



UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS DE
TELECOMUNICACIÓN

TRABAJO FIN DE GRADO

GRADO EN INGENIERÍA DE TECNOLOGÍAS DE
TELECOMUNICACIÓN

Implementación de una red 5G con una SDR BladeRF y su entorno de experimentación

Autor:

D^a Lorena Gómez Diego

Tutor:

Dr. D. Juan Carlos Aguado Manzano

D. Ignacio Royuela González

VALLADOLID, julio 2025

TÍTULO:	Implementación de una red 5G con una SDR BladeRF y su entorno de experimentación
AUTOR:	D. Lorena Gómez Diego,
TUTOR:	Dr. D. Juan Carlos Aguado Manzano,
	D. Ignacio Royuela González
DPTO:	Teoría de la Señal y Comunicaciones e Ingeniería Telemática

TRIBUNAL

PRESIDENTE:	Dr. Ignacio de Miguel Jiménez
VOCAL:	Dr. D Ramón de la Rosa Steinz
SECRETARIO:	Dr. Juan Carlos Aguado Manzano
SUPLENTE:	Dr. Noemí Merayo Álvarez
SUPLENTE:	Dr. Juan Blas Prieto

FECHA:

CALIFICACIÓN:

Resumen del Trabajo Fin de Grado

En este Trabajo Final de Grado se ha diseñado un entorno de experimentación adecuado para la prueba y lanzamiento de servicios de red, implementando el despliegue y la posterior conexión mediante terminales de usuario. Para ello, se ha configurado nuestra propia red 5G utilizando tecnología SDR, con la BladeRF como equipo de radio, sobre la que se ha centrado gran parte del trabajo.

Por otra parte, la verificación de la eficacia de la cámara semianecoica (SAC) se ha realizado mediante el uso de un analizador de espectros, comparando la señal de emisión de la BladeRF dentro y fuera de la cámara. Este análisis ha permitido evaluar en detalle las mejoras obtenidas respecto al uso de la red 4G.

La red se ha probado con dos equipos diferentes: en primer lugar, un terminal móvil Xiaomi Redmi Note 12 5G; posteriormente, se avanzó al uso de un módem 5G Telit Celerion FN990A28 y, finalmente, se realizaron pruebas utilizando ambos dispositivos conectados simultáneamente a la misma red.

Abstract

This final Project has been developed in an appropriate experimentation environment for testing various network services. For this purpose, our own 5G network was deployed using SDR technologies, with BladeRF as the radio equipment, which constitutes the main focus of this work.

In other hand, to validate the effectiveness of the semi-anechoic chamber, a spectrum analyzer was used to compare the transmission (TX) signal of the BladeRF both inside and outside of the chamber. This analysis enabled a detailed evaluation of the improvements achieved compared to the use of a 4G network.

The network was tested using two different devices: first, a Xiaomi Redmi Note 12 5G mobile terminal; later, testing progressed to a Telit Celerion FN990A28 5G modem. Finally, both devices were connected simultaneously to the same network for joint testing.

Keywords

4G, 5G, cámara semianecoica, rendimiento red móvil, Xiaomi Redmi Note 12 5G, Telit Celerion FN990A28 5G modem

Agradecimientos

Me gustaría comenzar este trabajo dando las gracias por todo el apoyo obtenido por las personas que me rodean, ya que, sin toda su ayuda, esfuerzo y dedicación, no podría haberlo logrado.

A mi madre Carmen, el modelo de vida que me ha enseñado, y todos los valores obtenidos, tanto de esfuerzo y dedicación como respeto, soy la persona que soy por ella. Seguidamente, a mi hermana Carlota, eres el mayor pilar de mi vida. Siempre firme, siempre presente. Nada de lo que soy sería posible sin ti. Y gracias también a Diego, porque no existe un buen pilar sin una buena base. Finalmente, a mi padre, al que cada vez me parezco más y del que he obtenido ese gusto por intentar buscar el sentido y la utilidad de todo en general.

En el rango académico, doy las gracias a mi tutor, Juan Carlos, por haber tutorizado este trabajo y haberme brindado la oportunidad de realizar este proyecto. Por otra parte, a mi cotutor, Ignacio Royuela, por haberme ayudado tanto y por dar esa planificación necesaria. No puedo finalizar este apartado, sin agradecer a Mohamed Khadmaoui, PhD por la Universidad del Oeste de Escocia, donde centró su investigación en redes de acceso 5G y el cual me ha brindado el apoyo y los conocimientos claves para comprender con éxito la red 5G en este proyecto.

