ORTIZ
En calidad de: Solicitante



Descripción:

La Cuarta Revolución Industrial (Industria 4.0) está transformando la producción industrial mediante la digitalización, permitiendo la captura e intercambio de datos entre máquinas, dispositivos y personas a través de redes inteligentes. La convergencia entre el Internet de las Cosas y los sistemas ciberfísicos dará lugar a un ecosistema de dispositivos interconectados, capaces de operar de manera autónoma y eficiente.

En este contexto, las tecnologías de comunicación avanzadas como las redes 5G/6G y TSN desempeñarán un papel fundamental al proporcionar conectividad en tiempo real, con alta fiabilidad y baja latencia, en entornos industriales. Sin embargo, la implementación efectiva de esta visión enfrenta dos desafíos críticos:

1. Garantizar que las redes 5G/6G ofrezcan comunicaciones deterministas y de baja latencia, cumpliendo con los estrictos requisitos de conectividad en aplicaciones de automatización industrial.
2. Lograr una integración fluida entre TSN y las redes móviles avanzadas, permitiendo la coexistencia eficiente de tecnologías cableadas e inalámbricas dentro de una misma infraestructura industrial.

Para abordar estos retos, **6G-CHRONOS** desarrolla un marco de servicios de red B5G/6G, en el que el concepto de redes deterministas se integrará como principio de diseño dentro del paradigma de *network slicing* de 5G. Este enfoque permite proporcionar latencias ultra bajas y determinísticas, esenciales para aplicaciones como robótica conectada y sistemas autónomos en la Industria 4.0.

Principales contribuciones de 6G-CHRONOS:

- Diseño de un marco de servicios de red B5G/6G, basado en el concepto de redes deterministas, para garantizar latencias predecibles y ultra bajas en escenarios industriales.
- Desarrollo de soluciones avanzadas para la interoperabilidad entre el marco de servicios B5G/6G y TSN, permitiendo la integración sin fisuras de ambas tecnologías en entornos industriales.
- Implementación de una plataforma experimental (testbed) como prueba de concepto, en la que se desplegará una red 5G junto con una infraestructura TSN sincronizada, con el objetivo de evaluar el rendimiento de las soluciones propuestas.

Los resultados del proyecto **6G-CHRONOS** contribuyen significativamente a la aplicabilidad de las redes 5G y 6G en entornos industriales, proporcionando soluciones que permitan:

- Latencias *end-to-end* ultra bajas y determinísticas (<1 ms).
- Altas tasas de transferencia de datos para aplicaciones críticas.



- Integración fluida entre redes 5G y TSN para aplicaciones industriales avanzadas.

Con este enfoque, **6G-CHRONOS** impulsa la adopción de tecnologías avanzadas de comunicación en la Industria 4.0, facilitando el desarrollo de fábricas inteligentes, procesos de automatización de vanguardia y sistemas autónomos altamente eficientes.

Los proyectos mencionados consolidan al laboratorio como un referente en la investigación y desarrollo de tecnologías avanzadas para la próxima generación de redes de comunicación, alineándose con las prioridades estratégicas nacionales y europeas en digitalización e inteligencia artificial.

Firma (1): JORGE NAVARRO ORTIZ
En calidad de: Solicitante



6. Inversión realizada

Durante los últimos 6 años el grupo de investigación ha obtenido la financiación que se muestra en la siguiente tabla, en diferentes convocatorias públicas de ámbito autonómico, nacional e internacional.

PROYECTO	ORGANISMO	FECHAS	COSTE
6GNETWORKS-LAB: <i>AI-native 6G Deterministic Networking Lab for Industry 4.0 Use Cases.</i> TSI-064100-2022-019.	Ministerio de Asuntos Económicos y Transformación Digital	01/2023 – 06/2025	637.132 €
6G-CHRONOS: <i>AI-assisted beyond 5G-6G arCHitectuRe with deterministic netwOrking for iNdustrial communicatiOnS.</i> Ministerio de Asuntos Económicos y Transformación Digital. TSI-063000-2021-28	Programa UNICO I+D	01/2022 – 06/2025	820.979 €
6G-CAERUS: <i>Beyond 5G-6G Capacitation And talEnt attRaction for stUdents.</i> TSI-063000-2021-33.	Programa UNICO I+D	01/2022 – 12/2025	250.000 €
6G-INSPIRE: <i>EnablIng Native-AI Secure deterministic 6G networks for hyPer-connected envlRonmEnts.</i> PID2022-137329OB-C43	Ministerio de Ciencia e Innovación.	09/2023 – 08/2026	225.000 €
6G-LoRaGRAN: <i>Integration of the University of Granada's LoRaWAN network in the 6G SANDBOX connectivity infrastructure.</i>	European Commission H2020.	09/2023 – 02/2024	60.000 €
TRUE-5G: <i>Towards zeRo toUch nEtwork and services for beyond 5G.</i> PID2019-108713RB-C53	Ministerio de Ciencia e Innovación.	06/2020 – 05/2023	151.855 €
PREMONITION: <i>low-PoweR sEnsor network for MONItoring envlronmenTal conditions.</i> B-TIC-568-UGR20	Junta de Andalucía.	1/7/2021 – 30/6/2023	50.000 €
5G-CLARITY: <i>Beyond 5G Multi-Tenant Private Networks Integrating Cellular, Wi-Fi, and LiFi, Powered by ARtificial Intelligence and InTent Based PolicY.</i> Grant number 871428	European Commission H2020	11/2019 – 04/2022	393.125 €
TOTAL FINANCIACIÓN 6 ÚLTIMOS AÑOS			2.588.091 €



