

ADV 5G TWIN



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

ADV5G-TWINS-MODEM-5G-IoT

Resumen del proyecto

Versión 1.0

Autores principales	Orange Espagne S.A.U, Universitat Politècnica de València
Distribución	
Entregado	17 / 11 / 2025

Avanzando-5G-Gemelos Digitales-Plataforma (TSI-063000-2021-112)

Índice de contenidos

1	CONTEXTO Y ALCANCE DEL PROYECTO FINALIZADO	1
2	Resumen de resultados obtenidos de las tareas del proyecto ...	4
2.1	Tarea 1: Colaborar en la definición de casos de uso de aplicaciones de 5G-IoT para gemelos digitales del proyecto, sus requisitos y KPIs, desde el punto de vista de los módems 5G-IoT.....	4
2.2	Tarea 2: Contribuir a la arquitectura del proyecto de gemelos digitales en tiempo real, desde el punto de vista de los módems 5G-IoT.....	6
2.3	Tarea 3: Describir el estado del arte de las soluciones celulares IoT, posicionando las tecnologías 5G-IoT en 3GPP Rel-17 y Rel-18 basadas en NR (New Radio), especialmente NR-REDCAP, con respecto a las tecnologías IoT celulares utilizadas en la actualidad basadas en LTE (Long Term Evolution) como LTE-M (LTE-Machines) y NB-IoT (NarrowBand IoT). Esto incluye hacer un seguimiento de los avances tecnológicos e innovaciones del 3GPP en 5G-IoT a lo largo del proyecto, especialmente NR-REDCAP, incluyendo su posible uso en redes no terrestres (NTN, Non-Terrestrial Networks).....	7
2.4	Tarea 4: Analizar mediante simulaciones el rendimiento de funcionalidades avanzadas las tecnologías 5G-IoT basadas en NR. El estudio de LTE-M/NB-IoT sobre redes NTN se considera una opción interesante dentro del proyecto, aunque no esté basado en NR.....	8
2.5	Tarea 5: Estudio del impacto y viabilidad económica de las soluciones 5G-IoT avanzadas respecto a las soluciones IoT tradicionales para analizar su penetración en el mercado.....	9
2.6	Tarea 6: Diseñar, desarrollar, y validar un prototipo de módem 5G-IoT avanzado basado en 3GPP Rel-17 NR-REDCAP. Para el desarrollo del prototipo se tendrá en cuenta la evolución tecnológica comercial de la industria (soporte de fabricantes de equipos de redes y terminales).....	11
2.7	Tarea 7: Participación en las pruebas y pilotos de las aplicaciones de gemelos digitales del proyecto desde el punto de vista de los módems/receptores 5G-IoT, proporcionando apoyo en la configuración y uso de los mismos.....	13
3	Conclusión.....	14

1 CONTEXTO Y ALCANCE DEL PROYECTO FINALIZADO

El subproyecto MODEM 5G-IoT AVANZADO tuvo como objetivo principal el diseño y desarrollo de un modem 5G-RedCap Release 17 con capacidades IoT que se integró en la plataforma de gemelos digitales del proyecto Avanzando-5G-Gemelos-Digitales-Plataforma (ADV5G-TWINS, TSI-063000-2021-112).

Para la consecución, se desarrollaron las siguientes tareas:

T1: Colaborar en la definición de casos de uso de aplicaciones de 5G-IoT para gemelos digitales del proyecto, sus requisitos y KPIs, desde el punto de vista de los módems 5G-IoT.

T2: Contribuir a la arquitectura del proyecto de gemelos digitales en tiempo real, desde el punto de vista de los módems 5G-IoT.

