



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

ADV5G-IMM-SDR

D3.4: Proyecto de Desarrollo de un Test-Bed Open RAN Basado en SDR

Versión 1.0

Autores principales	Irene Velasco Nogales Miguel Ángel Flores Trueba Juan Manuel Canabal Muñoz Ricardo López Esteve
Entregado	28 de febrero de 2025

Detalles del proyecto

Título del proyecto	AVANZANDO-5G-INMERSIVO-TELEPRESENCIA
Acrónimo	ADV5G-IMM-SDR
Título de actividad	PROTOTIPO TEST-BED SDR
Código	A08
Adjudicatario	Vodafone España, S.A.U.
Fecha de comienzo	01/10/2023
Fecha de fin	31/12/2024
Nº de Expediente	MY23/ITEAM/SE/29

Descripción

Planificación y el progreso del desarrollo del laboratorio de comunicaciones inmersivas durante los dos años del proyecto (2022 y 2023), enfocado en la descripción de la red 5G Open RAN basada en SDR. Además, se incluye una descripción detallada del estado final del laboratorio, abarcando los equipos instalados, las pruebas realizadas y las conclusiones alcanzadas, contribuyendo así a la descripción final de la red 5G Open RAN basada en SDR.

Criterio de aceptación

El documento debe describir el estado del despliegue de la infraestructura Open RAN basada en SDR, incluyendo detalles sobre la arquitectura, interfaces de red, interconexión entre componentes (gNB, RIC, 5G core y SMO), y las pruebas preliminares. Además, debe incluir el plan de trabajo incluyendo arquitecturas empleadas, estudios de optimización, así como conclusiones, recomendaciones obtenidas y futuras líneas de investigación en el ámbito de redes SDR basadas en Open RAN de bajo coste.

Versiones y contribuciones

Contribuyentes

Partner	Autores
Vodafone España, S.A.U.	Irene Velasco Nogales
Vodafone España, S.A.U.	Miguel Ángel Flores Trueba
Vodafone España, S.A.U.	Juan Manuel Canabal Muñoz
Vodafone España, S.A.U.	Ricardo López Esteve

Revisores

Revisor	Partner
Jaime Sánchez Roldán	UPV

Abreviaturas

5G-ROSE	5G Broadcast Software defined radio Experiment
AI/ML	Artificial Intelligence/Machine Learning
BBU	Base-Band Unit
COTS	Commercial Off-The-Shelf
C-SON	Centralized SON
CU	Control Unit
DAFO	Debilidades, Amenazas, Fortalezas y Oportunidades
D-SON	Distributed SON
DSP	Digital Signal Processor
DU	Digital Unit
EMS	Element Management System
ENISA	Agencia de la Unión Europea para la Ciberseguridad
ETSI	Asociación Europea de Normalización. European Telecommunications Standards Institute
FCAPS	Fault, Configuration, Accounting, Performance, Security
FFT	Fast Fourier Transform
FH	Fronthaul
FPGA	Field Programmable Gate Array
GPP	General Purpose Processor
GSMA	Global System for Mobile Communications Association
ICMP	Protocolo de mensajes de control de Internet
IEEE	Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos
NBI	Northbound Interface
NESAS	Network Equipment Security Assurance Scheme
NF	Network Function
OAI	OpenAirInterface
ONAP	Open Network Automation Platform
ONF	Open Networking Foundation
ORCA	Orchestration and Reconfiguration Control Architecture
OSC	O-RAN Software Community
OSM	Open-Source Management and Orchestration
OTIC	Open Test and Integration Center
PAR4CR	Partnership for the Development of Cognitive Radio
RAN	Radio Access Network

rApp	Aplicación remota
RIC	RAN Intelligence Controller
RTP	Real Time Transport Protocol
RTT	Round-Trip delay Time
RU	Radio Unit
SCREEN	Space Cognitive Radio for Electromagnetic Environment maNagement
SDR	Software Defined Radio
SD-RAN	Software-Defined RAN
SMO	Service Management Orchestrator
SoC	System on Chip
SON	Self Organized Network
SRS	Software Radio Systems
SSD	Solid State Device
TCO	Total Cost of Ownership
BER	Bit Error Rate
vRAN	virtual Radio Access Network
WG	Working Group
xApp	Aplicación extendida

Resumen ejecutivo

El proyecto AVANZANDO-5G-INMERSIVO-TELEPRESENCIA, conocido por su acrónimo ADV5G-IMM-SDR, tiene como objetivo principal la implementación de una red 5G Open RAN basada en SDR (Software Defined Radio) y la evaluación de sus capacidades y rendimiento, pues se pretende mejorar las capacidades del laboratorio inmersivo 5G mediante el desarrollo y optimización de una infraestructura de red 5G flexible y rentable que pueda soportar aplicaciones inmersivas y proporcionar información valiosa sobre el rendimiento y las capacidades de las femtoceldas basadas en SDR. Este proyecto se ha desarrollado en colaboración entre Vodafone y el iTeam, y se ha llevado a cabo en dos años.

- Año 1: Progreso del laboratorio inmersivo (Entregable D3.1) [1]

Durante el primer año del proyecto, se detalla la arquitectura, interfaces de conexión y principales componentes (RU, DU, CU, RIC y SMO), así como los distintos usos de las femtoceldas en entornos indoor. Además, se evalúa la facilidad de instalación y operación de las femtoceldas con plataformas *open source* como srsRAN y OAI para la configuración de CU y DU; FlexRIC y SD-RAN para la interconexión con el RIC; y ONAP y OSM para la integración del SMO. También se aborda la configuración de las femtoceldas, pruebas y medición de KPIs para evaluar el rendimiento, caracterizar y optimizar una red privada Open RAN basada en SDR. Finalmente, se incluye el plan de trabajo para evolucionar la infraestructura en los años siguientes y los planes de pruebas y optimizaciones a ejecutar en la siguiente anualidad.

- Año 2: Progreso del laboratorio inmersivo (entregable D3.2) [2] e informe final sobre el estado del laboratorio inmersivo y ensayos realizados (entregable D3.3) [3]

En el segundo año, se llevan a cabo pruebas para reproducir hasta cuatro configuraciones diferentes de arquitectura utilizando femtoceldas. La entrega de equipos sin configuración de *software* de código abierto preinstalada se abordó evaluando plataformas como srsRAN y OpenAirInterface (OAI) para la parte de acceso radio y Open5Gs y 5GCN para el núcleo de red. Finalmente, srsRAN fue elegido para la implementación del acceso radio debido a su facilidad de uso y

mejor documentación comparado con OAI. Open5Gs se seleccionó para el núcleo de red por motivos similares.

Se extraen conclusiones y recomendaciones derivadas de dichas pruebas de interoperabilidad. Entre las principales conclusiones destacan problemas de capacidad de cómputo y falta de memoria de almacenamiento con las Raspberry Pi, y problemas de compatibilidad al confrontar diferentes combinaciones de *hardware* y *software*, especialmente con el SDR Lime-XTRX y la compilación de Open5Gs. Así mismo se recomienda optimizar las configuraciones del *software* para futuras implementaciones una vez resueltas las limitaciones de cómputo y memoria.