7. Inventario del equipamiento disponible

En las siguientes Tablas se lista el equipamiento disponible en el laboratorio, incluyendo para cada equipo una breve descripción.

5G NETWORK INFRASTRUCTURE	
EQUIPO	DESCRIPCIÓN
2 Amarisoft base stations and cores	3GPP compliant evolved eNodeB (eNB) / gNodeB (gNB) and Evolved Packet Core (EPC) / 5G Core (5GC). Más información.
4 NI USRP 2901 (70 MHz to 6 GHz, BW 56 MHz)	Transceptor de RF ajustable con MIMO dúplex. Más información.
4 NI USRP 2953R (1.2 to 6 GHz, BW 120 MHz)	Dispositivo Reconfigurable de Radio Definida por Software, OCXO Disciplinado por GPS, 1.2 GHz a 6 GHz. Más información.
5G mobile phones	1xHuawei P40, 2xXiaomi 12) y módems 5G (1xQuectel RM500Q-GL and 2xQuectel RM500Q-AE)
30 Pycom FiPy nodes	Soporte de LTE-M/NB-IoT, además de BLE/Wi-Fi/SigFox/LoRa&LoRaWAN
10 programmable USIMs from sysmocom and USIM reader/writer	Tarjetas SIM/UICC/USIM/ISIM/HPSIM que cumplen la normativa ETSI/3GPP. Más información.
RF shielded enclosure (LBX1000 RF Shielded Test Enclosure)	Jaula de Faraday con revestimiento absorbente de RF de alto rendimiento que ayuda a reducir el ruido amortiguando las interferencias generadas internamente, mejorando la relación señal/ruido. Más información.
4G/5G base stations, core and UEs based on USRPs with OpenAirInterface5G , srsRAN, free5GC and Open5GS	Completo entorno de red móvil con USRPs (Universal Software Radio Peripheral) con estaciones base (eNodeB/gNodeB), dispositivos de usuario (UEs) y el núcleo de red (core) de tecnologías 4G y 5G. Permite desplegar estaciones base y UEs completamente en software, facilitando pruebas y desarrollo de redes móviles, con implementaciones completas del core 5G/4G, incluyendo funciones como el AMF, SMF, UPF, MME y HSS.

Wi-Fi NETWORK INFRASTRUCTURE	
EQUIPO	DESCRIPCIÓN
Xiaomi Mi Router AX9000	MU-MIMO 4x4, 4KQAM, 160 MHz, max. data rate 4804 Mbps en la banda 5 GHz, 4x1GbE + 1x2.5GbE
Xiaomi Mi Router AX3600	MU-MIMO 4x4, 160 MHz, máx. data rate 2976 Mbps en la banda 5 GHz, 4x1GbE
Intel AX201 Wi-Fi 6 cards	Tarjetas Wi-Fi 6 que permiten velocidades de hasta 2,4 Gbps. Es compatible con los estándares inalámbricos 802.11ax y Wi-Fi 6. También es compatible con Bluetooth 5.2
D-LINK AX1800 USB cards	Tarjetas Wi-Fi 6 con 80 MHz y MU-MIMO 2x2

Firma (1): JORGE NAVARRO ORTIZ
En calidad de: Solicitante



IoT NETWORK INFRASTRUCTURE	
EQUIPO	DESCRIPCIÓN
LoRaWAN gateways	IMST Lite Gateway , Pycom PyGate
LoRaWAN nodes	Pycom FiPy (BLE, Wi-Fi, SigFox, LoRa/LoRaWAN, LTE-M/NB-IoT) con diferentes placas de expansión, Heltec LoRa32, TTGO LoRa32, TTGO T-Beam, LilyGO T-HiGrow con módulo LoRa, nodos customizados basados en ESP8266/ESP32 con chip SX1278
LoRaWAN network and application servers	Ejecutables en servidores de forma nativa o virtualizados
BRESSER professional 7-in-1 Wi-Fi Weather Station	Más información.