T3: Describir el estado del arte de las soluciones celulares IoT, posicionando las tecnologías 5G-IoT en 3GPP Rel-17 y Rel-18 basadas en NR (New Radio), especialmente NR-REDCAP, con respecto a las tecnologías IoT celulares utilizadas en la actualidad basadas en LTE (Long Term Evolution) como LTE-M (LTE-Machines) y NB-IoT (NarrowBand IoT). Esto incluye hacer un seguimiento de los avances tecnológicos e innovaciones del 3GPP en 5G-IoT a lo largo del proyecto, especialmente NR-REDCAP, incluyendo su posible uso en redes no terrestres (NTN, Non-Terrestrial Networks).

T4: Analizar mediante simulaciones el rendimiento de funcionalidades avanzadas las tecnologías 5G-IoT basadas en NR. El estudio de LTE-M/NB-IoT sobre redes NTN se considera una opción interesante dentro del proyecto, aunque no esté basado en NR.

T5: Estudio del impacto y viabilidad económica de las soluciones 5G-IoT avanzadas respecto a las soluciones IoT tradicionales para analizar su penetración en el mercado.

T6: Diseñar, desarrollar, y validar un prototipo de modem 5G-IoT avanzado basado en 3GPP Rel-17 NR-REDCAP. Para el desarrollo del prototipo se tendrá en cuenta la evolución tecnológica comercial de la industria (soporte de fabricantes de equipos de redes y terminales).

T7: Participación en las pruebas y pilotos de las aplicaciones de gemelos digitales del proyecto desde el punto de vista de los módems/receptores 5G-IoT, proporcionando apoyo en la configuración y uso de los mismos.

El listado de los entregables realizados asociados a la consecución de las tareas fue:

- **D2.1 Definición de casos de uso, requisitos y KPIs de 5G-IoT:**
Se identificó y definió los casos de uso iniciales, requisitos y KPIs de 5G-IoT Rel-17 y Rel-18, posicionando NR-REDCAP respecto a soluciones IoT actuales. Se realizó una propuesta inicial del plan de trabajo para el diseño, desarrollo y validación del prototipo del módem de 5G-IoT avanzado.
- **D2.2 Evolución de los casos de uso, requisitos y KPIs de 5G-IoT:**
Se presentó la evolución de los casos de uso, requisitos y KPIs de 5G-IoT para gemelos digitales en entornos industriales y logísticos portuarios en función de los avances tecnológicos de 5G-IoT en el 3GPP y los estudios de rendimiento realizados. Se analizó la arquitectura del proyecto de gemelos digitales desde el punto de vista de los módems 5G-IoT.
- **D2.3 Definición final de casos de uso, requisitos y KPIs de 5G-IoT:**
Se realizó la descripción final de los casos de uso, requisitos y KPIs de 5G-IoT, teniendo en cuenta la evolución final del 3GPP Rel-18, los análisis de rendimiento (incluyendo simulaciones) de funcionalidades avanzadas de las tecnologías 5G-IoT basadas en NR. Asimismo, se incluyó un estudio del impacto y viabilidad económica de las soluciones 5G-IoT avanzadas como NR-REDCAP respecto a las soluciones IoT tradicionales, y se analizó su potencial en el mercado. Se propuso posibles líneas de investigación futuras en el campo de tecnologías 5G-IoT avanzadas.
- **D3.1 Informe inicial del prototipo de módem 5G-IoT avanzado:**
Se presentó el trabajo realizado sobre el diseño y desarrollo de un

prototipo de módem 5G-IoT avanzado (3GPP Rel-17 NR-REDCAP) realizado durante la segunda anualidad del proyecto (2023), y plan de trabajo para la última anualidad del proyecto (2025) para desarrollar el prototipo (P3.1) y su validación en una prueba piloto (VT3.1).

- **D3.2 Informe final sobre el prototipo de módem 5G-IoT avanzado:**

Se describieron las tareas de 5G-IoT realizadas durante la tercera anualidad del proyecto. Se incluyó el progreso, seguimiento y finalización del diseño, desarrollo y pruebas de validación del prototipo, sirviendo como continuación y expansión del entregable D3.1. Asimismo, este entregable recoge la actualización de los trabajos relacionados con 5G-IoT, incluyendo resultados de rendimiento y consumo del prototipo desarrollado en P3.1 y validado en 5G-IoT de VT3.1, análisis de KPIs, y conclusiones.