En el informe final se detalla la arquitectura completa de la infraestructura Open RAN basada en SDR. Se prosigue con la evaluación de dos arquitecturas adicionales a las del entregable D3.2 [2]. Por un lado, la femtocelda "network in a box" basada en Raspberry Pi CM4 y LimeSDR con *software* de Amarisoft, y por otro lado, una red privada 5G SA utilizando un PC con procesador x86 y SDR USRP B2101. En ambas configuraciones se realizan pruebas de conectividad, tasa de datos, latencia y cobertura que permitieron caracterizar y comprender el comportamiento de las femtoceldas y sus capacidades reales. Se identificaron limitaciones en la capacidad de usuarios concurrentes y en la estabilidad de la conexión bajo ciertas configuraciones.

Por último, en cuanto a futuras líneas de trabajo, se recomienda mejorar la capacidad de computación y memoria de los dispositivos, así como optimizar el *software* para hacer un uso más eficiente del *hardware*, aunque previamente se sugiere realizar un estudio exhaustivo de las capacidades requeridas, considerando el número de usuarios, los servicios a soportar, el ancho de banda, las funcionalidades, etc. Este estudio de demanda permitirá adaptar la evolución de los sistemas y dotarlos de la potencia necesaria, manteniendo al mismo tiempo su bajo coste objetivo y el reuso de plataformas comerciales. Además, se recomienda mejorar los sistemas de antenas para aumentar la cobertura y calidad de señal, y explorar la interoperabilidad con plataformas *open source* de RIC.

En resumen, el proyecto ha permitido desarrollar y optimizar una infraestructura de red 5G flexible y rentable, capaz de soportar aplicaciones inmersivas y proporcionar información valiosa sobre el rendimiento y las capacidades de las femtoceldas basadas en SDR, sentado las bases para futuras investigaciones y desarrollos en este campo.

Índice de contenidos

1. Introducción	12
2. Tecnologías habilitantes	12
3. Equipamiento suministrado	14
4. Plan de trabajo	14
5. Soluciones Open Source integradas	16
6. Arquitecturas integradas	19
1.1. 6.1 Caracterización del servicio de la femtocelda “network in a box” con <i>software</i> de Amarisoft	0
1.2. 6.2 Caracterización del servicio de SDR USRP B210 sobre PC	1
7. Limitaciones y recomendaciones	5
8. Conclusiones	7
9. Líneas de trabajo futuras	7
7. Relación a los objetivos	10
10. Referencias y noticias	11
11. Anexos	12

Índice de figuras

Ilustración 1: Esquema de los distintos entregables con sus títulos, fechas de entrega y principales contenidos.....	15
Ilustración 2: Configuración de 10 MHz en la banda n38 (TDD, 2589.85 MHz) para pruebas de cobertura	1
Ilustración 3: Puntos de medida para pruebas de cobertura en las instalaciones del laboratorio del iTeam	1
Ilustración 4: Puntos de medida para pruebas de cobertura en las instalaciones del laboratorio del iTeam	4

Índice de tablas

Tabla 1: Resumen Arquitecturas integradas:.....	1
Tabla 2: Caracterización del servicio de la femtocelda “network in a box”	0
Tabla 3: Caracterización del servicio de bajada de SDR USRP B210 sobre PC	2
Tabla 4: Caracterización del servicio de subida de SDR USRP B210 sobre PC	3
Tabla 5: Pruebas latencia de SDR USRP B210 sobre PC	4
Tabla 6: Caracterización del servicio de SDR USRP B210 sobre PC en distintos puntos del laboratorio del iTeam	5

1. Introducción

El presente documento constituye el resumen del Laboratorio Inmersivo y los ensayos realizados en el marco del proyecto AVANZANDO-5G-INMERSIVO-TELEPRESENCIA. Este proyecto, conocido por su acrónimo ADV5G-IMM-SDR, tiene como objetivo principal la implementación de una red 5G Open RAN basada en SDR (*Software Defined Radio*) y la evaluación de sus capacidades y rendimiento. Este proyecto implica la adopción de equipos de radio definidos por *software* (SDR), la integración con plataformas informáticas de bajo coste y el uso de *software* de código abierto. El objetivo general es desarrollar y optimizar una infraestructura de red 5G flexible y rentable que pueda soportar aplicaciones inmersivas y proporcionar información valiosa sobre el rendimiento y las capacidades de las femtoceldas basadas en SDR.

Los objetivos específicos de este documento son:

- Presentar una arquitectura Open RAN basada en SDR para redes privadas 5G y describir los diferentes componentes de la arquitectura propuesta, partiendo de una exhaustiva revisión bibliográfica y de la experiencia de los autores en el diseño, implementación, mantenimiento, gestión y optimización de redes móviles, Open RAN y SDR.
- Analizar el funcionamiento de las distintas arquitecturas propuestas. Para ello, se detalla el plan de trabajo para la implementación de las arquitecturas propuestas.
- Detallar los estudios, las medidas y las optimizaciones realizadas, tanto a nivel de red como a nivel radio, que están ligadas al plan de trabajo realizado.
- Exponer las distintas pruebas realizadas para tratar de caracterizar y de entender el comportamiento de las femtoceldas y las capacidades reales de las mismas, así como las limitaciones encontradas.
- Trazar las futuras líneas de trabajo que se desprenden principalmente de las necesidades de mejora detectadas, que redujeron la plena consecución del plan de trabajo inicialmente previsto.

2. Tecnologías habilitantes

El uso de femtoceldas 5G de interior de bajo consumo basadas en SDR, junto con la integración de plataformas informáticas de bajo coste y *software* de código abierto, ofrece una solución flexible, escalable y rentable para mejorar las capacidades de las redes 5G en entornos privados. Por tanto, como tecnologías habilitantes del presente proyecto destacan tres principales:

1. La tecnología SDR permite que ciertos parámetros de una radio, como la frecuencia de transmisión y recepción, la potencia de transmisión, el ancho de banda y la modulación, sean controlados por *software*. Esto proporciona una gran flexibilidad y capacidad de reconfiguración dinámica, permitiendo agregar nuevas funciones sin necesidad de nuevo *hardware*. Los avances en procesadores digitales de señales (DSP, FPGA, GPP, SoC) han permitido crear radios SDR más potentes y eficientes en consumo de energía. Las principales aplicaciones de SDR incluyen defensa, radioafición, investigación, industria y entretenimiento. Las ventajas de SDR incluyen portabilidad, flexibilidad, compatibilidad, asequibilidad y eficiencia, aunque también presenta desafíos como la complejidad y la seguridad.
2. Las redes privadas 5G basadas en SDR ofrecen una flexibilidad y escalabilidad inigualables en comparación con las soluciones tradicionales. Estas redes permiten la reconfiguración dinámica de frecuencias y protocolos, adaptándose eficientemente a las necesidades específicas de entornos privados. Las femtoceldas 5G basadas en SDR son más asequibles y requieren menos especialización para su instalación y mantenimiento. Ofrecen ventajas como coste reducido, flexibilidad, escalabilidad, cobertura mejorada, mejora de capacidad, portabilidad y mayor seguridad en entornos industriales o sanitarios. Estas femtoceldas pueden ser utilizadas como parte de una red privada dedicada, como extensión de una MPN más grande o conectadas a la red pública.
3. Las redes Open RAN permiten a los operadores reducir costes mediante el uso de *hardware* y *software* de diferentes proveedores, mejorando la compatibilidad y diversificación de la cadena de suministro. Open RAN facilita la innovación y personalización de las redes, permitiendo a los operadores elegir los componentes que mejor se adapten a sus necesidades. La arquitectura Open RAN se basa en interfaces abiertas y la desagregación de funciones, lo que permite una mayor flexibilidad y eficiencia operativa. La adopción de Open RAN está impulsada por la necesidad de reducir costes, mejorar el rendimiento y acelerar la innovación en las redes móviles.

