



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

Avanzando-5G-Gemelos-Digitales

Resumen Ejecutivo ADV5G-TWINS- INDUSTRY (Ericsson)

Versión 1.0

Autores principales	Manuel Lorenzo; José Luis Jiménez, Universitat Politècnica de València
Distribución	
Entregado	14-12-2024

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



Este documento detalla la contribución de Ericsson España S.A.U. en el proyecto "Avanzando-5G-Gemelos-Digitales", enfocado en el diseño y validación de gemelos digitales para la Industria 4.0 (I4.0), utilizando infraestructuras avanzadas de redes 5G y Edge Computing. Este proyecto tiene como meta explorar casos de uso, requisitos técnicos, KPIs (Key Performance Indicators) y diseño de soluciones tecnológicas en escenarios industriales innovadores.

Ámbitos y Principales Actividades del entregable D2.2 (Actividades A5/A9):

1. Definir casos de uso, requisitos y KPIs necesarios para soluciones de gemelos digitales en I4.0.
2. Diseñar y evaluar casos de uso piloto en escenarios industriales.
3. Identificar oportunidades de optimización y propuestas de investigación futura.

Casos de Uso Analizados

Se agrupan en tres familias representativas con escenarios específicos:

- **Familia A: Control remoto de maquinaria**
 - **Caso UC-A.1:** Operación remota de una máquina de control de calidad usando 5G y video en tiempo real.
 - **Requisitos:** Latencia baja (<20 ms), observación en tiempo real, alta confiabilidad.
- **Familia B: Control autónomo y distribuido**
 - **Caso UC-B.1:** Control remoto de AGVs (Automated Guided Vehicles) utilizando procesamiento en Edge.
 - **Caso UC-B.2:** Fábricas inteligentes ("Smart Factories") con dispositivos conectados inalámbricamente a controladores PLC (Programmable Logic Controllers) vía 5G.
 - **Requisitos:** Fiabilidad de la conectividad, mínima pérdida de paquetes, velocidad de subida elevada en uplink (25-50 Mbps).
- **Familia C: Inspección remota con IA**
 - **Caso UC-C.1:** Inspección asistida por Inteligencia Artificial (IA) en la línea de producción, utilizando análisis en el Edge para decisiones rápidas de calidad.

- **Requisitos:** Latencia de <10 ms, alta capacidad uplink para transmisión de video.

Requisitos Técnicos Relevantes

Del análisis del contexto de los casos de uso de Gemelos Digitales, de forma general se concluye que la red que pone en comunicación el dispositivo/objeto/producto físico con su instancia del gemelo digital debe garantizar:

1. **Cobertura inalámbrica confiable:** Especialmente en entornos indoor, asegurando redes privadas 5G (NPN) escalables.
2. **Alta capacidad uplink:** Transferencia de datos de los dispositivos físicos al gemelo digital (15-50 Mbps).
3. **Latencia mínima:** Retardos entre 10-20 ms para sincronización en tiempo real y baja variabilidad (jitter).
4. **Flexibilidad:** Soporte de aplicaciones distribuidas entre Edge y Cloud.
5. **Interoperabilidad:** Adoptar estándares globales (3GPP) y garantizar compatibilidad entre dispositivos y redes.
6. **Observabilidad:** Exposición de KPIs y métricas de red críticas.
7. **Mecanismos de optimización** de prestaciones y recursos basando esta optimización en los datos disponibles (KPIs y métricas)

KPIs principales

KPI	Familia A	Familia B	Familia C
Latencia Máxima	<20ms	<20ms	-10ms
Throughput (Uplink)	15 Mbps	25-50 Mbps	5 Mbps
Fiabilidad	95%	99%	90%

Casos de Uso seleccionados

Se seleccionan 3 casos de uso cada uno de ellos con varios escenarios descritos en el entregable

Caso 1: Navegación Autónoma Segura de Robots Móviles Autónomos en entornos logísticos usando 5G y video en tiempo real.

Asociado a Familia B: UC-B.1: Control de vehículos/robots con guiado automatizado.

En el sector logístico, la eficiencia en la movilidad de los robots autónomos es un factor clave para optimizar operaciones y reducir costos. Este caso de uso se centra en la implementación de un sistema avanzado de navegación para Robots Móviles Autónomos (AMRs), con el objetivo de mejorar su capacidad de esquivar obstáculos de manera autónoma en entornos dinámicos.

La solución desarrollada integra hardware y software de última generación para garantizar precisión, baja latencia y alta capacidad de respuesta. Mediante un enfoque modular, el sistema permite al AMR adaptarse a cambios en su entorno y tomar decisiones en tiempo real para asegurar una navegación segura y fluida.

Arquitectura y Componentes Tecnológicos Para la implementación de esta solución, se han incorporado los siguientes componentes clave:

- Gemelo Digital del AMR: Proporciona una representación en tiempo real del estado del robot, permitiendo simulaciones y predicciones de comportamiento.
- Gestor de Comunicaciones del AMR: Recopila y procesa datos provenientes de sensores avanzados, incluyendo cámaras y LIDAR, para construir una imagen precisa del entorno mediante nubes de puntos e imágenes.
- Controlador Remoto y Módulo de Supervisión: Facilita la supervisión y el control autónomo o manual del AMR en función de las condiciones detectadas en su entorno.

Para validar la efectividad del sistema, se realizaron pruebas en escenarios que simulan condiciones reales de operación. Durante estas pruebas, el AMR siguió trayectorias predefinidas y reaccionó a un entorno cambiante, con obstáculos como personas y objetos en movimiento o en posiciones estáticas.