- **D4.1 Planificación del laboratorio y de los pilotos de las plataformas 5G-IoT-Edge-Cloud:**

Se describió el plan de pruebas para los módems 5G-IoT en el contexto de la creación del laboratorio de gemelos digitales en tiempo real y de la plataforma 5G IoT-Edge-Cloud del proyecto Avanzando-5G-Gemelos-Digitales. Los objetivos incluyeron, analizar la planificación del proyecto Avanzando-5G-Gemelos-Digitales, definir KPIs de rendimiento, especificar el plan de validación y evaluación de rendimiento de los módems, y detallar un plan de trabajo.

- **D4.2: Puesta en marcha de las plataformas 5G IoT Edge-Cloud en el laboratorio y en los pilotos de gemelos digitales:**

Se detalló la integración del módem en la puesta en marcha de la plataforma 5G IoT-Edge-Cloud en el laboratorio del iTEAM-UPV y en los pilotos de los gemelos digitales. Asimismo, se testeó y validó las prestaciones del módem en la red privada del iTEAM-UPV y en los diferentes casos de uso. Asimismo, se incluye la documentación del prototipo P4.1 y el piloto de validación VT4.1.

- **D4.3: Pruebas finales del laboratorio y pilotos de gemelos digitales en tiempo real con plataformas 5G-IoT Edge-Cloud:** Informe final sobre las pruebas de gemelos digitales realizadas en el laboratorio y en el piloto con las plataformas 5G IoT-Edge-Cloud. Este entregable documentó los trabajos, resultados, análisis, optimizaciones y conclusiones del prototipo P4.2 y del piloto de validación VT4.2.

2 Resumen de resultados obtenidos de las tareas del proyecto

En esta sección se describen los hitos correspondientes a cada una de las tareas del proyecto.

2.1 Tarea 1: Colaborar en la definición de casos de uso de aplicaciones de 5G-IoT para gemelos digitales del proyecto, sus requisitos y KPIs, desde el punto de vista de los módems 5G-IoT.

Los objetivos asociados a la Tarea 1 se han alcanzado satisfactoriamente. En esta tarea se colaboró en la definición de los casos de uso del proyecto desde la perspectiva del módem 5G-IoT, identificando las interfaces necesarias, los requisitos de comunicación y los umbrales objetivo de los KPIs asociados.

En total, se definieron **cuatro casos de uso finales** seleccionados por su relevancia operativa, heterogeneidad tecnológica y capacidad para explotar las capacidades de 5G-RedCap:

1. **Detección de plazas de aparcamiento libres** mediante cámaras ubicadas en una zona del puerto.
2. **Monitorización del estado térmico de baterías** en vehículos eléctricos a través de una cámara térmica integrada en el robot RB-WATCHER.
3. **Barreras virtuales para conteo de personas** mediante visión artificial.
4. **Coche de policía conectado** equipado con un tracker GPS y una cámara 360° para escenarios de seguridad.

Los KPIs más relevantes para los casos de uso considerados son:

- **Cobertura:** el alcance requerido puede ir desde pocos metros (corto alcance) hasta unos pocos kilómetros en zonas urbanas y de más de 10 km en entornos rurales.
- **Fiabilidad:** mide la capacidad de transmitir una cantidad determinada de tráfico dentro de una duración predeterminada con una alta probabilidad de éxito.
- **Latencia:** puede tener restricciones relajadas en aplicaciones como los hogares inteligentes, pero requisitos estrictos en aplicaciones en tiempo real o de toma de decisiones.
- **Throughput:** desde unos pocos kbps para enviar datos de estado hasta varios Mbps (o incluso Gbps) para transportar información de vídeo. Una variante es la tasa de pico.
- **Duración** de la batería: el objetivo es que sea de larga duración. Para ello, se trata de aprovechar las capacidades de la red radio para minimizar la energía consumida.