Seguimos por esta rama, dando las gracias a todos mis compañeros del grado, que hoy son amigos, y que, han hecho el camino un poco más fácil.

Fuera de la universidad, doy las gracias a todos los amigos, que, me han soportado en este duro año, en las etapas buenas y menos buenas por las que he pasado. El crecimiento personal es gracias a vosotros.

Finalmente, gracias, Miguel, compañero de vida y experiencias, tienes el cielo ganado y también mi corazón.

Y, no podía finalizar esta sección sin la parte más importante de mi vida, mis abuelos, gracias, Evelio, Eusebia y, en especial, gracias, Araceli, por acompañarme en todos los pasos que doy en esta vida, allá donde estéis, os llevo en el corazón y, espero que estéis orgullosos de vuestra nieta, esto es por vosotros.

Este trabajo ha sido financiado por el Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades, la Agencia Estatal de Investigación y por FEDER/UE (proyecto PID2023-148104OB-C41 financiado por MICIU/AEI/10.13039/501100011033 y por FEDER/UE).

This work has been funded by Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades, Agencia Estatal de Investigación and by ERFD/EU (grant PID2023-148104OB-C41 funded by MICIU/AEI/10.13039/501100011033 and by ERFD/EU).

Índice

1. Introducción.....	5
1.1 Antecedentes y motivación	5
1.2 Objetivos	6
1.3 Métodos y Etapas.....	7
1.4 Recursos	9
1.5 Estructura de la memoria	11
2. Estado del arte.....	13
2.1 Evolución de las redes móviles 4G-5G.	13
2.2 Cámara semianecoica y técnicas de aislamiento en RF	15
2.3 Marco regulatorio espectral	18
2.4 Investigación de las redes	23
3. Despliegue de red 5G usando SDR	26
3.1 Arquitectura de Red 5G.	26
3.2 Plataformas SDR.....	28
3.3 Software 5G.....	30
3.4 Instrumentación y Medida RF	37
3.5 Configuración de la red	37
3.6 Configuración de la herramienta pySim	45
3.7 Herramientas de análisis y monitorización.	47
4. Construcción de cámara semianecoica.....	52
4.1 Requisitos	52
4.2 Diseño y simulación de la cámara SAC	52
4.3 Justificación de la elección	56
5. Evaluación y tests	58
5.1 Introducción	58
5.2 Validación de cobertura en banda 78	58
5.3 Comparativa de rendimiento 4G vs 5G.....	59
5.4 Análisis de la potencia de transmisión dentro y fuera de la cámara.	69
6. Conclusiones.....	71
7. Líneas Futuras.....	72
7.1 Ampliación de funcionalidades 5G.	72
7.2 Integración con Edge computing, IA e IoT	72

<i>Bibliografía</i>	74
<i>Anexo I</i>	77
<i>Anexo II</i>	78
<i>Anexo III</i>	79
<i>Anexo IV</i>	81

Índice de tablas

Tabla 1 Diferencias entre 4G y 5G [10]	14
Tabla 2 Comparativa de Releases.....	15
Tabla 3 Comparativa de especificaciones de SDR	28
Tabla 4 Comparativa de Plataformas de software[35]	36
Tabla 5 Comandos utilizados dentro del modo de diagnóstico	42
Tabla 6 Datos de la SIM modificados	44
Tabla 7 Ocupación de bandas observadas con el analizador de espectros	58
Tabla 10 Comandos de iperf3 utilizados	61
Tabla 11 Resultados finales	69