SDN and TSN NETWORK INFRASTRUCTURE	
EQUIPO	DESCRIPCIÓN
1 switch AS4610-54T	Conmutador Gigabit Ethernet de nivel 3 de alto rendimiento con 54 puertos; 48 puertos 10/100/1000BASE-T, 4 puertos de enlace ascendente SFP+ 10G y 2 puertos de apilamiento QSFP+ 20G Más información.
2 switches NetGear M4300-28G stackable	Switches gestionables apilables con capa 3 de 24 x 1G y 4 x 10G, 2 x 10GBASE-T y 2 x SFP+ y SDN Más información.
2 switches TSN Z16	WR-Z16 con conectores 16 SFP. Más información.
2 Intel E810-XXVDA2 NICs	Adaptador de red Ethernet. Más información.
18 GLC-SX-MM 1000BASE-SX transceptrors	Módulos transceptores de fibra óptica de CISCO.
2 Intel E10GSFPSR 10GBASE-SX transceptrors	Módulos transceptores de fibra óptica de INTEL
1 switch Edgecore AS4610-54T	Conmutador Gigabit Ethernet de nivel 3 de alto rendimiento con 54 puertos; 48 puertos 10/100/1000BASE-T, 4 puertos de enlace ascendente SFP+ 10G y 2 puertos de apilamiento QSFP+ 20G Más información.

COMPUTING RESOURCES	
EQUIPO	DESCRIPCIÓN
2 servers HP Z4 I9-10920X 2X 1 TB 256 GB 2 XRTX3090	Más información.
3 rack servers Supermicro SYS-6019U-TRTP2	Intel Xeon 4110, RAM: 8x16 GB, 2x10G SFP+, 2x1GbE. Más información.
1 rack server HP SunFire X4150	Más información.
Several servers with Intel i7 Intel Xeon CPUs and 16/32 GB of RAM	Servidores de cómputo
Intel NUCs with i7 and 16/32 GB of RAM	Servidores de tamaño reducido para prototipos
Several Raspberry Pi 4	Más información.



VEHICLES AND UAVS	
EQUIPO	DESCRIPCIÓN
4 TELLO drones	2 DJI ROBOMASTER TT TELLO TALENT y 2 DJI TELLO EDU
2 AWS DeepRacer Evo	Equipados con cámaras estéreo y sensor LiDAR. Más información.

El equipamiento anterior se complementa con el siguiente material en fase de adquisición

EN ADQUISICIÓN	
EQUIPO	DESCRIPCIÓN
Estación base Callbox Ultimate de Amarisoft.	Este equipo proporciona la posibilidad de realizar despliegues 5G en entornos de laboratorio, incluyendo la posibilidad de crear varias celdas 4G y 5G simultáneamente (hasta 2 celdas 5G con un ancho de banda de 100 MHz cada una y 2 celdas 4G con un ancho de banda de 20 MHz, entre otras configuraciones). Opera en bandas de frecuencias de hasta 6 GHz. La licencia incluida (AMARI NW 8000) permite velocidades agregadas de hasta 8 Gbps. Más información.
Licencia AMARI NW FR2 Option y adaptadores hardware FR2 hardware package (24~30GHz) y FR2 hardware package (37~40GHz).	Soporte de bandas milimétricas (FR2 en 24-30 GHz y 37-40 GHz). Más información.
AMARI UE Simbox E 064.	64 terminales 5G con el objeto de poder realizar pruebas de estrés en la red 5G bajo análisis. Más información.
2 estaciones base de exterior de Amarisoft (AMARI vBBU) y RRH de Sunwave (RRH Package (n78(3600-3800)), así como la licencia AMARI NW 4000 license.	Estación base 5G de exterior compuesta de una <i>baseband</i> unit (BBU) y una cabecera radio remota (RRU). Más información.
2 Ramsey RF Test Shielded Enclosure + conectores (alimentación, USB, antenas).	Jaulas de Faraday. Más información.
2 switches TSN de 8 puertos SFP de 1Gbps	Con etiquetado 802.1Q VLAN, conformado de tráfico time-aware 802.1Qbv, transmisiones redundantes 802.1CB, implementación de 802.1AS, que proporciona el perfil de PTP específico para los sistemas TSN (gPTP) para sincronización temporal.
16 módulos de SFP para fibra	1000BASE-BX10, para los switches TSN.
4 tarjetas de red con soporte para PTP	Tarjetas de red para TSN
4 servidores de cómputo intensivo	Con 2 Procesadores AMD 7282 de 2.8 GHz, 16 núcleos, 256 GB de memoria DDR4/3200 Mhz ECC, 2 tarjetas GPU NVIDIA A40 TESLA EDU PCI-E 4.0 48GB, Puente NVLink conexión GPU, 1 disco SSD 2 TB, rack de 4-U G482-Z54 con 3 fuentes de alimentación, configurada en CentOS 7.9 y CUDA 11.