A partir de estos KPIs se establecieron los requisitos cualitativos y cuantitativos para cada caso de uso. La siguiente tabla recoge los requisitos definidos, alineados con los valores objetivo de **5G-RedCap según 3GPP Release 17**, especialmente en Throughput, latencia y movilidad:

KPI	Cámara + AI para detección	Robots móviles	Barreras Virtuales	Coche Policía
Cobertura	Se requiere una cobertura de centenares de metros dado el despliegue previsto en los escenarios de uso			
Fiabilidad	Alta	Alta	Alta	Alta
Latencia	≤500 ms	≤500 ms	≤500 ms	≤500 ms
Throughput	>12 Mbps	>12 Mbps	>12 Mbps	>12 Mbps
Movilidad	No aplica	Up to 10 Km/h	No aplica	Up to 80 Km/h
Nivel de ciberseguridad	Cumplimiento Plan Español de Ciberseguridad			

Duración batería	No aplica (alimentación externa)	Horas	No aplica (alimentación externa)	No aplica (alimentación externa)
-------------------------	----------------------------------	-------	----------------------------------	----------------------------------

Tabla 1. Requisitos por caso de uso.

Finalmente, se elaboraron las versiones inicial, intermedia y final de los requisitos, casos de uso y KPIs, documentadas en los entregables **D2.1, D2.2 y D2.3**, donde puede consultarse el detalle completo del análisis realizado en esta tarea.

2.2 Tarea 2: Contribuir a la arquitectura del proyecto de gemelos digitales en tiempo real, desde el punto de vista de los módems 5G-IoT.

Los objetivos asociados a la Tarea 2 se han alcanzado satisfactoriamente. En esta tarea se analizó y definió el papel del módem 5G-IoT avanzado dentro de la arquitectura global de la plataforma de gemelos digitales en tiempo real del proyecto. El módem constituye un componente esencial de dicha arquitectura, ya que proporciona la conectividad 5G necesaria para dispositivos finales como sensores, cámaras, y robots móviles, asegurando la transmisión fiable de datos hacia el entorno Edge-Cloud de la plataforma.

Desde el punto de vista arquitectónico, el módem interactúa directamente con dos bloques principales:

1. **Los dispositivos finales**, a través de interfaces físicas (Ethernet, USB) y protocolos de comunicación locales, facilitando la captura y envío de datos.
2. **La red radio 5G**, encargada de proporcionar conectividad de baja latencia, alta fiabilidad y ancho de banda garantizado conforme a las especificaciones 3GPP.

El análisis realizado confirmó que no existen restricciones ni dependencias críticas entre la arquitectura de red 5G utilizada en el proyecto y el funcionamiento del módem ya que este ha sido diseñado para operar sobre cualquier infraestructura compatible con 3GPP. Por tanto, los módems se integran de forma transparente en la arquitectura definida.

Adicionalmente, se estableció el mecanismo de integración del módem con la plataforma de gemelos digitales mediante el envío de métricas propias (como KPIs de cobertura o estado de conexión) hacia un servidor de aplicación. Finalmente, el análisis de la integración del módem en la arquitectura del proyecto se encuentra documentado en el entregable **D2.2**.

2.3 Tarea 3: Describir el estado del arte de las soluciones celulares IoT, posicionando las tecnologías 5G-IoT en 3GPP Rel-17 y Rel-18 basadas en NR (New Radio), especialmente NR-REDCAP, con respecto a las tecnologías IoT celulares utilizadas en la actualidad basadas en LTE (Long Term Evolution) como LTE-M (LTE-Machines) y NB-IoT (NarrowBand IoT). Esto incluye hacer un seguimiento de los avances tecnológicos e innovaciones del 3GPP en 5G-IoT a lo largo del proyecto, especialmente NR-REDCAP, incluyendo su posible uso en redes no terrestres (NTN, Non-Terrestrial Networks).