3. Equipamiento suministrado

Se entregaron tres femto radios sin configuración de fábrica, es decir, con firmware stack L1 básico cargado y listas para implementar *software open source* compatible. Así mismo, se entregó *software* de interfaz de usuario para la configuración de las unidades y manual de instalación y configuración.

El objetivo de la entrega sin una configuración de *software open source* preinstalada es evaluar la mayor o menor facilidad de instalación y operación de las femtoceldas con cada plataforma de *open source*, así como valorar la capacidad para gestionar y configurar de forma flexible las femtoceldas SDR, implementado las distintas opciones de arquitectura y su interoperabilidad y conexión con otras redes, sistemas o plataformas de terceros.

Así mismo, también se suministraron dos terminales Samsung S23 configurables en modo ingeniería, necesarios para las pruebas de testeo, y un servidor Dell PowerEdge R750xs para albergar las configuraciones necesarias.

Para más detalles sobre especificaciones técnicas del material entregado, consultad el capítulo 3 del entregable ADV5G-IMM-SDR D3.1: Progreso del Laboratorio Inmersivo, Año 1. [1]

Por último, debido a las limitaciones computacionales encontradas durante la implementación de la arquitectura "network in a box" con *software open source*, es importante mencionar que Vodafone prestó una femtocelda "network in a box" idéntica a las tres suministradas para el laboratorio inmersivo en términos de *hardware*. La diferencia radica en el *software*, ya que Amarisoft proporciona la pila de *software* 5G tanto para la RAN (Radio Access Network) como para el Core. Este *software* se ejecuta en el Raspberry Pi, permitiendo la funcionalidad completa de una estación base 5G. Sin lugar a dudas, en el desarrollo de la femtocelda de Vodafone, Lime/Amarisoft realizaron una labor significativa de simplificación del código para abordar los desafíos evidenciados en el entregable D.3.2, especialmente en lo que respecta a la capacidad de almacenamiento y la optimización del *software*.

4. Plan de trabajo

La siguiente figura muestra un esquema de los distintos entregables con sus títulos, fechas de entrega y principales contenidos. Los entregables de color azul son de tipo documento, y los de color verde son de tipo prototipo.

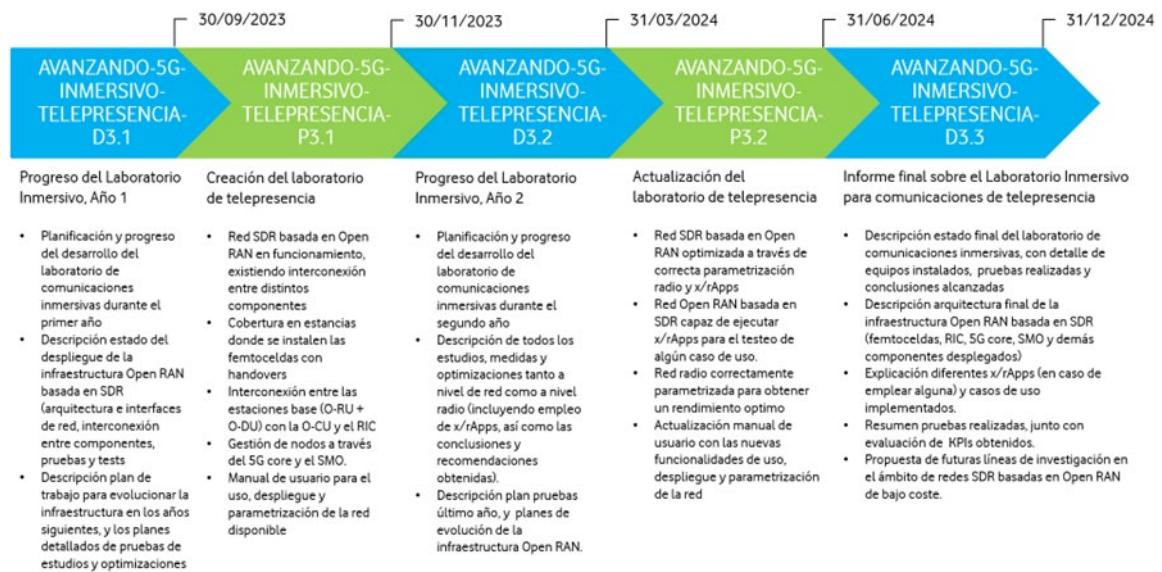


Ilustración 1: Esquema de los distintos entregables con sus títulos, fechas de entrega y principales contenidos

Del plan de trabajo arriba representado, destacamos como principales actividades para el primer año:

- Diseño e implementación de estaciones base 5G indoor: Utilización de equipos SDR y computación de bajo coste.
- Configuración de la femtocelda con *software open source*: Evaluación de plataformas como srsRAN y OpenAirInterface (OAI).
- Implementación de arquitecturas: Network in a box, híbrida y distribuida (D-RAN).
- Pruebas de rendimiento: Evaluación de KPIs como cobertura, calidad de señal, capacidad y rendimiento.
- Estudio de interoperabilidad: Integración con distintas plataformas *open source* de RIC. Este punto queda pendiente por las dificultades principalmente de memoria y computación encontradas.

Para el segundo año destacamos como principales actividades realizadas:

- Descripción de estudios, medidas y optimizaciones: Evaluación de configuraciones y pruebas pendientes. En el entregable D.3.2 se especificó que no se pudieron emplear xApps y/o rApps debido a la limitada capacidad de cómputo de la Raspberry Pi, lo que impidió conectar los prototipos de femtoceldas a un RIC. Por tanto, la actividad se enfocó en caracterizar y comprender el comportamiento de las

femtoceldas y sus capacidades reales mediante diversas pruebas. En el entregable D.3.2 quedaron pendientes configuraciones y pruebas debido a los problemas detallados en los capítulos 3 y 4 del documento D.3.2. En el entregable D.3.3 se abordan las tareas pendientes como las pruebas del SDR de Lime XTRX de forma aislada para evaluar sus capacidades, las pruebas de la femtocelda "network in a box" proporcionada por Vodafone con *software* Amarisoft, y las pruebas del SDR USRP B210 conectado a PC.