Este enfoque permitió evaluar la capacidad del sistema para detectar y responder a distintos elementos en entornos variables, asegurando una navegación eficiente y adaptable a condiciones complejas dentro de instalaciones logísticas.

La implementación de esta solución representa un avance significativo en la automatización de la logística, reduciendo riesgos y optimizando el desempeño de los AMRs en la industria.

Caso 2: Smart Crowd Monitoring.

Asociado a Familia B: UC-B.1: Control de vehículos/robots con guiado automatizado.

Este caso de uso plantea desplegar dispositivos de vigilancia como cámaras, robots y sensores LiDAR en las zonas de acceso a un recinto donde tiene lugar un gran evento de masas (p.e. concierto, espectáculo deportivo).

El caso de uso intenta demostrar cómo el uso combinado de ciertas tecnologías como el 5G con ondas milimétricas y el Edge computing permite construir un ecosistema de aplicaciones e infraestructuras para detectar situaciones anómalas que comprometan la seguridad en eventos masivos y todo ello sin cableados fijos, puesto que el sistema de red 5G NPN es portátil y permite desplazarlo dependiendo de los eventos, lo que no requiere de una adecuación de la localización final. Esto supone una mejora de la cobertura y del rango de actuación de los robots y demás equipos. La gran capacidad de velocidad de subida y baja latencia ofrecida por la red 5G permite una gran calidad de las comunicaciones.

Su objetivo es mejorar la seguridad en grandes eventos detectando aglomeraciones, actividades violentas y objetos sospechosos, optimizando la coordinación y eficiencia de los equipos de emergencia en situaciones críticas.

El caso de uso requiere la integración de varios sistemas y equipos, tales como LIDARs, robots, cámaras, etc. con la red 5G NPN

La gran capacidad de velocidad de subida y baja latencia ofrecida por la red 5G permite una gran calidad de las comunicaciones.

Caso 3: Smart Factory

Este caso de uso se enfoca en probar el concepto de la Fábrica Flexible, donde se analiza el uso de tecnología 5G para facilitar el despliegue de líneas de producción o fábricas enteras en un tiempo muy pequeño. Las redes privadas 5G no sólo ayudan a crear este concepto, sustituyendo las comunicaciones entre equipos por redes inalámbricas, sino que proporcionan capacidades extra para el buen funcionamiento del caso de uso.

En concreto este caso de uso explota las capacidades de la tecnología TSN (**Time-Sensitive Networking**) en redes 3GPP para garantizar una comunicación confiable y en tiempo real permitiendo minimizar los problemas como **delay, jitter** y **pérdida de paquetes**.

El caso de uso desarrolla pilotos para demostrar la viabilidad de usar una red 5G para la comunicación inalámbrica de un elemento de la fábrica, representado por un brazo robótico con un Controlador **PLC** (Programmable Logic Controller) y un **IPC** (Industrial PC) virtualizado que está corriendo en la misma fábrica (Far-Edge).

El tráfico entre estos dos elementos es controlado por dos traductores TSN, uno en la parte del equipo PLC y otro en la parte de red donde está el IPC, con el fin de que mediante el uso de redes deterministas (sensibles al tiempo) la comunicación entre ambos equipos industriales:

- **Se minimize la latencia** permitiendo la **priorización del tráfico** de paquetes críticos para que lleguen dentro de una ventana de tiempo predefinida.
- **Se controle la variabilidad en la latencia (Jitter)**; TSN sincroniza los relojes de todos los dispositivos en la red con una precisión del orden de los nanosegundos, permitiendo un tráfico predecible y reduciendo las fluctuaciones de latencia.
- **Se minimice la pérdida y se maximice la entrega en orden de los paquetes**, implementando mecanismos como Frame Replication and Elimination (IEEE 802.1CB), que duplica paquetes en rutas redundantes, asegurando la entrega incluso si una ruta falla.

D3.3

Este resumen ejecutivo destaca los principios de diseño generales para el establecimiento ágil de pilotos de Gemelos Digitales de I4.0 y las arquitecturas y topologías de la red 5G avanzada, descritas en el entregable D3.3 del proyecto 'Avanzando-5G-Gemelos-Digitales' que abarca aspectos clave sobre el diseño de soluciones, la integración con 5G y las topologías de red 5G que soportan el despliegue de pilotos industriales.

En términos generales el proceso de establecimiento de pilotos de Gemelos Digitales de I4.0 implica varias etapas críticas: diseño, integración, prueba, optimización y explotación.

0. Idea: Identificar nuevas necesidades y oportunidades
1. Diseño: Diseñar una solución cuya viabilidad técnica se va a analizar
2. Integración: Implementar e integrar el prototipo o solución inicial
3. Prueba: Probar el funcionamiento de los casos de uso de la solución
4. Optimización: Optimizar rendimiento y recursos empleados por la solución
5. Explotación: Poner en explotación el servicio

En este proyecto, para cada una de estas etapas se identificaron y pusieron en práctica unos principios de diseño generales para facilitar la implementación y validación de soluciones de forma ágil, como se resumen a continuación:

La etapa de diseño, se enfoca en especificar casos de uso, identificar requerimientos y configurar la red 5G necesaria para su integración, siendo esencial que la red esté optimizada para soportar las demandas de los Gemelos Digitales:

- PDG-01: Sistema de Recomendación de Configuración. Este principio ayuda a agilizar la etapa de diseño al proporcionar recomendaciones automáticas de configuración basadas en los KPIs requeridos, acelerando el proceso de configuración y reduciendo errores.
- PDG-02: Sistema de Estimación de rendimiento de una Configuración. Utiliza datos y simulaciones para estimar el rendimiento de una configuración antes de su implementación, asegurando que se cumplan los KPIs desde el inicio del proyecto.