Índice de figuras

Figura 1. Espuma absorbente de microondas [5].	10
Figura 2. Evolución temporal 3GPP [9].	13
Figura 3. Despliegue SA vs NSA[12].	15
Figura 4. Principio geométrico de la disposición de los conos para minimizar las pérdidas [14].	16
Figura 5. Diagrama de radiación para PRD calibrados a 80 MHz y 1 GHz.	17
Figura 6. Ocupación de banda n 28.	20
Figura 7. Uso establecido por la CNAF para sistemas terrenales.	21
Figura 8. Uso establecido por la CNAF del espectro de banda milimétrica[3].	22
Figura 9. Especificaciones exigidas por la regulación para radiodifusión.	22
Figura 10. Estructura publicada en [24].	26
Figura 11. Ejemplo de desbordamiento del búfer.	30
Figura 12. Explicación de la sincronización necesaria entre gNodeB y radio utilizada.	30
Figura 13. Comparativa de servicios ofrecidos[32].	31
Figura 14. Roding Map OAI Alliance Software[34].	33
Figura 15. Utilización de Administrador de red 5G y de lector de redes vistas, mediante apps accesibles.	38
Figura 16. Parte del código a modificar, con la clave de administración de la SIM.	40
Figura 17. Datos obtenidos de [23].	41
Figura 18. Respuestas obtenidas al establecer la conexión.	43
Figura 19. Salida por consola de conexión establecida con Modem 5G.	44
Figura 20. Arquitectura final de la red 5G.	45
Figura 21. Ejemplo donde se ve el fallo de conexión.	48
Figura 22. Ejemplo de conexión exitosa con BladeRF.	48
Figura 23. Ejemplo de registros obtenidos por la Blade(logs).	49
Figura 24. Primera versión de la SAC.	53
Figura 25. Vista superior de las esquinas.	54
Figura 26. Explicación de los cm extras necesarios.	54
Figura 27. Alzado de cámara de vista lateral.	56
Figura 28. Cámara final sin tapa.	57
Figura 29. Izquierda, cámara abierta. Derecha, vista de la cámara final.	57
Figura 30. Medida más utilizada de las de iperf3.	61
Figura 31. Arquitectura de la red con IPd.	62
Figura 32. Comportamiento de DRX en redes 5G.	63
Figura 33. Explicación de retardo obtenido en función del espaciamiento entre subportadoras[44].	64
Figura 34. Explicación de Jitter	65
Figura 35. Resultados obtenidos con iperf3, donde se visualiza el jitter.	66
Figura 36. Rendimiento teórico obtenido.	68
Figura 37. Speedtest realizado.	68
Figura 38. Espectrograma de la señal radiada fuera de la cámara.	70
Figura 39. Espectrograma de la señal radiada dentro de la cámara.	70
Figura 40. Fórmula insertada en la tabla[44].	81

1. Introducción

1.1 Antecedentes y motivación

Este proyecto da continuidad al trabajo desarrollado por Ignacio Royuela sobre redes 4G, centrado en el diseño e implementación de un banco de pruebas (*testbed*) de Edge Computing para el soporte de vehículos conectados [1].

En dicho proyecto se realizó un banco de pruebas que permite evaluar redes móviles con distintos tipos de servicios. Para ello, se implementó una red 4G mediante SDR (Software Defined Radio) y se modificaron vehículos en miniatura para su uso experimental. Además, se diseñó y evaluó un algoritmo de conducción autónoma con capacidad de *off-loading*, permitiendo descargar tareas de procesamiento en un servidor externo en tiempo real. El sistema se probó tanto en redes WiFi como en una red 4G desplegada en el propio proyecto, analizando su rendimiento y viabilidad.

El trabajo de Ignacio Royuela forma parte de una tendencia de investigación de las redes que ha experimentado un crecimiento significativo. Esto ha sido posible gracias a la aparición de soluciones *open source* como Open5GS y srsRAN, que facilitan la creación de infraestructuras móviles completas, tanto 4G como 5G, sin necesidad de recurrir a equipos costosos, lo que ha permitido que muchos investigadores las implementen. Estas tecnologías han ofrecido la oportunidad de simular e investigar escenarios reales, para validar así el uso de redes móviles de última generación, ofreciendo la posibilidad de evaluar su comportamiento en condiciones controladas.

Por lo tanto, la evolución natural del proyecto realizado por Ignacio Royuela es el despliegue de una red 5G utilizando el mismo hardware que ya se utilizó en su proyecto, particularmente una BladeRF [2]. Este despliegue no es obvio, dado que la mayoría de soluciones *open-source* han sido desarrolladas para otros SDRs (Software Defined Radio), por lo que abordar este objetivo no estaba carente de riesgo.