- Uso de IA para la gestión de la RAN: Definición y prueba de casos de uso basados en x/rApps. Este aspecto no se ha completado debido a las limitaciones encontradas en términos de memoria y capacidad de computación.
- Optimización de la red SDR basada en Open RAN: Parametrización radio y x/rApps. La finalización de este punto se ha visto afectada principalmente por problemas relacionados con la memoria y la computación de las femtoceldas.
- Actualización de equipamiento: Evaluación de nuevas versiones de sistemas y plataformas de computación. Finalmente, este apartado no se llevó a cabo porque durante la duración del proyecto no se completó el desarrollo comercial de la plataforma basada en Raspberry Pi CM5.

5. Soluciones Open Source integradas

El uso de *software open source* en el proyecto ADV5G-IMM-SDR se fundamenta en varias razones clave. En primer lugar, el *software open source* ofrece una gran flexibilidad y adaptabilidad, permitiendo a los desarrolladores modificar y personalizar el código según las necesidades específicas del proyecto. Además, el uso de soluciones *open source* reduce significativamente los costes asociados a licencias de software propietario, lo que es especialmente importante en proyectos de investigación y desarrollo con presupuestos limitados. Por último, el *software open source* fomenta la colaboración y el intercambio de conocimientos dentro de la comunidad, lo que puede acelerar el desarrollo y la implementación de nuevas tecnologías.

Durante el desarrollo del proyecto, se evaluaron varias combinaciones de *software open source* para la implementación de la red 5G Open RAN basada en SDR. Las principales plataformas consideradas fueron:

1. srsRAN y OpenAirInterface (OAI) para la parte de acceso radio (CU y DU).
2. Open5Gs y 5GCN para el núcleo de red.
3. FlexRIC y SD-RAN para la configuración e interconexión con el RIC.

4. ONAP y OSM para la integración del SMO.

En el marco del proyecto ADV5G-IMM-SDR, se plantearon tres opciones de arquitectura para la implementación de una red 5G Open RAN basada en SDR. Estas arquitecturas fueron evaluadas en términos de su viabilidad, rendimiento y capacidad de integración con soluciones de *software open source*. A continuación, se describen las tres opciones de arquitectura planteadas:

1. Arquitectura integrada o "*Network in a Box*"

La primera opción de arquitectura es la denominada "Network in a Box". En esta configuración, todos los componentes de la red, incluyendo la unidad de radio (RU), la unidad distribuida (DU) y la unidad central (CU), están integrados en un único dispositivo. Esta arquitectura se caracteriza por su simplicidad y facilidad de despliegue, ya que todos los elementos necesarios para el funcionamiento de la red están contenidos en una sola unidad. Sin embargo, esta configuración puede presentar limitaciones en términos de capacidad de cómputo y memoria, especialmente cuando se utilizan dispositivos de prestaciones limitadas como la Raspberry Pi.

2. Arquitectura híbrida

La segunda opción de arquitectura es la denominada "arquitectura híbrida". En esta configuración, la RU y la DU se encuentran distribuidas, mientras que las CUs están centralizadas, al igual que el núcleo de la red (*core*). Esta arquitectura ofrece un equilibrio entre la simplicidad de la "Network in a Box" y la flexibilidad de una arquitectura distribuida. La distribución de la RU y la DU permite una mayor escalabilidad y flexibilidad en el despliegue de la red, mientras que la centralización de las CUs y el core facilita la gestión y el control de la red.

3. Arquitectura distribuida o D-RAN

La tercera opción de arquitectura es la denominada "arquitectura distribuida" o D-RAN. En esta configuración, todos los elementos de la red de acceso radio (RU, DU y CU) están distribuidos, mientras que el núcleo de la red (*core*) permanece centralizado. Esta arquitectura ofrece la mayor flexibilidad y escalabilidad, ya que permite distribuir los

componentes de la red de manera más eficiente y adaptarse a las necesidades específicas de cada entorno. Sin embargo, esta configuración también puede presentar desafíos en términos de gestión y coordinación de los diferentes elementos distribuidos .

Para las opciones *open source* implicadas, se barajaron hasta tres combinaciones para la implementación de las arquitecturas arriba mencionadas:

1. srsRAN (gNB) junto con Open5Gs.
2. OAI (gNB junto con 5GCN).
3. OAI (gNB) junto con Open5Gs.

Cada una de estas combinaciones fue evaluada en términos de facilidad de uso, documentación, compatibilidad con el *hardware* disponible y rendimiento en pruebas preliminares. Para mayor detalle consultar el entregable D3.2 [2].

Finalmente, se optó por la primera combinación, eligiendo srsRAN para la parte de acceso radio y Open5Gs para el núcleo de red. Las razones detrás de esta elección son las siguientes:

- srsRAN para la parte de acceso radio:
 - Facilidad de uso: srsRAN demostró ser más fácil de instalar y configurar en comparación con OAI. La interfaz de usuario y la documentación de srsRAN fueron más accesibles y comprensibles, lo que facilitó su implementación en el laboratorio.
 - Documentación: La documentación de srsRAN es más completa y detallada, lo que permitió resolver problemas y realizar configuraciones avanzadas de manera más eficiente.
 - Compatibilidad: srsRAN mostró una mejor compatibilidad con el *hardware* disponible, incluyendo las femtoceldas y los dispositivos SDR utilizados en el proyecto.
- Open5Gs para el núcleo de red:

- **Facilidad de uso:** Al igual que srsRAN, Open5Gs fue más fácil de instalar y configurar en comparación con 5GCN. La interfaz de usuario y la documentación de Open5Gs facilitaron su implementación y operación.
- **Documentación:** Open5Gs cuenta con una documentación extensa y bien estructurada, lo que permitió una integración más fluida con otros componentes de la red.
- **Rendimiento:** En las pruebas preliminares, Open5Gs mostró un rendimiento superior en términos de estabilidad y capacidad de gestión de usuarios concurrentes.

6. Arquitecturas integradas

En este apartado se resumen mediante una tabla todas las pruebas de las arquitecturas testadas. La tabla recoge todas las etapas de cada una de las pruebas, describe brevemente las pruebas realizadas, si el resultado fue exitoso o no, qué problemas hubo y qué alternativas se buscaron, y si las alternativas fueron exitosas o no, indicando problemas sufridos. Por tratarse de un resumen consideramos que este tipo de formato condensa el trabajo realizado, no obstante, para cualquier aclaración o mayor detalle se puede consultar el capítulo 3 del entregable D.3.2.