En la etapa de integración, se asegura que todos los puntos de integración de la solución con la red 5G estén bien definidos y verificados, lo cual es fundamental para que la solución pueda ser implementada correctamente en entornos industriales:

- PDG-03: Puntos de Integración entre la Solución vertical y la Red 5G. Se definen tres puntos de integración críticos: el CPE/UE con la red 5G, la infraestructura de Edge, y el acceso a los datos de performance de la red 5G.

En la etapa de **prueba**, se realizan planes de pruebas eficientes para verificar el rendimiento y la fiabilidad de la solución. El enfoque está en la configuración de la RAN y en la monitorización automática de los KPIs de la red:

- PDG-04: Configuración de la RAN. Facilita la configuración semiautomática y automática de la red para adaptarse a los requerimientos específicos de cada piloto, optimización en la fase de pruebas.
- PDG-05: Sistema Automático de Monitorización de Performance de la Red 5G. Se automatizan los procesos de monitorización para obtener métricas precisas como disponibilidad, throughput y latencia.
- PDG-06: Sistema de Experimentación automático que permite generar múltiples modelos de tráfico de forma automatizada, para que los casos de uso puedan ser validados de manera programática.

En la etapa de optimización se profundiza en variantes de planes de pruebas y configuraciones alternativas de la red, en busca de una solución y configuración óptimas en rendimiento y recursos.

En la etapa de explotación que sigue al ciclo de validación, la solución validada se desplegará en su(s) entorno(s) de destino y el servicio de 5G (validado) será el de los proveedores de servicio 5G elegidos para ello. Esta etapa queda fuera del objetivo y alcance de este proyecto.

Sigue a continuación el resumen de la arquitectura y de las interfaces que conforman el sistema 5G Avanzado desplegado en el proyecto.

La arquitectura de la red 5G Avanzado tiene como objetivo proporcionar cobertura flexible y de alta capacidad para soportar soluciones industriales, incluyendo Gemelos Digitales de I4.0.

Las redes 5G no públicas (NPN) juegan un papel fundamental en este tipo de despliegues al permitir la personalización de la red según las necesidades específicas de cada piloto industrial. El sistema 5G avanzado desplegado en el laboratorio 5TONIC incluye diferentes nodos NPN, como Flamingo, y Penguin, que proporcionan – respectivamente- cobertura en bandas medias y en ondas milimétricas. Estos equipos están diseñados para ofrecer flexibilidad y alta capacidad de integración, esenciales para los pilotos de I4.0.

La red 5G Avanzado y los principios de diseño propuestos para los pilotos de Gemelos Digitales de I4.0 ofrecen una base sólida para la implementación de soluciones ágiles y escalables. La integración de tecnologías avanzadas, como el Time-Sensitive Networking (TSN) y la conectividad a través de *slices* privadas 5G, facilita la creación de entornos industriales más eficientes y optimizados para los casos de uso de I4.0.

En la Ilustración 1 se representan dos grandes bloques: a la izquierda los nodos 5G NPN y a la derecha el 5G Core (junto al Gemelo Digital de Red No Pública)

- Central office
Constituye la red pública “**Public Network (PN)**”
Incluye todas las funciones de red del plano de control (5GC)
- Enterprise Premises (Far Edge)
Constituye la red no pública “**Non-Public Network (NPN)**”.

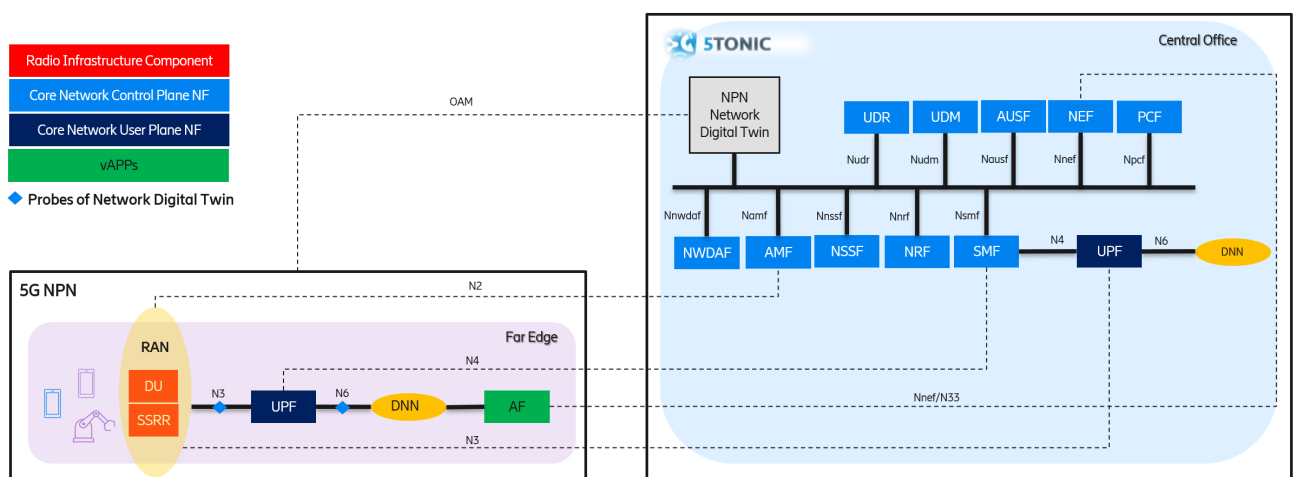


Ilustración 1: Interfaces RAN, CORE, NDT

El gemelo digital (ubicado en Central office) de la red NPN también es parte esencial de la arquitectura. A través de sus sondas en NPN monitoriza y recopila datos. A través de la interfaz OAM, puede reconfigurar el NPN para realizar optimizaciones del rendimiento de la red y de los recursos empleados.