Un aspecto crucial a la hora de trabajar con estas tecnologías es el uso del espectro radioeléctrico, que está fuertemente regulado [3]. Dado que no existen frecuencias en las que se pueda experimentar libremente ni en 4G ni en 5G, es necesario trabajar solicitando una licencia, algo resuelto en el trabajo desarrollado por Ignacio Royuela gracias a la cesión de una licencia 4G propiedad de Vodafone [1]. Sin embargo, esta estrategia tiene

un recorrido muy limitado debido a la escasez de frecuencias libres que puedan ser cedidas por los operadores en nuestro entorno.

Como consecuencia, si se quiere seguir avanzando en la experimentación con redes 4G, 5G o cualquier otra banda regulada, es imprescindible disponer de un entorno controlado que asegure que no se generan interferencias con las comunicaciones de los operadores que poseen la licencia de uso. Es aquí donde surge la necesidad de un segundo elemento motivador de este Trabajo Fin de Grado: la construcción de una cámara semianecoica. Este tipo de recinto permite realizar pruebas y mediciones en condiciones de aislamiento electromagnético, garantizando que las emisiones radioeléctricas permanecen confinadas y no afectan al espectro utilizado por otras entidades.

El lugar más adecuado para realizar una medida de uno o varios parámetros de un circuito de microondas es el denominado campo abierto ideal (OATS). Este sitio, se caracteriza por ser de superficie plana, de terreno nivelado y limpio, que debe estar libre de interferencias y obstáculos, con excepción de los instrumentos de medida [4]. Una cámara semianecoica se considera equivalente a un OATS si cumple determinadas condiciones, concretamente que su NSA (Normalized Site Attenuation) está en el margen de $\pm 4\text{dB}$ entre 30 MHz y 1GHz.

Este proyecto tiene como objetivo la creación de una cámara semianecoica, la cual no solo proporciona aislamiento electromagnético, sino que además simula condiciones de espacio libre de EMC (Electromagnetic Compatibility), permitiendo de esta forma probar una instalación 4G o 5G en su interior. Todo ello con el objetivo de crear un entorno controlado que permite realizar pruebas de rendimiento, interferencia y compatibilidad de dispositivos en un entorno libre de interferencias externas y reflejos internos.

La convergencia entre ambas líneas da cabo a este trabajo de fin de grado, en el que se despliega una red 5G y se realizan pruebas de velocidad en un entorno de experimentación como es el de una cámara semianecoica.

1.2 Objetivos

El objetivo de este Trabajo Fin de Grado es doble, por un lado, la implementación de una cámara semianecoica que permita realizar pruebas experimentales en las bandas utilizadas por las operadoras móviles sin producir interferencias y, por el otro lado, desplegar una red 5G y generar las pruebas adecuadas para poder confirmar la validez del

entorno experimental para comunicaciones de calidad sin interferir en las comunicaciones exteriores. Con ello se busca no solo implementar la red, sino verificar el servicio mediante herramientas simples como *iperf*, siguiendo enfoques validados en trabajos anteriores, para poder utilizar una comparativa coherente.

Para alcanzar este propósito, el proyecto se desglosa en una serie de propósitos que, garantizan el diseño, despliegue y validación de la red en un entorno de pruebas. A continuación, se detallan, los requisitos en los que se basa este proyecto.

- Despliegue de una instalación 5G funcional que admita múltiples plataformas SDR.
- Implementación una cámara semianecoica para pruebas controladas de señales RF (Radio Frequency).
- Validación del funcionamiento de dicha cámara, asegurando la capacidad de evitar interferencias a las operadoras y permitir comunicaciones dentro de la cámara.
- Probar el funcionamiento de la red 5G desplegada con diferentes UEs (User Equipment) y medir su latencia.

1.3 Métodos y Etapas

La metodología que se ha seguido ha sido la división del proyecto en diversos paquetes de trabajo que se han organizado gracias a un Diagrama de Gantt, en el que se distribuyen las etapas con las diferentes franjas del calendario que han ocupado 28 semanas, en el que incluimos la etapa de congelación de proyecto, y escritura de este. Dicho diagrama de Gantt ha sido incluido y puede ser visto en el Anexo I.