Arquitectura	Etapas	Descripción	Pruebas Realizadas	Resultado	Problemas Encontrados	Alternativas Intentadas	Resultado de Alternativas
Integración Open5GS y srsRAN en femtocelda. Arquitectura "network in a box" en etapa 1 y arquitectura distribuida en el resto de etapas	Etapa 1	Configuración inicial	Compilación de srsRAN y Open5GS en Raspberry Pi CM4	Parcialmente exitoso	Incompatibilidad de MongoDB con CPU ARMv8.0-A. Open5GS no compatible con Raspberry Pi CM4 (ARMv8.0-A)	Uso de imagen Docker compatible con ARM y migración a arquitectura D-RAN	Parcialmente exitoso (migración a arquitectura D-RAN). Problemas de almacenamiento en Raspberry
	Etapa 2	Pruebas alternativas para compatibilidad del gNB-SDR	Pruebas con parche OpenUSRP - Pruebas con API SoapySDR	Fallido	Parche OpenUSRP desactualizado - API SoapySDR no reconoce LimeXTRX. gNB no se comunica con SDR LimeXTRX	Ajustes manuales en el código del parche - Uso de SoapyUHD	Ninguna solución funcionó debido a falta de soporte actualizado
	Etapa 3	Femtocelda con versión alternativa de srsRAN	Uso de versión alternativa de srsRAN compatible con LimeXTRX	Fallido	La transmisión se detiene tras 1 segundo. Transmisión intermitente	Uso de una versión modificada de srsRAN	No funcional en Raspberry Pi 4
Integración Raspberry Pi CM4 con USRP B210 y srsRAN gNB. Arquitectura distribuida	Etapa 4	Integración de femtocelda con USRP B210	Configuración y conexión del USRP B210 - Intento de transmisión	Fallido	Fallos en capa RF, errores de transmisión.	Evaluación de ancho de banda con USB 2.0, pues es insuficiente para manejar flujo de datos. Se pasa a Etapa 5	
Integración con otra Raspberry Pi CM4 con USRP B210 y srsRAN gNB. Arquitectura distribuida	Etapa 5	Pruebas con Raspberry Pi 4 y USB 3.0	Configuración y pruebas iniciales - Pruebas de rendimiento y carga	Parcialmente exitoso	Mensajes de 'underflow' (procesamiento insuficiente). Insuficiencia de recursos de procesamiento	Optimización de configuración y frecuencia del reloj	Parcialmente exitoso. Reducción parcial de errores, pero sigue sin funcionar en tiempo real por problemas de "underflow" persistentes
	Etapa 6	Pruebas con usuario final (UE)	Conexión del UE - Verificación de conectividad	Fallido	Problemas de conectividad y "underflow". A veces UE conectado pero sin acceso a internet	Uso de ordenador portátil en lugar de Raspberry Pi 4	Exitoso. En PC ejecutó gNB correctamente
	Etapa 7	Pruebas con terminal instrumental (QualiPoc) para comprobar si existe un problema de capacidad de computación o mensajes de capa 3 malformados	Test configuración n40 TDD con 10 MHz de ancho de banda y n20 FDD con 5 MHz de ancho de banda	Fallido	Conexión RRC inestable, errores en capa física. Problemas de sincronismo y desalineamiento	Comparación con red privada. Cuando el mismo UE se conecta a la red privada del iTeam no hay problemas ni en el establecimiento de la conexión RRC, ni desconexiones repentinas de la misma. Problema capacidad cómputo CM4.	Fallos solo ocurrían en Raspberry Pi 4
Uso del SDR Lime-XTRX con equipo externo	Etapa 8	Uso del SDR Lime XTRX de manera aislada para ver posibilidades de configuración de manera aislada tras evidenciar que la capacidad de computación de la Raspberry Pi CM4 embebida es insuficiente para mantener funcional el gNB, además de los problemas de interoperabilidad entre la API LimeSuite y srsRAN	Conexión del SDR a equipo de computación externo	Fallido	El dispositivo no respondía con adaptador SATA-mini PCIE		Parcialmente exitoso (migración a arquitectura D-RAN). Problemas de almacenamiento en Raspberry

Tabla 1: Resumen Arquitecturas integradas:

Además, dentro de las arquitecturas probadas, en el entregable D.3.3 [3] se abordaron dos arquitecturas adicionales. Por un lado, la femtocelda “network in a box”, un dispositivo exactamente igual que las tres femtoceldas entregadas en noviembre de 2023, con la salvedad de que la parte software está integrada y optimizada, tanto en la parte RAN como en el Core por Vodafone, Amarisoft/Lime. Y por otro lado, se realizaron pruebas con un PC conectado a un USRP B210 usando srsRAN y Open5Gs para generar la red.

1.1. 6.1 Caracterización del servicio de la femtocelda “network in a box” con *software* de Amarisoft

La arquitectura de la femtocelda “network in a box” está basada en la combinación sobre una misma placa del *hardware* Raspberry Pi CM4 y LimeSDR. En este sentido, desde el punto de vista *hardware* es un dispositivo exactamente igual que los tres suministrados para el laboratorio inmersivo. La principal diferencia radica en el *software*, ya que Amarisoft proporciona la pila de *software* 5G, tanto para la RAN (Radio Access Network) como para el Core. Este *software* se ejecuta en el Raspberry Pi, permitiendo la funcionalidad completa de una estación base 5G. Sin lugar a duda, en el desarrollo de la femtocelda de Vodafone, Lime/Amarisoft hicieron una labor de simplificación del código importante para hacer frente a los desafíos evidenciados en el entregable D.3.2 [2], especialmente alrededor de la capacidad de almacenamiento y la optimización del *software*.

La metodología consistió en realizar diversas **pruebas de conectividad, tasa de datos, latencia y cobertura**. Estas pruebas se realizaron variando la configuración de la transmisión de la femtocelda y se muestran en la siguiente tabla a modo de resumen:

Banda	BW (MHz)	Núm. UEs	Patrón TDD	DL Throughput (Mbps)	UL Throughput (Mbps)	RTT media (ms)
7	5	1	3, 6D2U	13.7	1.5	51
38	10	1	3, 6D2U	32	5	40
38	10	2	3, 6D2U	UE1: 17 UE2: 9	UE1: 2-3 UE2: 2-3	UE1: 46 UE2: 39
38	15	1	3, 6D2U	Sin conexión		
38	10	1	1, 7D2U	35	2	39

Tabla 2: Caracterización del servicio de la femtocelda “network in a box”

Para las **pruebas de cobertura**, se utilizó una configuración de 10 MHz en la banda n38 (TDD, 2589.85 MHz). En la imagen se muestran los ocho puntos de

medida, así como las medidas registradas. La distancia entre los puntos de medida y la femtocelda varía entre los 3.5 metros y los 22.6 metros.



Ilustración 2: Configuración de 10 MHz en la banda n38 (TDD, 2589.85 MHz) para pruebas de cobertura

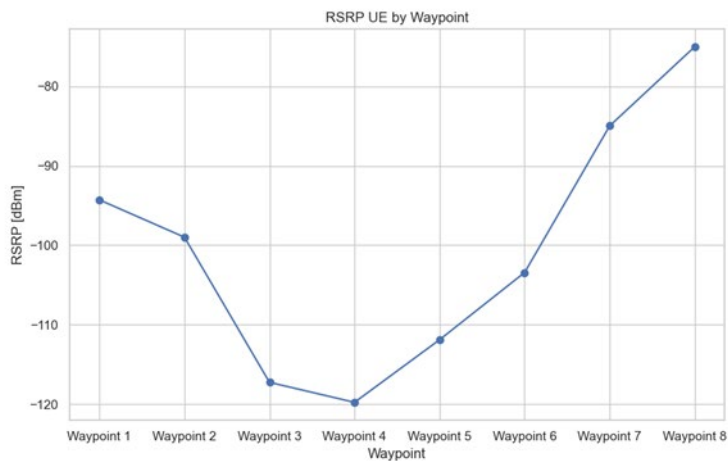


Ilustración 3: Puntos de medida para pruebas de cobertura en las instalaciones del laboratorio del iTeam

En general, se observa como la potencia recibida dentro del laboratorio donde se encuentra la femtocelda es buena mientras hay línea de vista, y al salir de la sala esta potencia de señal es mucho menor en puntos NLOS.