Durante 2024 Ericsson ha desarrollado en el laboratorio de 5TONIC varios sistemas portátiles de red 5G Avanzado, inspirados en el concepto de “Redes no Públicas” (*Non-Public Networks - NPN*), capaces de proporcionar cobertura 5G en emplazamientos tanto dentro como fuera de las instalaciones de 5TONIC, pero utilizando el plano de control del núcleo de red 5G y la infraestructura experimental del laboratorio 5TONIC.

Los equipos portátiles de red 5G Avanzado en las instalaciones seleccionadas utilizan una conexión segura hacia el Data Center central de 5TONIC para

acceder a la parte del plano de control del núcleo de red 5G. Con esto, se puede extender la cobertura 5G de 5TONIC a instalaciones externas y proporcionar las mismas capacidades que se ofrecen en el laboratorio, incluida toda la infraestructura de experimentación.

El entregable D3.3-A5, hace también una descripción detallada de cada uno de estos equipos. Como ejemplo, en la ilustración 2 se observa por un lado (derecha) 3 equipos portátiles ya pre-integrados y en fase de caracterización para nutrir a sus demás digitales con la información necesaria (data sets) que permitan crear una copia digital del equipo. En la foto de la izquierda se aprecia como estos equipos pueden ser fácilmente empaquetados para su envío y despliegue su entorno de destino.

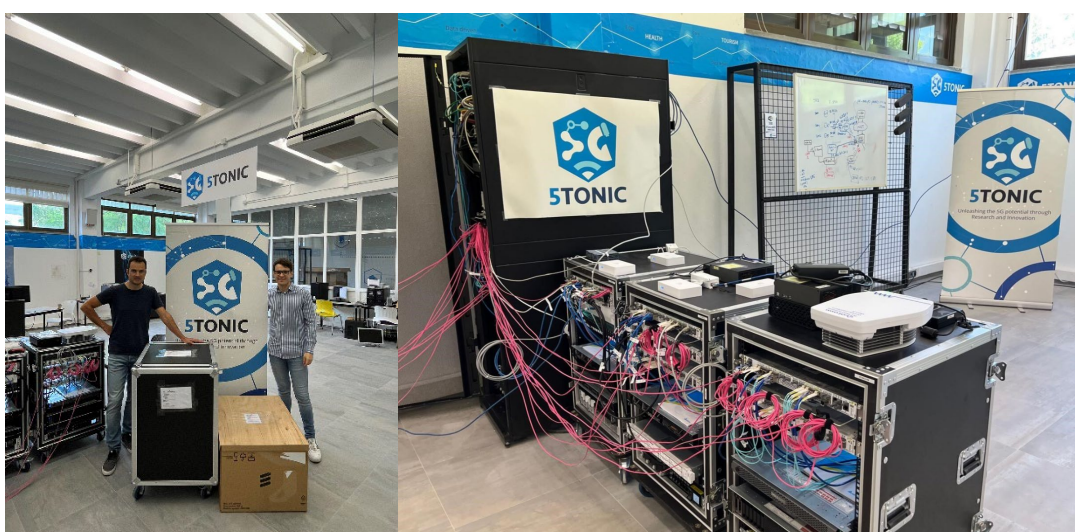


Ilustración 2 equipos portátiles de red 5G avanzada, "carritos" o NPNs

Finalmente se incluye un breve resumen del rendimiento de las redes NPN; los KPIs entregados (velocidad y latencia) por la red 5G en los diferentes tipos de despliegues en función de las bandas de frecuencia 5G empleadas: NPN 5G banda Media, NPN 5G banda milimétrica anclada en banda media, y NPN 5G banda milimétrica sin ancla en banda media.