Los principales paquetes de trabajo que se describieron fueron los siguientes:

1. Red 5G a través de SDR: Este paquete de trabajo se dividió en 11 subtareas. Las subtareas se definieron para aprovechar el know-how de los proyectos anteriores e ir desplegando a posteriori paso a paso la red 5G. Detallo a continuación los objetivos marcados en cada una de las actividades:

- 1.1. Puesta en marcha de estación base 4G *legacy*: El objetivo era ser capaz de poner en marcha la red justo en el punto en el que se dejó en el proyecto anterior. Esto supone el estudio de la documentación que se dejó, así como aprender el *know-how* desarrollado del proyecto anterior.

- 1.2. Estudio de opciones para puesta en marcha de red 5G SDR: Para el despliegue de la red se buscó que *softwares open source* podían ser utilizados para el despliegue, analizando pros y contras.
- 1.3. Instalación y configuración de srsRAN gNodeB: Ya especificamos aquí el *software* que finalmente se eligió, pero esta actividad supone la instalación de uno de los componentes de una red móvil y comprobación de que funcionaba junto con la SDR.
- 1.4. Instalación y configuración de Open5GS: De nuevo ya especificamos el paquete *software* elegido. Consiste en la instalación del paquete y comprobar que no da problemas durante su lanzamiento.
- 1.5. Integración de gNodeB y Open5GS: Configurar los parámetros necesarios para que los dos componentes se comuniquen.
- 1.6. Validación con analizador de espectros: Comprobación física de que realmente la estación base está activa.
- 1.7. Validación con teléfono móvil: Comprobar con diferentes smartphones comerciales que es posible dar de alta un usuario y que la red es operativa.
- 1.8. Compra módem 5G: Una vez comprobada la operatividad de la red, proceder a la compra de un módem para instalar en los vehículos del *testbed*.
- 1.9. Uso de la red 5G a través del módem 5G: Comprobar la operatividad de la red con el nuevo equipo adquirido.
- 1.10. Estudio de métodos para la realización de medidas de la red: Revisión de los métodos utilizados en el proyecto anterior para medir el rendimiento de la red.
- 1.11. Realización de las medidas de la red 5G.
2. Cámara anecoica: Construcción y validación: En este paquete de trabajo se diseña y construye una cámara semianecoica. Este paquete de trabajo consta de las siguientes actividades:
 - 2.1. Diseño de la cámara anecoica: Supone la revisión del estado del arte, la revisión de la legislación y el diseño de la cámara teniendo en cuenta lo anterior y los materiales disponibles.

2.2. Presupuesto y proveedor: A partir del diseño se realiza la compra del material necesario para la creación de la cámara.

2.3. Compra y recepción

2.4. Montaje

2.5. Comprobación del aislamiento: Realización de diversas medidas para comprobar que cumple el objetivo principal, evitar la interferencia de nuestra red 5G con redes comerciales.

2.6. Medidas 4G: Comprobación de que es posible mantener una comunicación 4G dentro de la cámara.

2.7. Medidas 5G: Comprobación de que es posible mantener una comunicación 5G dentro de la cámara.

3. Congelación del proyecto y escritura de la memoria.

Como se puede ver, en términos generales, todos los paquetes de trabajo de este proyecto se dividen en, fase de estudio, implementación, validación y pruebas. Finalmente se acaba en una fase de redacción, de 1 mes, con revisión de contenido y estructura por parte de los tutores, además de realimentación externa y una revisión final con una atención al detalle que agradezco al tutor, lo que le da una duración total al trabajo de 6 meses, desde su inicio.

1.4 Recursos

Para la construcción de la cámara semianecoica se han contado con los siguientes recursos:

- Acero galvanizado de 165 x 135 cm y de 0,4 mm de grosor
- Listones de madera
- Espuma Comtest como se puede ver en la Figura 1.
- Ángulos metálicos para formar la estructura de 2,5 x 2,5 cm
- Tornillería variada y herramientas necesarias



Figura 1. Espuma absorbente de microondas [5].