Firma (1): JORGE NAVARRO ORTIZ
En calidad de: Solicitante



1 armario con 47 bahías	
1 chasis y controlador Spirent TestCenter N4U	Aloja módulos de tests necesarios para las pruebas, incluyendo una administración de pantalla táctil, control inteligente de alimentación y ventilación, arranque rápido y actualizaciones del firmware del sistema. Más información.
1 tarjeta de interfaces Spirent FX2 10/1G	Con 16 puertos que permite la generación y análisis de tráfico de capa 2-3 proporcionando un alto rendimiento para las pruebas de capa 2-7 con un consumo de potencia reducido. Más información.
Software de testing.	Spirent BPK-1001A, TPK-1000 y TPK- 1001 para la generación y análisis de tráfico de capa 2-3.
Un contador de frecuencia y analizador de intervalos temporales continuo Swabian Time Tagger Ultra	Con 4 canales y entrada adicional para señal de reloj. Más información.
Célula de Ensamblaje Flexible Automatizada FAS-200 SE I4.0 - Configuración Cobot Siemens 1500, del fabricante Alecop	Proceso de ensamblaje real con cinco etapas de fabricación diferentes: 1. Ensamblaje, 2. Manipulación, 3. Inspección de Calidad, 4. Transfer, 5. Almacén y Expedición. Integra tecnologías de la Industria 4.0: Electroneumática avanzada, Tecnología de vacío, Sensores, UID (Unique Identifier Device): Sistemas de identificación RFID y Sistemas de identificación binarios, Sensores Smart IO-link, Dispositivo Smart de luz y sonido con IO-link, Visión artificial, Actuadores eléctricos servocontrolados, Controladores industriales (comunicación Ethernet), HMI, Realidad Aumentada, Entradas y Salidas Distribuidas, Sistemas de generación de averías, y Robot colaborativo.
Guantes hápticos	Izquierdo y derecho, con accesorio para integrar mandos de Oculus y HTC, y software de comunicación y desarrollo SenseComm, SDK para Unity y SDK para Unreal engine.
Brazo robótico con sensibilidad	
Gafas de realidad virtual con mandos Meta Quest 3 y Pico 4	

Para más información sobre diferentes casos de uso y bancos de pruebas (*testbeds*) disponibles, consultar <https://wimUNET.UGR.es/infrastructure.php>



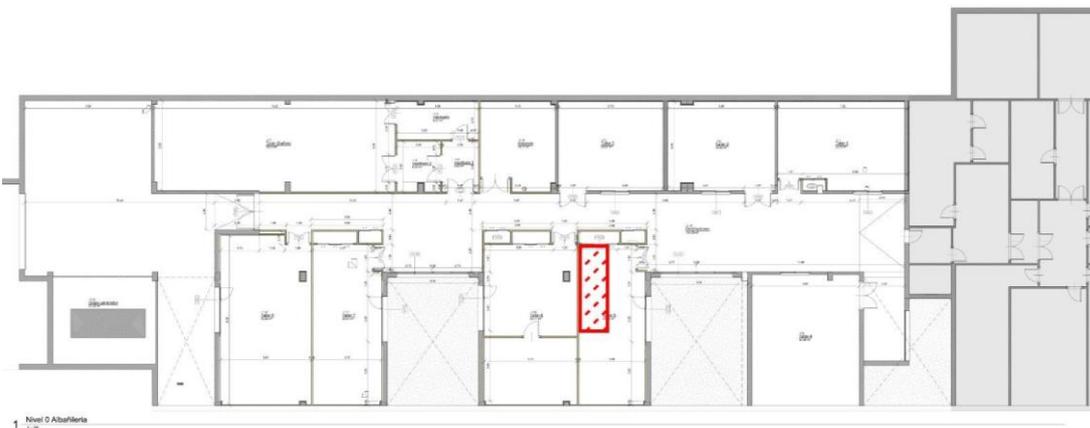
8. Muestra gráfica de las instalaciones



Firma (1): JORGE NAVARRO ORTIZ
En calidad de: Solicitante



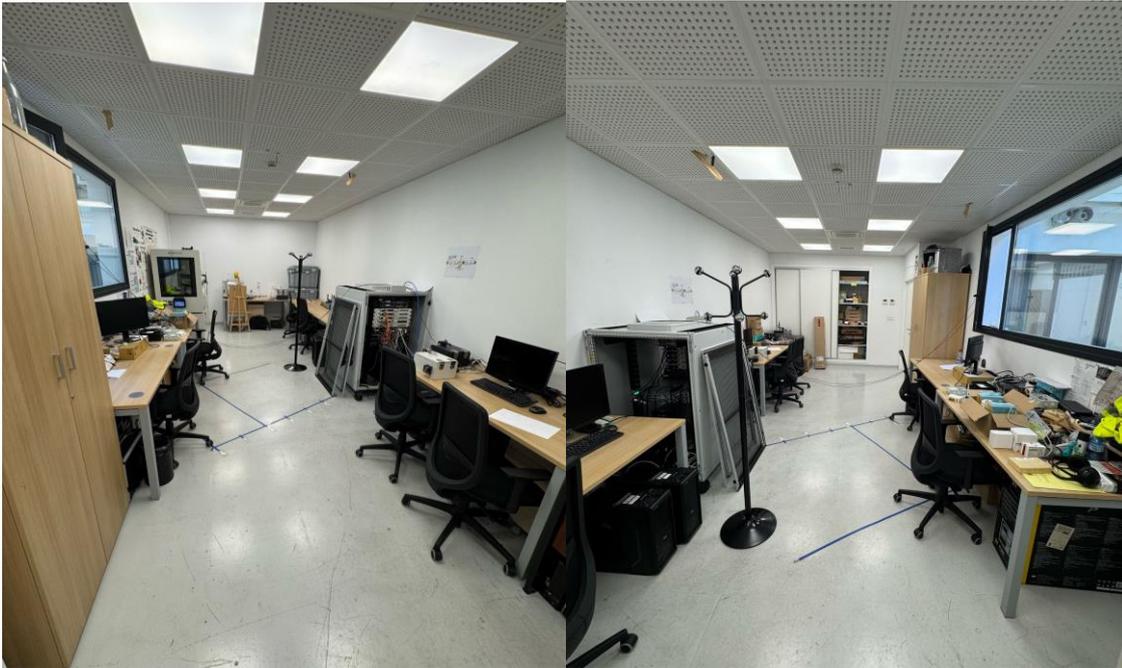
Este documento firmado digitalmente puede verificarse en <https://sede.ugr.es/verifirma/>
Código seguro de verificación (CSV): 90D9F3795A07B4193E856B7C6D381633