NPN 5G Banda Media

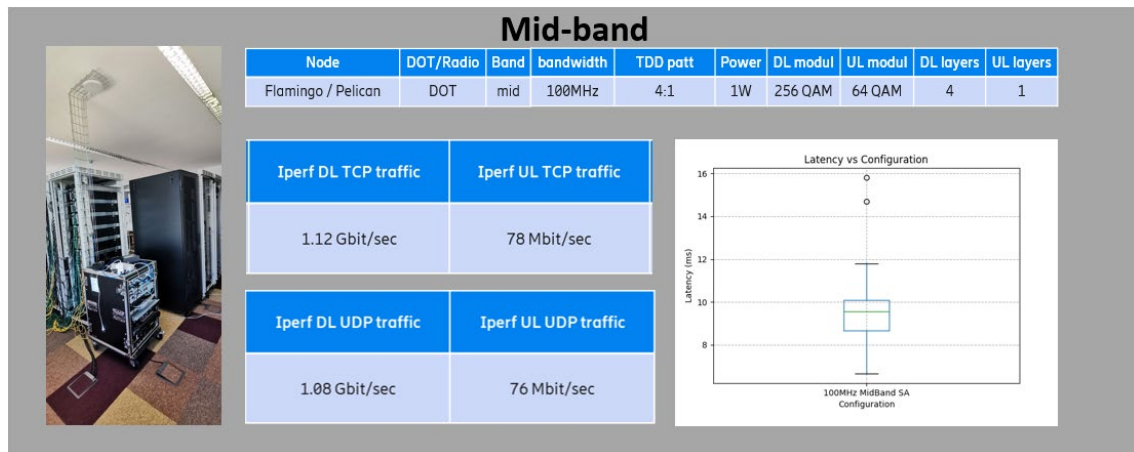


Ilustración 3: KPIs de velocidad / latencia en equipos 5G NPN de banda media

NPN 5G banda milimétrica con anchor banda media



Ilustración 4: KPIs de velocidad / latencia en equipos 5G NPN de banda milimétrica + anchor en banda media

NPN 5G banda milimétrica sin ancla en banda media

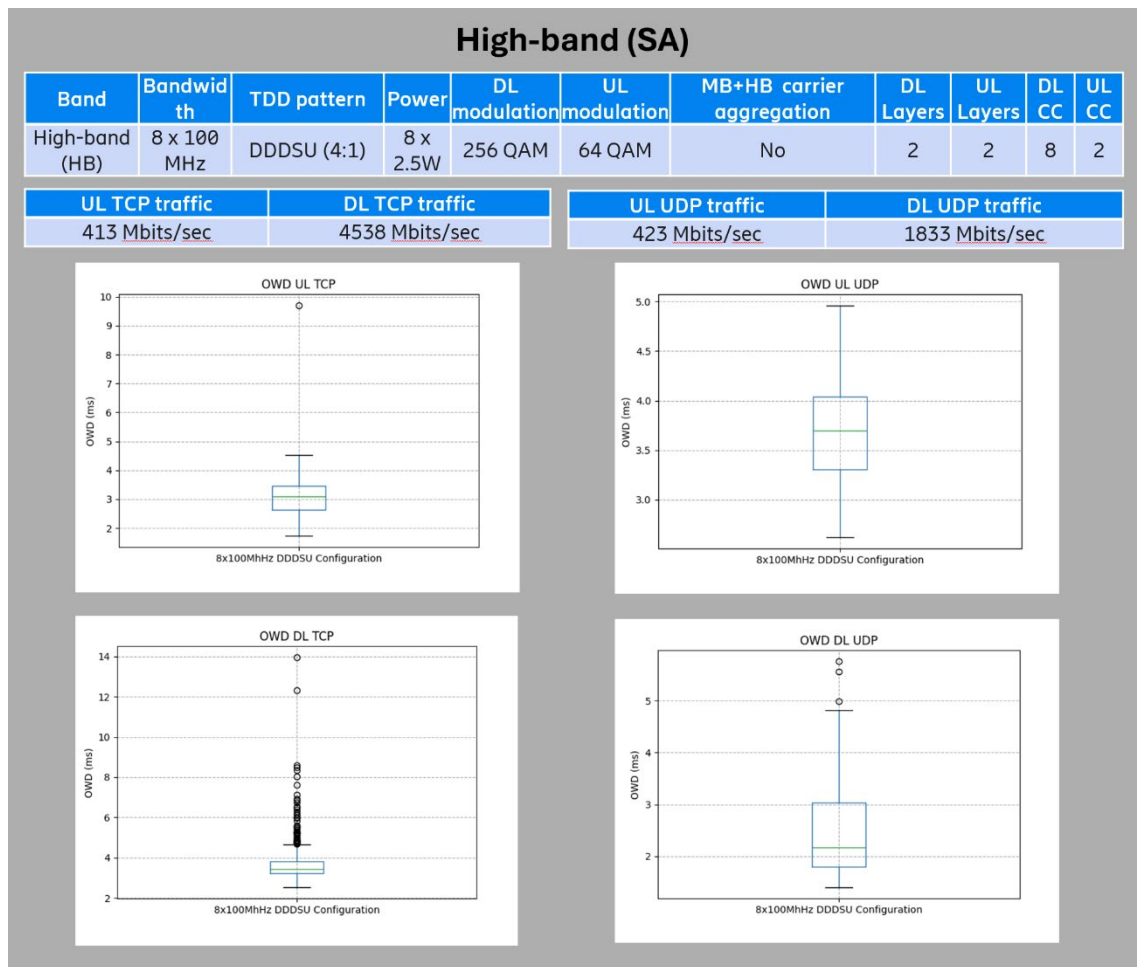


Ilustración 5: KPIs de velocidad / latencia en equipos 5G NPN de banda milimétrica en stand-alone

D4.3

Este resumen ejecutivo detalla los resultados de los pilotos ejecutados en el proyecto 'Avanzando-5G-Gemelos-Digitales' de Ericsson, en los cuales se validaron casos de uso de gemelos digitales en tiempo real de entornos I4.0. Con el fin de evaluar su rendimiento y su viabilidad los pilotos fueron ejecutados en diversas condiciones de red 5G real, en escenarios de aplicabilidad industrial como i) AMRs, ii) Reconocimiento espacial en tiempo real y iii) Fábrica flexible.