Los objetivos asociados a la Tarea 3 se han alcanzado satisfactoriamente. En esta tarea se llevó a cabo un análisis exhaustivo del estado del arte de las tecnologías celulares IoT, abarcando desde **3GPP Release 15 hasta Release 18**, con especial atención a la evolución hacia **5G-IoT basado en NR (New Radio)** y, en particular, a la tecnología **NR-RedCap (Reduced Capability)**. Este análisis permitió contextualizar la posición de RedCap frente a tecnologías IoT ya consolidadas como **LTE-M** y **NB-IoT**, y estudiar su potencial para habilitar nuevos casos de uso en la industria, la logística y los entornos portuarios.

El análisis de **Release 17** mostró la introducción formal del ecosistema RedCap, concebido para dispositivos que requieren **menor complejidad, menor coste y alta eficiencia energética**, manteniendo compatibilidad con 5G NR en **FR1** y, en algunos escenarios, **FR2**. Esta release posiciona RedCap como una solución intermedia entre LTE-M/NB-IoT y los terminales 5G de altas prestaciones, proporcionando **velocidades de hasta ~100 Mbps**, baja latencia y un consumo energético reducido. Estas características lo hacen adecuado para sensores avanzados, cámaras, robots móviles, wearables y otros equipos IoT de gama media utilizados en automatización industrial y/o Smart Cities.

En **Release 18**, el 3GPP continúa la evolución de RedCap con el objetivo de **ampliar su presencia en el mercado IoT de bajo coste y bajo tráfico**. Esta release introduce optimizaciones específicas para reducir todavía más el consumo energético y simplificar la implementación del dispositivo, permitiendo abordar aplicaciones similares a las de **LTE-M y NB-IoT**. Entre las novedades más relevantes se incluyen la **reducción del ancho de banda soportado a 5 MHz**, la **limitación del throughput máximo a ~10 Mbps**, la **relajación de los tiempos de procesamiento** y mejoras orientadas a **prolongar la duración de la batería**.

Asimismo, el análisis incluyó el seguimiento del avance del 3GPP en el ámbito de las **redes no terrestres (NTN)**, donde RedCap comienza a contemplarse como una opción viable para comunicaciones satelitales IoT en escenarios donde la resiliencia y cobertura global son esenciales. Esta línea emergente abre nuevas posibilidades de conectividad para dispositivos IoT industriales y logísticos más allá de los entornos terrestres.

Finalmente, todo el análisis detallado de la evolución desde Release 15 hasta Release 18 se recoge en los entregables **D2.1, D2.2 y D2.3**.

2.4 Tarea 4: Analizar mediante simulaciones el rendimiento de funcionalidades avanzadas las tecnologías 5G-IoT basadas en NR. El estudio de LTE-M/NB-IoT sobre redes NTN se considera una opción interesante dentro del proyecto, aunque no esté basado en NR.

Los objetivos asociados a la Tarea 4 se han alcanzado satisfactoriamente. En esta tarea se realizó un análisis detallado del rendimiento de funcionalidades avanzadas de las tecnologías **5G-IoT basadas en NR**, utilizando simulaciones que permitieron evaluar de forma anticipada la viabilidad de los casos de uso antes de proceder a las pruebas finales con el prototipo físico. Aunque el estudio de tecnologías **LTE-M y NB-IoT** en redes no terrestres (NTN) se consideró como una línea complementaria de interés, el foco principal del análisis se centró en **NR-RedCap**, por su alineación directa con los objetivos del proyecto.