Para el despliegue de la red 5G se ha contado con los siguientes recursos:

- 1 Blade RF 2.0 micro xA9(Nuand): SDR USB 3.0 con rango de frecuencia de 47MHz- 6GHz, ancho de banda de hasta 61 MHz para transmisión y recepción de señales RF.
- 1 USRP NI-2901 de National Instruments, con dos canales RX y TX MIMO (Multiple Input, Multiple Output), un rango de frecuencias de 70 MHz a 6 GHz y 56 MHz de ancho de banda para utilizarlos como hardware SDR.
- 2 Intel NUC BXNUC9I9QNX, con procesador Intel Core i9 de 9ª generación de 6 núcleos y 16 GB de memoria RAM para utilizarlos como servidores para servicios de red móvil.
- 1 ordenador MSI Modern AM-15, portátil utilizado como medio para emular el terminal de usuario, ya que su diseño y ligereza facilitan la manipulación de la unidad de prueba.
- 2 SIM sysmoISIM-SJA2 v2 programables, reprogramables compatibles con 5G, con soporte para desarrollo e investigación en redes celulares privadas y de laboratorio.
- 1 móvil utilizado como COTS UE: Xiaomi Redmi Note 12 5G, con procesador Qualcomm Snapdragon 4 Gen 1 de 8 núcleos, 4/6 GB de memoria RAM y pantalla AMOLED de 6,67" Full HD+ a 120 Hz, para su uso como terminal de pruebas en redes móviles 5G.
- Módem 5G Telit FN990A28 (M.2 Key-B): módulo de tarjeta de datos 5G, basado en chipset Qualcomm Snapdragon x62, soporta LTE (Long Term Evolution) y GNSS. Compuesto de los siguientes elementos:
 - Módulo Dongle 5G[6], con adaptador, M.2 a USB, 4 antenas, tanto para GSM como para 5G.

- Chip Telit FN099A028: formato M.2 de grado industrial [7]

En el caso de los recursos *software*, se han utilizado los siguientes paquetes y elementos.

- SrsRAN: Implementación de redes 4G y 5G en un entorno experimental. Este módulo incluye:
 - eNodeB/gNodeB: Nodo base para comunicación radioeléctrica en 4G y 5G.
 - UE (): Simulación de un dispositivo móvil conectado.
- Open5gs: Software de licencia libre, que es recomendado por srsRAN para la implementación del *Core*. Incluye los siguientes componentes esenciales:
 - EPC (Core Network): Componentes centrales con servicios personalizados como son AMF, NSSF y UPF, que son los modificados en este trabajo.
 - MongoDB: Base de datos necesaria para la implementación del *software* y modificación de los requerimientos de los usuarios.

1.5 Estructura de la memoria

Lo que se desarrolla en este trabajo, se organiza en siete capítulos que abordan de forma progresiva, el desarrollo, implementación y análisis de una red 5G experimental, así como la construcción de una cámara semianecoica como entorno de experimentación.

Los primeros capítulos abarcan la introducción y el estado del arte, donde se contextualiza y se presentan las técnicas de aislamiento electromagnético oportuno, además de explorar la evolución de las redes móviles 4G y 5G.

A ello le sigue el despliegue de la red 5G usando BladeRF como SDR, especificando el software utilizado y la instrumentación necesaria para su despliegue. A la vez, se exponen las herramientas de análisis y monitorización empleadas para evaluar el comportamiento de la red. Lo que continúa con la construcción al uso de la cámara, donde se detallan los detalles técnicos realizados, con la simulación del recinto, y la justificación de las decisiones adoptadas para garantizar un entorno adecuado. Finalizamos esta sección con unas pruebas, que incluyen la validación de la cobertura en la banda n78 y una comparativa de rendimiento entre redes 4G y 5G. También se discuten aplicaciones potenciales en entornos docentes y formativos.

Finalizamos con la formulación de conclusiones, con la redacción de resultados obtenidos, y la posibilidad que da el proyecto, de trabajo hacia líneas futuras. Finalmente, se incluye la bibliografía y varios anexos que complementan la información técnica.

2. Estado del arte

2.1 Evolución de las redes móviles 4G-5G.

Las tecnologías de telefonía móvil están principalmente reguladas por dos instituciones, 3GPP e ITU-T. 3GPP¹ es la organización que crea y mantiene los estándares técnicos para las tecnologías globales de comunicaciones móviles, ha definido las redes móviles de tercera, cuarta y quinta generación (3G, 4G y 5G). Por otro lado, ITU², es un organismo de la ONU que regula el uso de estas tecnologías y establece las directrices y requisitos que 3GPP debe seguir [8].