Para mayor detalle, se recomienda consultar el capítulo 3.1 del entregable D.3.3 [3].

1.2. 6.2 Caracterización del servicio de SDR USRP B210 sobre PC

Ante la imposibilidad de probar el SDR de Lime XTRX de manera aislada debido a que el dispositivo no respondía con adaptador SATA-mini PCIE, se

planteó como alternativa utilizar un SDR USRP B210 conectado a un ordenador PC x86. Para el despliegue de la red privada 5G SA completa se utilizó el gNB de srsRAN para la red de acceso radio, el núcleo de red de Open5GS, y el dispositivo USRP B210 como equipo de RF.

El **ajuste de la ganancia del USRP** fue el primer paso realizado para maximizar el rendimiento de la red. Se llevaron a cabo diversas pruebas para encontrar el valor óptimo de ganancia que finalmente fue 80 dB. Para más detalles, se puede consultar el apartado 3.2.1 del entregable D 3.3.

A continuación, se realizaron **medidas de velocidad** para distintas combinaciones de ancho de banda, modulación y patrón TDD, que se recopilan en la siguiente tabla que muestra la velocidad de descarga media medida para distintas configuraciones y su comparación con la velocidad de descarga máxima teórica:

Ancho de banda (MHz)	Modulación	MIMO	Patrón TDD	Tasa datos bajada medida (Mbps)	Tasa de datos teórica (Mbps)	Porcentaje sobre el máximo teórico
10	64QAM	1x1	6D 1S 3U	18.30	29.054	62.98%
10	256QAM	1x1	6D 1S 3U	25.1	38.73	64.81%
10	256QAM	2x2	6D 1S 3U	49.6	77.46	64.03%
10	256QAM	2x2	7D 1S 2U	56.87	80.713	70.46%
20	256QAM	1x1	7D 1S 2U	61.6	85.757	71.8%
20	256QAM	2x2	7D 1S 2U	120.7	171.515	70.37%
30	256QAM	1x1	7D 1S 2U	92.61	131.158	70.61%
30	256QAM	2x2	7D 1S 2U	74	262.316	28.21%
40	256QAM	1x1	7D 1S 2U	107.91	178.241	60.54%
50	256QAM	1x1	7D 1S 2U	78.0875	223.641	34.91%

Tabla 3: Caracterización del servicio de bajada de SDR USRP B210 sobre PC

La velocidad de descarga alcanza entre el 60% y el 70% del máximo teórico en la mayoría de las configuraciones evaluadas. Sin embargo, este porcentaje disminuye significativamente cuando el gNB gestiona un gran flujo de datos. Las configuraciones de 50 MHz y 30 MHz 2x2 muestran irregularidades notables y valores inferiores a los esperados. Esta degradación se debe, entre otros factores, a las limitaciones del ordenador utilizado, que no tiene la potencia necesaria para procesar grandes volúmenes de información.

Se evaluó la modificación del patrón de TDD para maximizar la velocidad de subida en diferentes configuraciones de ancho de banda, pero los resultados

no fueron satisfactorios. Las tasas de datos de subida para un ancho de banda de 20 MHz están cercanas al valor teórico. Sin embargo, al aumentar el ancho de banda y el porcentaje de intervalos de tiempo dedicados al enlace ascendente, las prestaciones disminuyen significativamente debido al elevado coste computacional. El valor máximo de tasa de subida registrado fue cercano a los 56 Mbps.

Ancho de banda (MHz)	MIMO	Patrón TDD	Tasa datos subida medida (Mbps)	Tasa datos teórica (Mbps)	Porcentaje sobre el máximo teórico
20	1x1	5D 1S 4U	31,2	38.531	80.97%
20	1x1	2D 1S 7U	55,98	64.802	86.39%
30	1x1	5D 1S 4U	51.3	58.930	87.05%
30	1x1	2D 1S 7U	55.9	99.109	56.4%
40	1x1	5D 1S 4U	31,08	80.084	38.81%
40	1x1	2D 1S 7U	41.37	134.687	30.71%
50	1x1	5D 1S 4U	23.6	100.483	23.48%
50	1x1	2D 1S 7U	16.8	168.994	9.94%

Tabla 4: Caracterización del servicio de subida de SDR USRP B210 sobre PC

Para evaluar la **capacidad y estabilidad de la red**, se utilizó una configuración de 20 MHz y MIMO 2x2, conectando tres dispositivos móviles. Se monitorizó la tasa de datos y las desconexiones durante un periodo extenso. Dos dispositivos usaron iPerf3 para generar un tráfico constante de 140 Mbps, superando su capacidad de 120 Mbps, mientras que el tercer dispositivo reprodujo un video en YouTube a 2140p y 60 fps. Cada dispositivo tuvo una tasa de transferencia de aproximadamente 45 Mbps, asegurando un reparto equitativo de recursos.

Hubo un periodo de 10 minutos en el que la tasa de datos disminuyó considerablemente, coincidiendo con fallos de underflow reportados por el gNB debido al alto coste computacional de procesar tantos datos.

Asimismo, se realizaron **pruebas de latencia** contra dos direcciones IP de destino: la dirección IP del servidor DNS de Google (8.8.8.8) y la dirección IP de la puerta de enlace de la red del laboratorio donde se encuentra instalado el sistema (172.30.0.1).

Dirección IP	RTT medio (ms)	Desviación media del RTT (ms)
8.8.8.8	42.83	4.65
172.30.0.1	25.5	4.42

Tabla 5: Pruebas latencia de SDR USRP B210 sobre PC

La latencia punto a punto se mide desde el dispositivo móvil hasta la red de datos, resultando en un valor de 25,5 ms, que es sensiblemente superior a los requerimientos de las especificaciones de 5G y que podría comprometer el funcionamiento de aplicaciones sensibles al retardo.