El escenario de evaluación se definió en el **campus de la Universitat Politècnica de València (UPV)**, donde el ITEAM dispone de una **red**

privada 5G SA, lo que permitió modelar condiciones realistas de despliegue urbano. Las simulaciones se orientaron a estimar parámetros clave de calidad del enlace, tales como, **RSRP**, **SINR** y **Throughput**, tanto para dispositivos 5G convencionales como para terminales **RedCap**. Los resultados obtenidos mostraron que, en la mayor parte de las ubicaciones simuladas, se alcanzaban valores suficientes para validar los casos de uso, confirmando que RedCap puede proporcionar **niveles de rendimiento comparables a los de UEs convencionales**, particularmente en escenarios exteriores con buena visibilidad radio.

En términos de capacidad, los análisis reflejaron que **el requisito de 12 Mbps en el enlace ascendente**, establecido para los casos de uso del proyecto, se cumple en un porcentaje elevado de puntos del campus, mientras que en el enlace descendente se alcanzaron **tasas cercanas a los 100 Mbps**, coherentes con las capacidades máximas previstas para dispositivos RedCap de Release 17 en configuraciones FR1 de 20 MHz.

El estudio también incluyó el impacto de la **reducción del número de antenas** en los dispositivos RedCap (1Rx), en comparación con los UEs convencionales (2Rx o 4Rx). En los resultados simulados para el **PDSCH en escenarios urbanos**, se observó que pasar de **4Rx a 2Rx implica una pérdida aproximada de 3 dB**, mientras que reducir de **2Rx a 1Rx se pierden entre 3,2 y 4 dB**. Estos valores permiten establecer una regla general por la que se perderían unos 3dB al reducir las antenas a la mitad. En el enlace ascendente, se consideró **1Tx tanto en UEs convencionales como en terminales RedCap**, con lo que las diferencias se produjeron únicamente en la recepción.

En conjunto, las simulaciones confirmaron la **viabilidad técnica** de emplear dispositivos 5G-RedCap para los casos de uso definidos en el proyecto, y permitieron anticipar su comportamiento antes de la integración del prototipo. Todos los detalles del análisis, así como las figuras comparativas y las conclusiones asociadas, se encuentran documentados en los entregables **D2.2 y D2.3**.

2.5 Tarea 5: Estudio del impacto y viabilidad económica de las soluciones 5G-IoT avanzadas respecto a las soluciones IoT tradicionales para analizar su penetración en el mercado.

Los objetivos asociados a la Tarea 5 se han alcanzado satisfactoriamente. Esta tarea consistió en evaluar el **impacto**

tecnológico y la viabilidad económica de las soluciones **5G-IoT avanzadas**, con especial énfasis en **NR-RedCap**, analizando su posición frente a tecnologías IoT tradicionales tanto 3GPP (LTE-M, NB-IoT) como no 3GPP (LoRa, Sigfox, Wi-Fi), y, su potencial penetración en el mercado durante los próximos años.

El análisis confirma que **RedCap se introduce como una tecnología de compromiso** que ofrece un equilibrio óptimo entre **capacidad de transmisión, eficiencia energética y coste**, posicionándose entre los dispositivos IoT de muy baja velocidad (LTE-M/NB-IoT) y los terminales 5G de altas prestaciones. Específicamente:

- REDCAP ofrece anchos de banda superiores a 2 Mbps (10 Mbps para Release 18, ~ 100 Mbps para Release 17), así como, eficiencia energética alta y baja latencia, lo suficiente para conectar maquinaria-robots-objetos. Otro de los factores clave es su capacidad de escalabilidad que la posicionan como una tecnología clave y disruptiva dentro el mercado IoT.
- Los principales casos de uso y/o aplicaciones son: Wearables (relojes inteligentes, pulseras inteligentes médicas, fitness), aplicaciones de realidad extendida (mantenimiento predictivo IA, soporte remoto IA), sensores industriales, video vigilancia (inspección infraestructura crítica, zonas de difícil acceso con peligro humano), y automatización y/o digitalización industrial mediante robótica.

La viabilidad y potencial de mercado de REDCAP depende de varios factores primordiales, tales como: (1) Factores técnicos, es decir, el despliegue de redes a nivel mundial. (2) Factores económicos, como, coste de implementación y economía de escala en el hardware de Chipset y/o dispositivos. (3) Factores de Mercado, tales como, demanda de aplicaciones específicas, competencia con otras tecnologías, y regulación.