Firma (1): JORGE NAVARRO ORTIZ
En calidad de: Solicitante



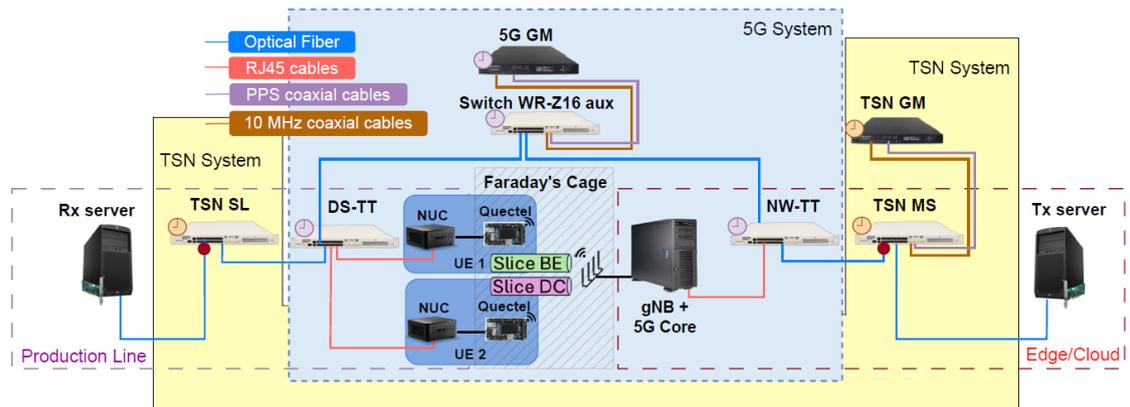
Este documento firmado digitalmente puede verificarse en <https://sede.ugr.es/verifirma/>
Código seguro de verificación (CSV): 90D9F3795A07B4193E856B7C6D381633



Firma (1): JORGE NAVARRO ORTIZ
En calidad de: Solicitante



Este documento firmado digitalmente puede verificarse en <https://sede.ugr.es/verifirma/>
Código seguro de verificación (CSV): 90D9F3795A07B4193E856B7C6D381633



Firma (1): JORGE NAVARRO ORTIZ
En calidad de: Solicitante





Firma (1): JORGE NAVARRO ORTIZ
En calidad de: Solicitante



Este documento firmado digitalmente puede verificarse en <https://sede.ugr.es/verifirma/>
Código seguro de verificación (CSV): 90D9F3795A07B4193E856B7C6D381633

9. Plan de actividades y plan de acceso a las instalaciones

9.1. Plan de Actividades

El laboratorio mantiene un alto nivel de uso por parte de los investigadores del grupo WiMuNet, en especial sus estudiantes de doctorado, quienes utilizan su equipamiento para abordar los principales objetivos de sus tesis. Además, atiende solicitudes de acceso por parte de investigadores internacionales y empresas del sector. En este contexto, el laboratorio se ha consolidado como una infraestructura científica que ofrece una gama de servicios especializados, tanto a usuarios internos como externos.

Los servicios disponibles son:

- **Evaluación experimental de la integración 5G/6G-TSN y medición de latencias:** Los investigadores y/o ingenieros interesados pueden realizar experimentos para evaluar cómo las soluciones de baja latencia en la red 5G/6G afectan la integración con TSN, midiendo los retardos extremo-a-extremo en diversas configuraciones de red. Además, pueden probar la optimización de la configuración TDD para mejorar la asignación de recursos y reducir la latencia.
- **Pruebas en la banda de milimétricas para redes 5G/6G-TSN:** Los investigadores y/o ingenieros interesados podrán realizar pruebas sobre el uso de frecuencias milimétricas superiores a 6 GHz en redes 5G/6G, explorando el impacto de estos anchos de banda más amplios en la operación de redes industriales. Se podrá evaluar el rendimiento de la red en condiciones de baja latencia para entender cómo las frecuencias más altas afectan a la eficiencia de la propagación y a la cobertura en entornos industriales.
- **Evaluación de soluciones de sincronización en redes 5G/6G-TSN:** Con el equipamiento disponible, los investigadores y/o ingenieros interesados pueden realizar estudios experimentales sobre la precisión de la sincronización en redes 5G/6G. Esto incluye la evaluación de diferentes tipos de sincronización, así como la medición de imprecisiones en la sincronización y su impacto en el rendimiento global de la red.
- **Evaluación de soluciones TSN nativas para 5G/6G:** Los investigadores y/o ingenieros interesados podrán probar y evaluar soluciones TSN nativas, tales como TSN Asíncrono (IEEE 802.1Qcr) y *frame pre-emption* (IEEE 802.1Qbu & 802.3br), para comprender cómo estas tecnologías pueden mejorar la conectividad inalámbrica en entornos industriales con 5G/6G. Se podrán realizar experimentos sobre cómo estas soluciones pueden ofrecer un servicio de comunicación confiable en redes de gran escala y móviles, sustituyendo la infraestructura cableada.
- **Implementación y evaluación de soluciones AI/ML para redes 5G/6G-TSN:** Los investigadores y/o ingenieros interesados podrán investigar y desarrollar soluciones de IA/ML para la configuración y orquestación automática de redes 5G/6G-TSN, tanto en modalidades síncronas como asíncronas. Esto incluye la optimización de la asignación de recursos de red y el rendimiento de TSN bajo condiciones de alta complejidad en topologías de red. Los interesados también podrán trabajar con redes multiagente y aprendizaje federado, evaluando cómo estas técnicas mejoran el rendimiento y la convergencia en sistemas distribuidos.



- **Evaluación experimental del uso de redes 5G/6G-TSN en aplicaciones industriales:** Los investigadores y/o ingenieros interesados podrán probar el uso de redes 5G/6G-TSN en diferentes aplicaciones industriales, como la gestión de redes industriales, las comunicaciones entre PLC-sensor y PLC-actuador, y el control remoto de brazos robotizados mediante guantes hápticos.
- **Evaluación experimental de redes heterogéneas con protocolos *multipath* (MPTCP y MPQUIC):** Los investigadores y/o ingenieros interesados podrán probar y evaluar el uso de MPTCP (*Multipath TCP*) y MPQUIC (*Multipath QUIC*) en redes heterogéneas, con el objetivo de mejorar la resiliencia y el rendimiento de la conectividad en entornos 5G/6G. Estos protocolos permiten la utilización simultánea de múltiples caminos de red, optimizando la transferencia de datos y proporcionando una mayor tolerancia a fallos. Se podrán realizar experimentos para gestionar la agregación de enlaces y la conmutación entre diferentes tecnologías de acceso, como Wi-Fi, LoRaWAN, NB-IoT, LiFi y 5G/6G.
- **Evaluación experimental de mejoras de escalabilidad y rendimiento, así como evaluación experimental de algoritmos de gestión de recursos radio y *network slicing* en redes LoRaWAN y su integración con redes 5G.** Los investigadores y/o ingenieros interesados podrán investigar y desarrollar soluciones que modifiquen el funcionamiento de las redes LoRaWAN, e.g. modificando el funcionamiento de la capa MAC (*Medium Access Control*) del estándar, con el objetivo de reducir las colisiones y mejorar así la capacidad de las redes LoRaWAN. De forma parecida, podrán modificar la asignación de recursos a los diferentes dispositivos para conseguir aislamiento entre particiones de red (*network slicing*) y optimizar sus recursos mediante el uso de medidas de rendimiento en tiempo real. Por último, podrán analizar las interacciones surgidas debido a la integración de redes LoRaWAN y redes 5G.

Potenciales usuarios y clientes del laboratorio

El laboratorio ofrece una amplia gama de servicios para la comunidad investigadora de la UGR y entidades externas, incluidos centros de investigación, universidades y empresas tecnológicas de sectores como las telecomunicaciones y la industria 4.0. La colaboración estrecha del grupo de investigación con líderes del sector permite aprovechar los avances en redes 5G y 6G, transformando los resultados de las investigaciones en productos y servicios innovadores. Nuestro objetivo es trabajar junto a técnicos, ingenieros y gerentes de empresas industriales y de telecomunicaciones para realizar pruebas y validaciones que contribuyan al desarrollo de soluciones tecnológicas avanzadas basadas en estas redes, impulsando la transformación digital de la industria. En las Tablas 1, 2 y 3 se indican potenciales usuarios, instituciones y empresas que ya han sido colaboradores del grupo y/o han sido usuarios de las instalaciones o pueden llegar a serlo.



Tabla 1. Usuarios de instituciones o centros de investigación nacionales.