También se realizaron **pruebas de cobertura** en las instalaciones del laboratorio del iTeam en hasta 17 puntos de medida, como se muestra en la figura:

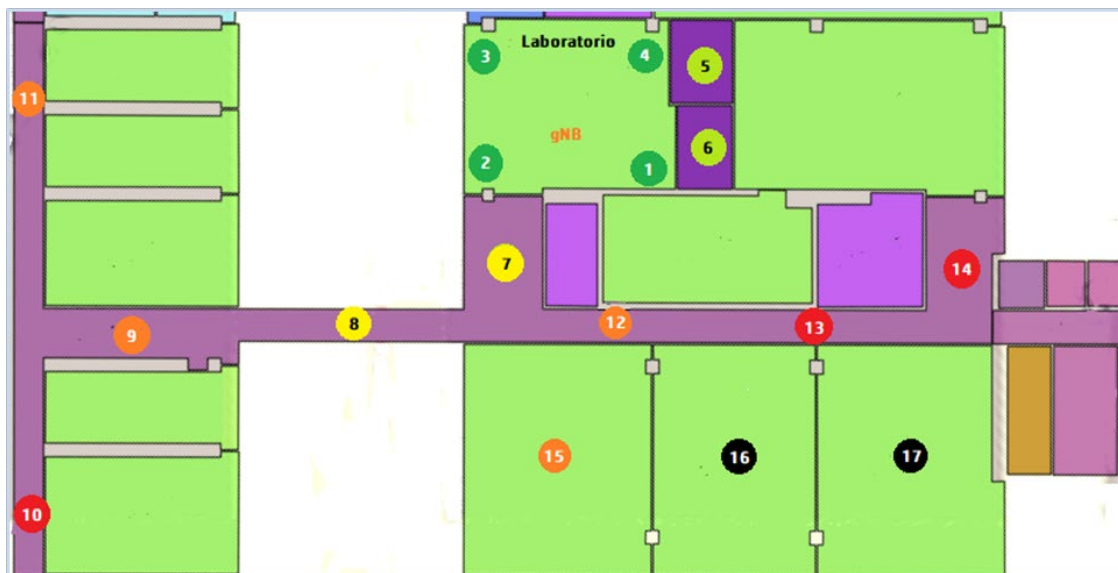


Ilustración 4: Puntos de medida para pruebas de cobertura en las instalaciones del laboratorio del iTeam

Los resultados obtenidos demostraron que este tipo de despliegue ofrece una cobertura aceptable en interiores, considerando que la cobertura de la banda n78 está intrínsecamente limitada en términos de alcance y penetración en edificios debido a las características de propagación de las altas frecuencias utilizadas.

Punto	RSRP	RSRQ	SINR	Velocidad DL (Mbps)	Velocidad UL (Mbps)	Descripción
1	-83	-11	34	120	11,4	Laboratorio, LOS

2	-88	-11	32	110,1	11,3	Laboratorio, LOS
3	-94	-11	27	104,4	11,2	Laboratorio, LOS
4	-90	-11	27	105,3	11,3	Laboratorio, LOS
5	-106	-11	18	74,6	11,4	Sala contigua cerrada, NLOS
6	-104	-11	19	75,6	11,2	Sala contigua cerrada, NLOS
7	-104	-11	17	47,5	11,3	Pasillo, NLOS
8	-109	-11	16	40,1	11,2	Pasillo, NLOS
9	-118	-12	10	22,4	10,8	Pasillo, NLOS
10	-131	-20	-4	1,08	1,31	Pasillo, NLOS
11	-120	-13	5	15,3	6,43	Pasillo, NLOS
12	-117	-12	9	19,9	7,28	Pasillo, NLOS
13	-124	-14	3	7,9	5,9	Pasillo, NLOS
14	-125	-15	2	7,2	7,5	Pasillo, NLOS
15	-119	-12	6	15,5	7,4	Sala cerrada, NLOS
16	No se ha podido establecer la conexión					Sala cerrada, NLOS
17						Sala cerrada, NLOS

Tabla 6: Caracterización del servicio de SDR USRP B210 sobre PC en distintos puntos del laboratorio del iTeam

Por último, se midió el **consumo de energía de la infraestructura de red**. En la primera prueba, la red se configuró para transmitir un ancho de banda de 20 MHz con MIMO 2x2, y en la segunda, se utilizó un ancho de banda de 30 MHz sin MIMO. Ambas pruebas mostraron consumos de batería muy similares. El consumo de potencia del gNB fue de aproximadamente 12W, independientemente de la configuración y la carga de tráfico. Para más detalles, consultar el capítulo 2.3.7 del entregable D.3.3 [3].

7. Limitaciones y recomendaciones

A continuación, se detallan todos los problemas encontrados en las arquitecturas probadas y descritas, y se proporcionan puntos de acción para solventarlos, en la medida de lo posible. Para mayor detalle, consulte el capítulo 8 del entregable D.3.1 [1] y los capítulos 4 y 5 del entregable D.3.3 [3].

1. **Potencia de cómputo de los equipos de computación.** La potencia de cómputo de la Raspberry Pi CM4 es insuficiente para tareas intensivas como el procesamiento de señales en tiempo real y la gestión de mensajería, incluso en escenarios de baja carga de tráfico. Se sugiere

- considerar el uso de hardware más potente, como la Raspberry Pi 5, y realizar un estudio para identificar y optimizar los elementos que más consumen recursos de computación.
- 2. Capacidad de almacenamiento.** La capacidad de almacenamiento de la Raspberry Pi CM4, limitada a 16GB, afecta la instalación y funcionamiento del software necesario. Se propone utilizar almacenamiento externo de mayor capacidad, como SSDs conectados vía USB, y habilitar la ranura para tarjetas microSD en la placa madre de la femtocelda. A medio plazo, se recomienda optimizar el uso de almacenamiento mediante técnicas de compresión y purga regular de datos innecesarios.
 - 3. Sistema operativo empleado y desarrollos open source disponibles.** El sistema operativo empleado en la Raspberry Pi de la femtocelda es Debian 11, aunque el más utilizado en soluciones open source es Ubuntu. Se debe aclarar si Lime continuará utilizando Debian o cambiará a Open WRT, un sistema operativo de código abierto diseñado para dispositivos embebidos.
 - 4. Compatibilidad de drivers/APIs con el software open source.** Las APIs para comunicar el SDR Lime XTRX con srsRAN deben estar bien documentadas y ser compatibles. La falta de soporte y documentación adecuada causa dificultades en la integración y operación fluida entre el gNB de srsRAN y el SDR Lime XTRX. Se recomienda que todas las versiones de la API proporcionada por el fabricante, LimeSuite, estén disponibles y correctamente documentadas.
 - 5. Compatibilidad de la base de datos utilizada por el software open source y la versión de los procesadores ARM.** La compatibilidad de la base de datos utilizada por Open5GS con los procesadores ARM es un reto. MongoDB, por ejemplo, no funciona con la CPU ARMv8.0-A de la Raspberry Pi 4. Para solucionarlo, se utilizó una versión docker de Open5GS con una imagen no oficial de MongoDB compatible. Se espera que la nueva Raspberry Pi 5, con un procesador ARM Cortex-A76, no tenga esta limitación.
 - 6. Alcance, número de usuarios y latencia.** Las pruebas de caracterización del servicio muestran que la baja potencia de emisión y las antenas compactas embebidas reducen rápidamente el alcance. Se sugiere mejorar los sistemas de antenas para aumentar la cobertura y calidad de señal en entornos indoor NLOS. Además, se recomienda optimizar la configuración de las femtoceldas para soportar un mayor número de usuarios concurrentes y optimizar la asignación de recursos para reducir la latencia.

8. Conclusiones

En el presente proyecto, hemos sido capaces de:

- Presentar una arquitectura Open RAN basada en SDR para redes privadas 5G.
- Describir en detalle los diferentes componentes de la arquitectura propuesta.
- Analizar el funcionamiento de las distintas arquitecturas propuestas.
- Proporcionar pautas para la configuración y operación de las arquitecturas propuestas.
- Caracterizar el servicio de dos ejemplos concretos, tales como la femtocelda "network in a box" con *software* de Amarisoft y un PC con procesador x86 y SDR USRP B210 y *software open source*.
- Identificar las principales limitaciones y señalar mejoras a desarrollar en un futuro.
- Trazar líneas de trabajo futuras.