- En la actualidad, el despliegue de redes REDCAP a nivel mundial, comercialización de Chipset, módulos, y equipos de usuario finales REDCAP, se encuentra aún en una fase

preliminar. Una vez finalizada la estandarización de REDCAP Release 17 a finales del 2022, los primeros despliegues de red y pruebas de la tecnología se llevaron a cabo durante el año 2024, pero son aún muy bajos a nivel mundial. Se esperan desarrollos más amplios previstos a lo largo de 2025 y 2026. Por otro lado, REDCAP Release 18, ha finalizado la estandarización en junio de 2024, por lo tanto, es improbable que esté disponible comercialmente antes de 2026 o 2027.

- o ABI Research, una firma global de inteligencia tecnológica y análisis de mercado, pronostica inicialmente un crecimiento moderado en el mercado de REDCAP Release 17. No obstante, en el año 2028, con la comercialización de REDCAP Release 18, se producirá un punto de inflexión a medida que los precios de venta se reduzcan, estimando un mayor crecimiento del mercado. En este sentido, prevé que la venta de módulos REDCAP podrían alcanzar los 80 millones de módulos entre el 2024 y 2029. Específicamente, prevé que 56 millones de módulos o el 71% de todos ellos serán REDCAP Release 18, y el restante, 23 millones de módulos o el 29% serán REDCAP Release 17.

Finalmente, todo el análisis del impacto, la madurez tecnológica, la evolución del mercado y el potencial económico de las soluciones 5G-IoT avanzadas se encuentra documentado en detalle en el entregable **D2.3**.

2.6 Tarea 6: Diseñar, desarrollar, y validar un prototipo de módem 5G-IoT avanzado basado en 3GPP Rel-17 NR-REDCAP. Para el desarrollo del prototipo se tendrá en cuenta la evolución tecnológica comercial de la industria (soporte de fabricantes de equipos de redes y terminales).

Los objetivos asociados a la Tarea 6 se han alcanzado satisfactoriamente. Esta tarea constituyó el núcleo técnico del subproyecto, culminando en el diseño, desarrollo e implementación de un **prototipo funcional de módem 5G-RedCap Release 17**, posteriormente integrado en la plataforma de gemelos digitales del

proyecto ADV5G-TWINS para dar soporte a los casos de uso en entornos industriales y portuarios.

El trabajo permitió evolucionar desde una fase inicial de análisis de requisitos hacia la construcción de un prototipo completamente operativo, siguiendo una metodología sistemática que abarcó desde las **consideraciones de diseño hardware**, hasta la **implementación software**, la **integración del sistema** y la **validación experimental en red 5G real**.

El **prototipo final del modem 5G-RedCap Rel-17 está compuesto por dos placas hardware**. (1) **módulo de comunicaciones 5G-RedCap**, encargado de la conectividad móvil. (2) **Raspberry Pi 4**, que actúa como unidad de control, ejecutando el software de gestión e interacción con el prototipo.

El módulo 5G-RedCap seleccionado, **Quectel RG255CGL00AA-4M2-SGASA**, basado en el chipset **Qualcomm Snapdragon X35**, se integró en una placa hardware diseñada específicamente mediante **KiCad**, siguiendo criterios de compatibilidad electromagnética, eficiencia energética, mantenibilidad y escalabilidad. Esta placa incorpora las interfaces necesarias (UART, USB, SIM, RF), los reguladores de potencia y los elementos de protección y señalización adecuados.

La Raspberry Pi 4, configurada con OpenWRT, asumió las funciones de control y gestión del módem, ofreciendo tanto **gestión directa por comandos AT** como un entorno de configuración y **monitorización vía interfaz web**.