Nombre de la institución nacional	Lugar
Universidad de Málaga	Málaga, España
Universidad Carlos III de Madrid	Madrid, España
Universitat Politecnica de Valencia	Valencia, España
Universidad de Valencia	Valencia, España
Euskal Herriko Unibertsitatea	Bilbao, España
Universitat Politecnica de Catalunya	Barcelona, España
Centre Tecnològic Telecomunicacions Catalunya	Barcelona, España
i2CAT Foundation	Barcelona, España

Tabla 2. Usuarios de instituciones o centros de investigación internacionales.

Nombre de la institución internacional	Lugar
Universita di Pisa	Pisa, Italia
Universita di Bologna	Bologna, Italia
NEC Laboratories Europe	Heidelberg, Alemania
IHP microelectronics	Frankfurt, Alemania
University of Edinburgh	Edimburgo, Reino Unido
University of Bristol	Bristol, Reino Unido
Aalborg University	Aalborg, Dinamarca
University of Oslo	Oslo, Noruega
Aalto University	Aalto, Finlandia
Georgia Institute of Technology	Georgia, Estados Unidos

Tabla 3. Usuarios de empresas del sector.

Nombre de la empresa	Lugar
Safran Group	Granada, España
Gygasys solutions	Málaga, España



Real-Time Innovations Inc.	Granada, España
Wimax RNG	Granada, España
ATISoluciones	Granada, España
Datatronics S.A.	Madrid, España
Ericsson	Málaga, España
Telefónica I+D	Madrid, España
Neutron Networks	Barcelona, España
Bosch	Barcelona, España
Accelleran	Antwerp, Bélgica
pureLiFi	Edimburgo, Reino Unido

Además, el grupo de investigación WiMuNet pertenece a la Sociedad Científica de Ingeniería Telemática (SCITEL) <https://www.scitel.es/> con el objetivo de incentivar y mejorar el desarrollo de los fundamentos científicos, las tecnologías y el despliegue de servicios telemáticos.

9.2. Plan de Acceso

Normativa General:

La Universidad de Granada establece directrices específicas para el acceso al equipamiento científico, adaptadas a la infraestructura de este laboratorio. El protocolo de acceso debe estar disponible tanto en la página web del laboratorio como en su entrada.

Requisitos y Modalidades de Acceso

- **Acceso restringido:** Sólo podrán operar el equipo en modo autoservicio ingenieros/as e investigadores/as con experiencia demostrada en su configuración y uso.
- **Acceso remoto:** Se habilitará un servidor pasarela para conectar con determinados dispositivos. Sin embargo, por razones de seguridad, no se permitirá el acceso remoto a equipamiento de Industria 4.0 (ej. *cobots*, cadenas de montaje).
- **Supervisión obligatoria:** El acceso físico requerirá la presencia de al menos un investigador del grupo WiMuNet o personal autorizado.

Solicitud de Acceso

Las solicitudes deberán estar firmadas por el investigador o ingeniero responsable y dirigidas al responsable científico del equipamiento, incluyendo:



- **Descripción de la actividad** y/o proyecto de investigación asociado.
- **Justificación de la necesidad de uso**, demostrando la falta de equipamiento equivalente por parte de los investigadores solicitantes.
- **Recursos requeridos:** Número de horas de uso, así como planificación de fechas.
- **Datos del usuario/a:** Formación, experiencia y capacidad técnica para operar el equipo, o solicitud de asistencia técnica.
- **Compromisos:** Uso responsable de la instalación, cobertura de posibles daños y cumplimiento de normas de seguridad.
- **Centro de gasto:** Referencia presupuestaria o, en caso de contrato de transferencia con empresa, su identificación.

Autorización y Planificación

Los codirectores científicos del equipamiento, miembro del grupo WiMuNet, evaluará la solicitud y notificará a los investigadores y/o ingenieros solicitantes las fechas y coste del servicio. Se garantizará un uso equitativo del equipamiento, evitando la monopolización por un solo usuario durante más de una semana.

Resolución de Conflictos

Las denegaciones de acceso o discrepancias sobre el protocolo podrán ser impugnadas ante el Vicerrectorado con competencias en Investigación, cuyas resoluciones serán recurribles en alzada ante el Rector de la Universidad de Granada.



10. Responsables y equipo de investigación

El grupo de investigación Wireless Multimedia and Networking Lab (WiMuNet) <https://wimUNET.ugr.es/> responsable del laboratorio singular que se solicita, está compuesto por miembros pertenecientes al Departamento de Teoría de la Señal, Telemática y Comunicaciones de la Universidad de Granada (UGR). Desde su fundación, este grupo ha estado encabezado por el profesor Juan Manuel López Soler.

WiMuNet está formado por 14 miembros, de los cuales 7 son doctores, 5 estudiantes de doctorado, 1 estudiante de máster y 1 estudiante de grado. Todos ellos con una formación complementaria, que incluye Telecomunicación, Informática y Físicas. Nuestra investigación se centra en redes móviles, tanto el segmento de acceso radio como el núcleo de red, el Internet de las cosas, la softwarización de la red, las redes sensibles al tiempo (TSN) y la Inteligencia artificial (IA), haciendo hincapié en el modelado analítico y la proposición de nuevos procedimientos y diseños que mejoren el estado actual de estas tecnologías.