En primer lugar, se estableció un ambicioso *funnel* de innovación para maximizar la variedad y la cantidad de oportunidades de ejecución de pilotos de gemelos digitales en tiempo real de I4.0 dentro de los plazos del proyecto. Tales casos de uso fueron especificados en detalle en el entregable D2.1 y actualizados en D2.2, y se enumeran a continuación:

- **UC#1:** Gestion de flotas de AMRs
- **UC#2:** Escenario de Reconocimiento Espacial 3D de alta definición
- **UC#3:** Escenario de Fabricación Flexible Inteligente

Para satisfacer las necesidades de ejecución y validación de los casos de uso enfocados se articuló el despliegue de las arquitecturas, features y equipos de 5G Avanzado, así como la disponibilidad de las funcionalidades adicionales de la plataforma de validación de acuerdo con el siguiente *roadmap*, u hoja de ruta.

PERIODO	Infraestructuras 5G disponibles en la Plataforma de Validación (I)	Funcionalidades adicionales de la Plataforma de Validación (F)	Soporte a actividades de los Pilotos seleccionados (S)	Casos de Uso en Foco (C)
2024-Q1	Integración de los equipos 5G NPN	Especificación del conjunto de funcionalidades adicionales de la plataforma de validación	Análisis de las necesidades de diversos tipos de servicios de Gemelos Digitales de 5G	
2024-Q2	Caracterización exhaustiva del rendimiento de cada uno de los equipos 5G NPN	Implementación de funcionalidades e interfaces prioritarios para la ejecución de pilotos	Guías básicas de uso y operación de la plataforma de validación	
2024-Q3	Disponibilidad de los equipos 5G NPN.	Disponibilidad de las funcionalidades adicionales prioritarias de la plataforma para llevar a cabo la fase de Pruebas	Soporte a la definición final, y planificación de las Pruebas	UC#1
2024-Q4	Disponibilidad continuada de los equipos 5G NPN	Disponibilidad de todas las funcionalidades adicionales de la plataforma para llevar a cabo la fase de Pruebas y Optimización	Soporte a la interpretación y documentación de resultados de los pilotos ejecutados en este trimestre	UC#1(completado), UC#2(completado), UC#3(completado 90%)
2025-Q1	Disponibilidad continuada de los equipos 5G NPN	Disponibilidad de todas las funcionalidades adicionales de la plataforma para llevar a cabo la fase de Pruebas y Optimización	Documentación final y entrega de resultados de los pilotos	UC#1 (completado también en su variante near-Edge), UC#3 (completado 100%)

Tabla 1 – Resumen de hitos

Se expondrá a continuación un resumen de los principales resultados de las pruebas de validación de los pilotos, con focos especial en la exposición y verificación de los KPIs establecidos.

En relación con el **UC#1 (Escenarios de AMRs)**, se realizaron pruebas en simulación de tráfico de enjambre de AMRs sobre una red 5G real operando en bandas medias. El objetivo principal era evaluar el comportamiento de los AMRs en un entorno controlado. Se utilizó un gemelo digital de la red 5G Avanzado para optimizar la configuración de la red 5G y para simular el tráfico de AMRs.

Dentro de este scope se completaron un total de 4 pilotos distintos:

1. Piloto de simulación de tráfico de enjambre de AMRs sobre red 5G real
2. Piloto para validar el sistema ML de predicción de baterías
3. Piloto con tráfico real de AMR: variante en Far-Edge
4. Piloto con tráfico real de AMR: variante Near-Edge

El sistema 5G Avanzado empleado entregó una latencia de **menos de 20 ms en todos los casos y medidas** y un rendimiento de hasta 87 Mbps en uplink (en media) y con picos de 158 Mbps, con una cobertura y disponibilidad del servicio del 100%. Las configuraciones optimizadas recomendadas por el gemelo digital permitieron mejoras significativas en la adecuación de la red a los casos de uso.

La siguiente ilustración refleja el caso particular del quinto piloto ejecutado en el marco de este caso de uso centrado en AMRs en el que completaron tres pruebas de reconocimiento del entorno (sillas, objetos y personas) con el fin de esquivar obstáculos de manera autónoma, asegurando así una navegación segura, fluida y adaptable a situaciones cambiantes

Desde el punto de vista la red 5G, se monitorizó el tráfico Uplink generado por LIDAR + Cámara durante las pruebas siendo:

- Prueba 1: Throughput medio de 48 Mbps
- Prueba 2: Throughput medio de 87 Mbps
- Prueba 3: Throughput medio de 58 Mbps