En resumen, el proyecto ha permitido desarrollar y optimizar una infraestructura de red 5G flexible y rentable, capaz de soportar aplicaciones inmersivas y proporcionar información valiosa sobre el rendimiento y las capacidades de las femtoceldas basadas en SDR, sentado las bases para futuras investigaciones y desarrollos en este campo.

9. Líneas de trabajo futuras

Por un lado, en el ámbito de las estaciones base 5G indoor de baja potencia, conocidas como femtoceldas, la adopción de equipos SDR, la integración con plataformas de computación de bajo coste y el uso de *software* de código abierto están experimentando un rápido crecimiento en cuanto a prestaciones y servicios implementados gracias a la gran comunidad de desarrolladores y usuarios que colaboran en la actualización y mejora de éstas. Su aplicación práctica resulta tremendamente atractiva pues dichas redes pueden ser desplegadas en una gran variedad de entornos prácticos. Por ejemplo, pueden ser utilizadas en entornos donde se requiera una **red privada** 5G, como en fábricas, donde factores como el control, la seguridad y la posibilidad de personalización de la red son muy importantes. Por estos motivos, también pueden ser empleadas en entornos como oficinas o domicilios particulares como una **alternativa a la tecnología WiFi**,

extendiendo la conectividad 5G en zonas que no están cubiertas. Finalmente, se contempla su aplicación en la **mejora y fortalecimiento de las redes 5G** existentes, ampliando así su alcance y capacidad operativa.

Por otro lado, nuestro proyecto ha avanzado significativamente, aunque no sin desafíos. Se logró diseñar e implementar femtoceldas utilizando equipos SDR y Raspberry Pi CM4, evaluando distintas opciones de *software open source* como srsRAN y Open5Gs. Sin embargo, la integración completa y estable de las femtoceldas con todas las plataformas evaluadas aún está pendiente, así como la mejora de la compatibilidad del *hardware* y la interoperabilidad con las soluciones de *software open source*. Para superar estas limitaciones, es necesario **optimizar el software y considerar el uso de hardware más potente**, como Raspberry Pi 5.

En cuanto a la implementación de las tres opciones de arquitectura (integrada, híbrida y distribuida), se lograron implementar y evaluar las arquitecturas integrada (network in a box), híbrida y distribuida (D-RAN). La arquitectura distribuida resultó ser la más viable debido a las limitaciones de almacenamiento y computación de las Raspberry Pi. No obstante, aún queda pendiente la **implementación completa y pruebas exhaustivas de todas las arquitecturas bajo condiciones de alta carga**. Para mejorar, se deben optimizar las configuraciones de *software* y *hardware* para **soportar un mayor número de usuarios concurrentes** y evaluar la posibilidad de utilizar *hardware* más potente.

Las pruebas para comparar el rendimiento de cada una de las arquitecturas y la obtención de KPIs se realizaron de manera parcial. Se llevaron a cabo pruebas de cobertura, calidad de señal, capacidad y rendimiento, obteniendo KPIs relevantes, aunque con limitaciones debido a la capacidad de computación de las Raspberry Pi. Aún quedan pendientes **pruebas de fiabilidad y disponibilidad más exhaustivas**, así como **pruebas de consumo de energía en diferentes configuraciones y condiciones de carga**. Para obtener KPIs más precisos y representativos, es necesario realizar pruebas adicionales con *hardware* más potente y optimizar las configuraciones de *software* para mejorar el rendimiento y la estabilidad.

El estudio de la **interoperabilidad de las femtoceldas con distintas plataformas open source de RIC y la implementación del RIC** no se pudo

completar debido a la limitada capacidad de cómputo de la Raspberry Pi. Implementar el RIC y las xApps y/o rApps asociadas en la red de femtoceldas permitiría el desarrollo de una **radio inteligente basada en técnicas de Machine Learning** que habilitarían mejoras como la optimización del rendimiento de los radios en función de una serie de factores, como la calidad de la señal, la demanda de tráfico y las restricciones de energía, o la asignación de recursos radio de forma eficiente y equitativa; o incluso, la protección de los radios contra ataques, como la interferencia y la suplantación de identidad. Este aspecto aún está pendiente y requiere el uso de *hardware* más potente para permitir la conexión y operación con plataformas RIC. Además, es necesario **realizar pruebas de interoperabilidad y optimización de la configuración del RIC**.

En cuanto al diseño, virtualización e integración de un SMO para la orquestación de la red Open RAN de femtoceldas mediante opciones de código abierto, está pendiente de **integración completa y pruebas exhaustivas del SMO con la red Open RAN de femtoceldas**. Para mejorar, se deben llevar a cabo pruebas adicionales para asegurar la compatibilidad y el rendimiento del SMO, así como optimizar su configuración para mejorar la orquestación y gestión de la red.

Para futuras líneas de trabajo, es vital desarrollar las recomendaciones del capítulo 9, de donde destacamos como medidas prioritarias:

- **Mejorar la capacidad de computación y almacenamiento**, evaluando el uso de *hardware* más potente como Raspberry Pi 5 y **optimizando el software para hacer un uso más eficiente del hardware** disponible. Así mismo, se sugiere realizar un estudio exhaustivo de las capacidades requeridas, considerando el número de usuarios, los servicios a soportar, el throughput, las funcionalidades, etc. Este **estudio de demanda** permitirá adaptar la evolución de los sistemas y dotarlos de la potencia necesaria, manteniendo al mismo tiempo su bajo coste objetivo y el reuso de plataformas comerciales. También, es necesario realizar pruebas adicionales y **obtener KPIs más precisos** y representativos utilizando *hardware* más potente. Además, se debe estudiar y probar la **interoperabilidad con plataformas open source de RIC, optimizando la configuración del RIC** para mejorar la gestión y optimización de la red.
- **Asegurar la compatibilidad del software con el hardware** conforme se vayan realizando actualizaciones. Es un asunto que ya quedó identificado como punto de mejora en el capítulo 4 del entregable D.3.2

[2], destacando la importancia de una buena documentación y soporte continuo para asegurar la compatibilidad y el funcionamiento eficiente de las soluciones open source en *hardware* como Raspberry Pi desde distintos enfoques: sistema operativo y desarrollos *open source*, compatibilidad de drivers/APIs con *software open source* y compatibilidad de bases de datos y procesadores

Por último, desarrollar y probar **nuevos casos de uso**, como aplicaciones de realidad aumentada y virtual, telemedicina, vehículos autónomos o drones es otra línea de trabajo futura importante.

7. Relación a los objetivos

10. Referencias y noticias

Entregables de tipo documento del proyecto ADV5G-IMM-SDR:

- [1] D3.1: Progreso del Laboratorio Inmersivo, Año 1.
- [2] D3.2: Progreso del Laboratorio Inmersivo, Año 2.
- [3] D3.3: Informe final sobre el Laboratorio Inmersivo y los ensayos realizados

11. Anexos