El equipo de investigación está compuesto por:



- **Juan Manuel Lopez Soler**, doctor en Ciencias Físicas y Catedrático de Universidad de la UGR (Investigador principal de la unidad).

- Email: juanma@ugr.es
- Orcid: 0000-0003-4572-2237
- Researcher ID: C-2437-2012



- **Pablo Ameigeiras Gutiérrez**, doctor en Ingeniería de Telecomunicación y Catedrático de Universidad en la UGR.

- Email: pameigeiras@ugr.es
- Orcid: 0000-0002-4572-3902
- Researcher ID: D-9962-2012



- **Jorge Navarro Ortiz**, doctor en Ingeniería de Telecomunicación y Profesor Titular de Universidad en la UGR. Sería **co-director del laboratorio singular**. Jorge acaba de solicitar su tercer sexenio investigador y cuenta con más de 70 publicaciones en revistas y congresos internacionales. Ha sido Director del Dpto. Teoría de la Señal, Telemática y Comunicaciones, miembro de la Junta Directiva de la Sociedad Científica en Ingeniería Telemática (SCITEL) y actualmente es Gestor Científico de la Agencia Estatal de Investigación (área



TIC-TCO, subárea Telemática). Ha sido investigador principal de 1 proyecto de investigación europeo, 3 nacionales y 2 regionales.

- Email: jorgenavarro@ugr.es
- Orcid: 0000-0003-4719-3156
- Researcher ID: B-2178-2012



● **Juan José Ramos Muñoz**, doctor en Ingeniería Informática y Profesor Titular de Universidad en la UGR. Sería **co-director del laboratorio singular**. Juan José acaba de solicitar su tercer sexenio de investigador, y tiene concedidos 4 tramos docentes. Ha participado en 19 artículos en revistas con JCR (9 en Q1, 4 en Q2, 4 Q3, 2 Q4). Ha codirigido 4 proyectos nacionales, es director de la Cátedra Digital HR Campus con la empresa Strada, y lleva más de 8 años como subdirector de estudiantes y extensión universitaria en la ETSIT de la UGR.

- Email: jjramos@ugr.es
- Orcid: 0000-0001-5428-3913
- Researcher ID: E-1022-2012



● **Pablo Muñoz Luengo**, doctor en Ingeniería de Telecomunicación y Profesor Titular de Universidad en la UGR.

- Email: pabloml@ugr.es
- Orcid: 0000-0002-3265-5728
- Researcher ID: M-6333-2015



● **Jonathan Prados Garzón**, doctor en Ingeniería de Telecomunicación y Profesor Ayudante Doctor de la UGR.

- Email: jpg@ugr.es
- Orcid: 0000-0001-9373-5767
- Researcher ID: G-1206-2016





● **Óscar Adamuz Hinojosa**, doctor en Ingeniería de Telecomunicación e Investigador Postdoctoral.

- Email: oadamuz@ugr.es
- Orcid: 0000-0002-7797-1150
- Researcher ID: R-3496-2019

Adicionalmente, los siguientes investigadores son parte del equipo de trabajo:



● **Lorena Chinchilla Romero**, estudiante de doctorado en Ingeniería de Telecomunicación.

- Email: lorenachinchilla@ugr.es
- Orcid: 0000-0001-6426-939X
- Researcher ID: AAC-1932-2022



● **Natalia Chinchilla Romero**, estudiante de doctorado en Ingeniería de Telecomunicación.

- Email: nataliachr@ugr.es
- Orcid: 0000-0001-5992-8717
- Researcher ID: AAM-9939-2021



● **Félix Delgado Ferro**, estudiante de doctorado en Ingeniería de Telecomunicación.

- Email: felixdelgado@ugr.es
- Orcid: 0000-0003-3494-9487
- Researcher ID: IRZ-4528-2023



● **Julia Caley Sánchez**, estudiante de doctorado en Ingeniería de Telecomunicación.

- Email: jcaleyas@ugr.es
- Orcid: 0000-0002-1703-8641
- Researcher ID: HOF-3371-2023





● **Pablo Rodríguez Martín**, estudiante de doctorado en Ingeniería de Telecomunicación.

- Email: pblorodrimar@ugr.es
- Orcid: 0000-0002-7345-8923
- Researcher ID: HOF-6951-2023



● **Raquel Pulido Pérez**, estudiante de Máster en Ingeniería de Telecomunicación.

- Email: raquelpulido@ugr.es



● **Lucía Fernández Carrascosa**, estudiante del grado de Ingeniería de Tecnologías de Telecomunicación.

- Email: lucia0402@correo.ugr.es

A partir de todos los proyectos de investigación, WiMuNet ha realizado 11 tesis doctorales y más de 100 proyectos fin de máster y grado. Toda la investigación llevada a cabo por este grupo ha sido publicada en 94 artículos en revistas de primer nivel, 149 contribuciones a congresos y 12 patentes. Se puede encontrar más información sobre el equipo de investigación en <http://wimUNET.ugr.es/>.