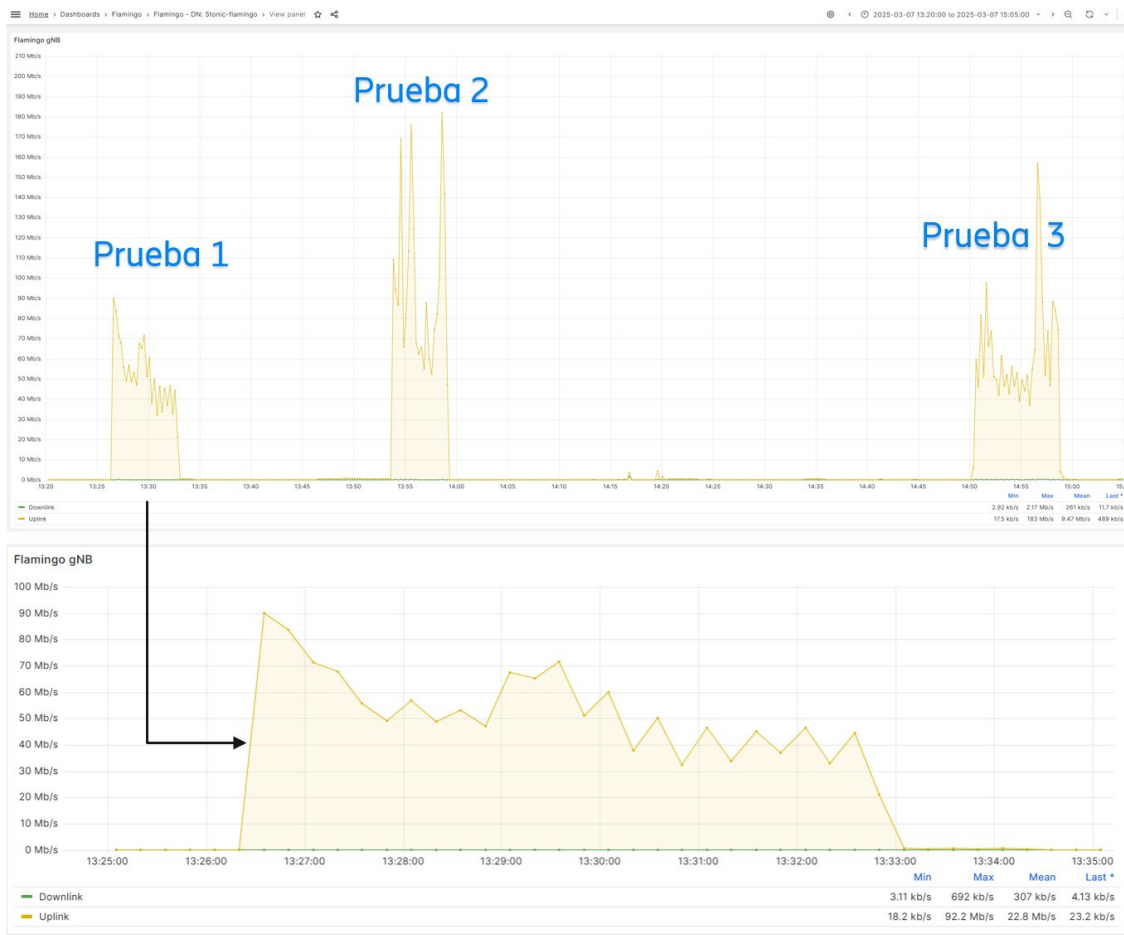


Ilustración 6. Pruebas Piloto 5: ABB y Universidad de Burgos con AMR en movilidad y AS en Near-Edge

El **UC#2 (Escenario de Reconocimiento Espacial 3D de alta definición)** se centró en un piloto integrado realizado en colaboración con Prosegur Security sobre tecnología mmW para el reconocimiento espacial en tiempo real usando LIDAR. Se utilizaron cámaras fijas y robots autónomos para monitorizar espacios seleccionados y detectar anomalías con sistemas de inteligencia artificial. La red 5G mmW proporcionó altas velocidades de transmisión y baja latencia, entregando de forma sostenida un throughput de 335 Mbps en el enlace ascendente requerido por el caso de uso siendo la latencia promedio fue de 3.4 ms y la disponibilidad del servicio fue del 100%, asegurando una red confiable para los casos de uso de seguridad. También se verificó el máximo nivel de throughput alcanzable (aunque no requerido por el caso de uso), que fue de 4.6 Gbps.



Ilustración 7 Sistema de Smart Crowd Monitoring de Prosegur junto con Equipo 5G NPN en mmW (i). Torre Suecia, Madrid, 22 Noviembre de 2024



Ilustración 8 - Velocidades de descarga observadas en red 5G mmW

En el **UC#3 (Escenario de Fabricación Flexible Inteligente)**, el objetivo fue integrar el control de brazos robóticos en una Fábrica Flexible utilizando tecnología TSN 5G. Se evaluó la viabilidad de utilizar una red 5G SA operando en bandas medias para la comunicación entre un Controlador **PLC** (Programmable Logic Controller) y un **IPC** (Industrial PC) virtualizado que está corriendo en la misma fábrica (Far-Edge). Los resultados mostraron para un throughput medio de 4 Mbps en downlink y 2 Mbps en uplink generado por la PLC y el Industrial PC respectivamente, con latencias de 7 ms en downlink y 9 ms en uplink. El jitter (definido como latency span) máximo observado en UL fue de 3 ms y 6ms en DL, lo que demostró la fiabilidad de la red para entornos industriales con requisitos de alta precisión, habilitando así el escenario de

transición segura y directa de este tipo de soluciones desde el empleo de conectividad exclusivamente fija a conectividad sobre red móvil 5G Avanzado con la flexibilidad que ello aporta en la planificación y operación de una fábrica inteligente.

La siguiente ilustración vemos la arquitectura utilizada donde el elemento a destacar es el “TSN logical bridge” entre PLC e IPC que permite implementar algoritmos y funcionalidades sensibles al tiempo con el propósito de acotar la variabilidad de la latencia y garantizar una alta confiabilidad.