Las pruebas realizadas en la **red privada 5G SA Release 17 del iTEAM-UPV** confirmaron la correcta operación del sistema, validando tanto los procesos de registro y conexión como la transmisión de datos en condiciones reales. Asimismo, las mediciones de consumo energético demostraron una **ventaja significativa de RedCap frente a módulos 5G tradicionales de Release 16** (como el Quectel RG520N), con reducciones superiores al **50 % en transmisión sostenida** y mejoras consistentes en todos los modos de operación (airplane, wake-up, idle, transmisión).

Este comportamiento se alinea con la filosofía de diseño de **NR-Light en Release 17** y las optimizaciones de eficiencia energética introducidas por Qualcomm en el chipset Snapdragon X35,

consolidando a 5G-RedCap como una tecnología idónea para dispositivos IoT que requieren conectividad 5G con bajo consumo.

Finalmente, el proceso completo, incluyendo diseño hardware, integración mecánica, desarrollo software, validación funcional, análisis de consumo y pruebas en red privada, se encuentra documentado en detalle en los entregables **D3.1** y **D3.2**.

2.7 Tarea 7: Participación en las pruebas y pilotos de las aplicaciones de gemelos digitales del proyecto desde el punto de vista de los módems/receptores 5G-IoT, proporcionando apoyo en la configuración y uso de los mismos.

Los objetivos asociados a la Tarea 7 se han alcanzado satisfactoriamente. Esta tarea se centró en la **participación activa de validación, integración y operación** de los módems 5G-IoT dentro de los **pilotos y pruebas finales** de la plataforma de gemelos digitales del proyecto ADV5G-TWINS. El trabajo desarrollado permitió confirmar la funcionalidad del prototipo 5G-RedCap en escenarios reales, garantizando que la conectividad 5G proporcionada por el módem cumpliera los requisitos operativos de los casos de uso definidos en el proyecto.

El equipo proporcionó **apoyo directo en la configuración, puesta en marcha y monitorización** de los módems durante las pruebas. Esto incluyó la integración del módem en los dispositivos finales utilizados en los pilotos, robots móviles, cámaras, sensores y el resto de los elementos conectados de la plataforma, asegurando que cada dispositivo dispusiera de conectividad 5G estable y validando que los parámetros críticos de operación (registro, conexión, KPIs radio y throughput) se comportasen dentro de los umbrales previstos.

La participación en los pilotos permitió validar el rendimiento del módem en diferentes escenarios funcionales: En la **red privada 5G**, donde se evaluaron la estabilidad, latencia, cobertura interior y exterior, capacidad del módem para integrarse con los módulos de Edge-Cloud. En la **plataforma de gemelos digitales**, donde los módems transmitieron datos en tiempo real (telemetría, métricas radio, flujos de

vídeo, datos de sensores), permitiendo evaluar la latencia extremo a extremo, fiabilidad y estabilidad del enlace en condiciones operativas reales.

La experiencia obtenida en esta tarea permitió **generar un conocimiento amplio** enfocado a la futura explotación de la plataforma y a la integración de nuevos dispositivos 5G-IoT basados en RedCap.

Toda la documentación técnica, resultados de pruebas, configuraciones empleadas, análisis de rendimiento y conclusiones obtenidas en el marco de esta tarea se encuentran recogidos en los entregables **D4.1, D4.2 y D4.3**.

3 Conclusión

En resumen, el subproyecto **MODEM 5G-IoT AVANZADO** cumplió con éxito su objetivo principal: diseñar, desarrollar y validar un módem **5G-RedCap Release 17** integrado en la plataforma de gemelos digitales del proyecto ADV5G-TWINS. El prototipo desarrollado demostró su capacidad para operar en una red privada 5G SA, proporcionar conectividad fiable para los casos de uso definidos y cumplir los KPIs requeridos. El trabajo realizado permitió disponer de un módem funcional, validado y preparado para su integración en los pilotos del proyecto, reforzando el papel de 5G-RedCap como tecnología clave para futuros despliegues IoT avanzados.