3GPP se creó como organización para la estandarización y desarrollo de la tecnología 3G, también denominada UMTS. El éxito de esta tecnología ha consolidado a esta organización, que ha continuado publicando estándares y desarrollos de evoluciones de la tecnología original. Tales evoluciones son 4G en su versión LTE (Long Term Evolution), 5G y actualmente ya están trabajando en 6G. LTE es un estándar desarrollado como parte de la evolución hacia 4G. Fue introducido en el *Release 8* del 3GPP, y representa una transformación de las tecnologías anteriores, al modificar la arquitectura, y cambiar el diseño de ésta para que todo el tráfico se transmita por medio de paquetes IP.

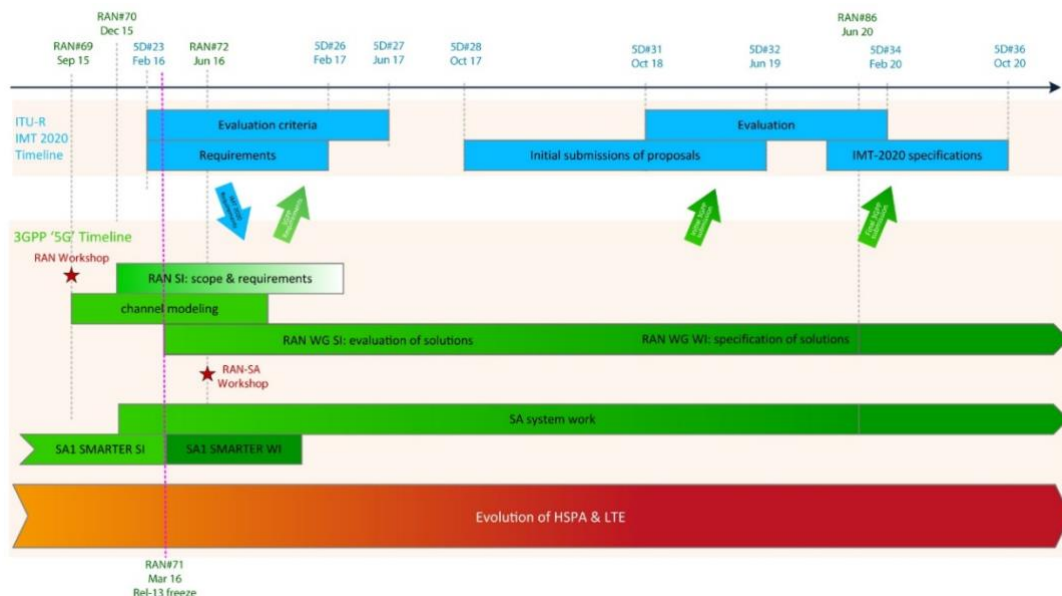


Figura 2. Evolución temporal 3GPP [9].

¹ 3rd Generation Partnership Project

² International Telecommunication Unit

Por su parte, el desarrollo 5G se estructura también en diferentes *Releases*. La primera que empieza a trabajar con esta red fue la **Release 15**, publicada entre 2018-2019. El desarrollo se ha realizado desde un inicio en dos modos principales: Non-Standalone (NSA) y Standalone (SA). El primero utiliza infraestructura existente de 4G(LTE) como soporte para el control de señalización, añadiendo el acceso 5G solo para la transmisión de datos (ver Figura 3). Esta solución intermedia facilita los primeros despliegues y reduce la complejidad técnica. En cambio, el modo SA supone una arquitectura totalmente independiente, con un núcleo de red 5G (5GC) nativo que permite explotar todas las capacidades de esta nueva generación, como la baja latencia, el *network slicing* y la conexión masiva de dispositivos. Las principales diferencias estructurales se ven de nuevo en la Figura 3. En la Tabla 1 se puede ver las diferencias principales entre la tecnología 4G y 5G, que son las tecnologías actualmente más extendidas a nivel global.