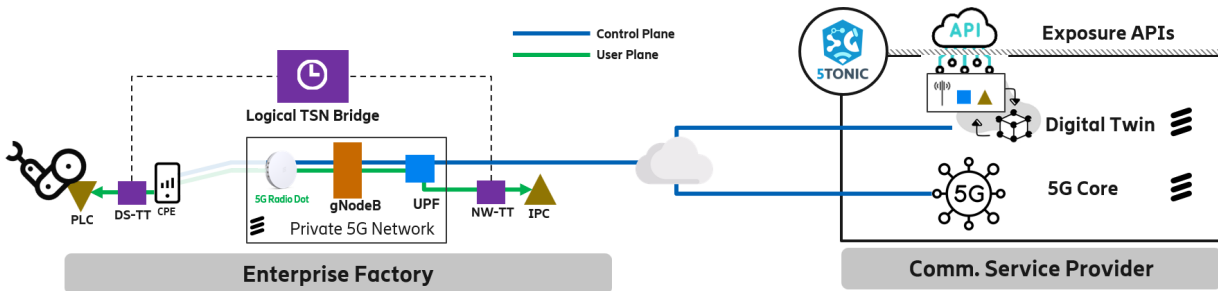


Ilustración 9 – Arquitectura del caso de uso: La red 5G actuando como TSN bridge

Como ejemplo de algunos de los resultados de la prueba se incluye la siguiente figura donde vemos el throughput y las latencias obtenidas en las pruebas

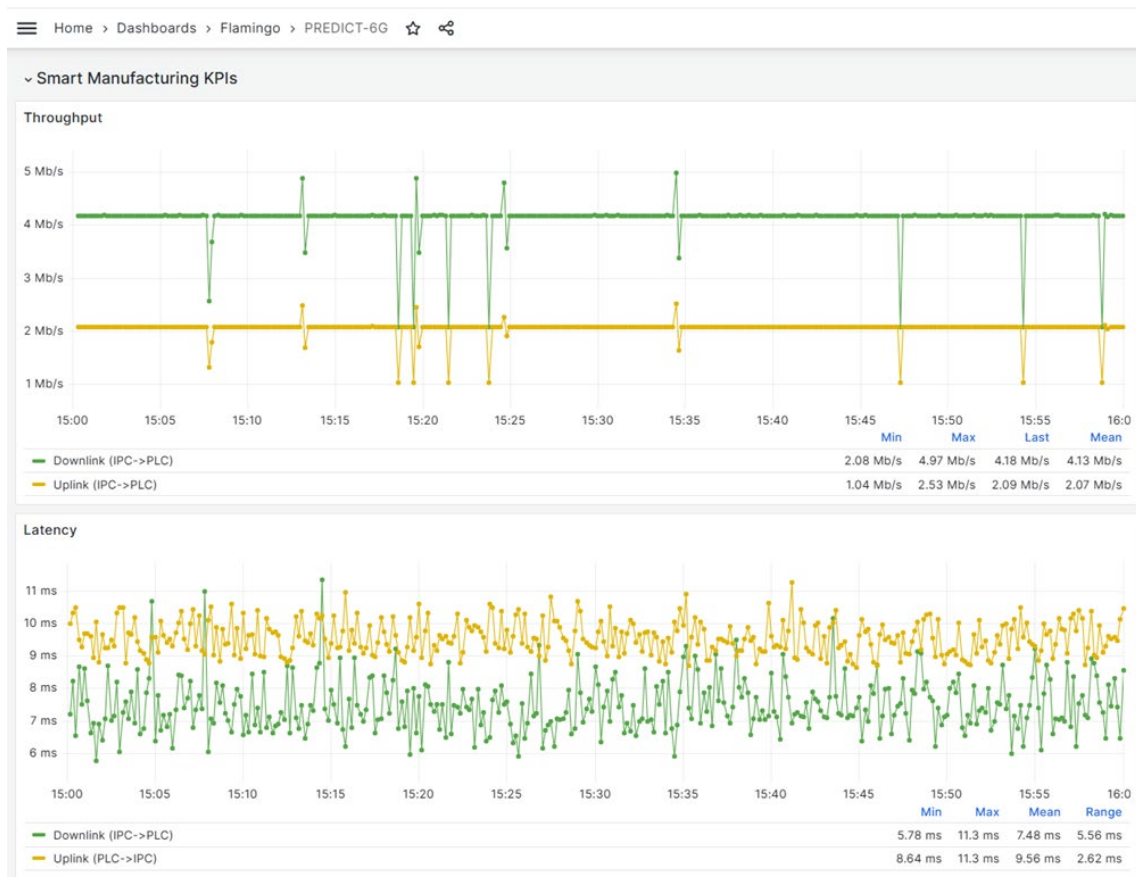


Ilustración 10 – Medidas de Throughput y Latencia en el piloto TSN

Se resumen a continuación los KPIs medidos que se identificaron como críticos para los pilotos ejecutados con tráfico real, destacando la latencia, el throughput (especialmente en Uplink), la disponibilidad del servicio y la confiabilidad de la red. Los resultados obtenidos en los pilotos mostraron un alto rendimiento de la red 5G imprescindible para la viabilidad de los casos de uso de gemelos digitales en tiempo real de I4.0 soportados, con latencias de menos de 20 ms y una cobertura del 100% en todos los casos de uso evaluados. Los KPIs también reflejan una excelente fiabilidad de la red y un rendimiento superior en entornos industriales críticos.

UC	Latencia (ms)	UL Tput (Mbps)	DL Tput (Mbps)	Disponibilidad (%)
UC#1 (far-Edge)	10 ms	62 Mbps	n.a.	100%
UC#1 (near- Edge)	19 ms	87 Mbps	n.a.	100%
UC#2	3.4 ms	335 Mbps	n.a.	100%
UC#3	6 ms	2 Mbps	4Mbps	100%