Tabla 1 Diferencias entre 4G y 5G [10]

Característica	4G (LTE)	5G (SA/NSA)
Latencia	~10 ms	~1 ms
Velocidad	Hasta 1 Gbps	~10 Gbps teórico, 1–4 Gbps práctico
Densidad de dispositivos	~100,000 /km ²	Hasta 1 millón/km ²
Virtualización	Limitada (EPC centralizado)	Arquitectura en funciones virtualizadas (NFV)
QoS y Slicing	Basado en EPS Bearers (EPC)	Soporte nativo para <i>network slicing</i> y <i>QoS flows</i>

La **Release 16**, se completa en junio del 2020, y concluye con la aprobación como estándar IMT-2020 [10] por la ITU-R. La **Release 17**, finaliza en marzo de 2022 y amplía el soporte para IoT (Internet of Things) en banda estrecha. Finalmente, la **Release 18**, conocida como 5G Advanced se completó en junio de 2024 y expande el sistema hacia nuevos niveles de automatización e inteligencia. Actualmente, la **Release 19**, contiene parte del 5G-Advanced, y tiene previsto el fin en diciembre de 2025. Finalmente, la **Release 20**, es la transición hacia el 6G [11]. En la Tabla 2 se pueden ver las características principales de cada una de estas Releases.

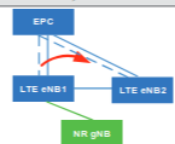
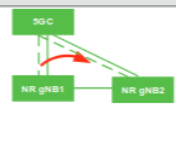
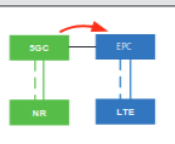
Scenario categories	1) NSA	2) SA	
Scenarios			
Handover latency	<100ms	<100ms	400~500ms
Service interruption	20ms	0~20ms	30~50ms
Duration of paging unreachable	0	0	350~450ms

Figura 3. Despliegue SA vs NSA[12].

Tabla 2 Comparativa de Releases

Release	Mejora	Fecha de publicación
15	Introdujo la arquitectura 5G NR en modos NSA y SA	2019-06-07 (SA#84-e)
16	Introduce soporte para URLLC, mMTC, V2X, redes privadas, network slicing y redes no terrestres. Incluye mecanismos avanzados de posicionamiento y automatización de redes.	2020-07-03 (SA#88-e)
17	Introduce mejoras en posicionamiento avanzado y redes no públicas, definiendo SNPN, y Public Network Integrated NPN.	2022-06-10 (SA#96)
18	Integra Inteligencia Artificial y Machine Learning en la gestión de la red, y da una cobertura extendida y soporte a realidad extendida.	2024-06-21 (SA#104)
19	Mejora el rendimiento 5G, incluye: AI/ML, comunicaciones IoT avanzadas, eficiencia energética y nuevos casos de uso industriales.	Abierta
20	Introduce ideas preliminares para 6G(IMT-2030). En proceso de lanzamiento.	Abierta

2.2 Cámara semianecoica y técnicas de aislamiento en RF

Una **cámara semianecoica (SAC - Semi-Anechoic Chamber)** es un recinto metálico apantallado (tipo caja de Faraday) cuyas paredes y techo están recubiertos internamente con material absorbente de radiofrecuencia, mientras que el suelo suele permanecer conductor (plano metálico). Este diseño combina dos técnicas de aislamiento RF clave:

- **Blindaje electromagnético:** la estructura metálica de la cámara evita que penetren señales RF externas y contiene las emisiones internas, asegurando que las medidas no se contaminen con interferencias del ambiente. Las

uniones, puertas y pasamuros se construyen cuidadosamente (por ejemplo, puertas con sellos conductivos, filtros en ventilación y filtros EMC en cables) para mantener la estanqueidad electromagnética de la cámara. Esto garantiza que cualquier señal medida dentro corresponda solo al equipo bajo prueba y que, recíprocamente, campos intensos generados dentro no afecten equipos externos.

- **Absorbentes de RF en paredes/techo:** los paneles piramidales de espuma absorbente (generalmente poliuretano impregnado de carbón) cubren las superficies internas para absorber las ondas electromagnéticas reflejantes. Gracias a su forma cónica, presentan una transición gradual de impedancia (del aire libre al material *lossy*), evitando reflexiones bruscas: la onda “se adentra” en el cono y su energía se disipa en forma de calor dentro del material resistivo. De este modo, las paredes “desaparecen” electromagnéticamente, logrando un entorno casi equivalente al espacio libre, esto es, anecoico que significa “*sin ecos*”. En una buena cámara semianecoica, solo un porcentaje muy pequeño de la energía incidente se refleja de vuelta – típicamente entre 0.1% y 1%, es decir, alrededor de **-30 a -20 dB** de la onda original [13]. El resultado es que cualquier emisión radiada dentro de la cámara se propaga como lo haría al aire libre, sin rebotes significativos en las superficies.

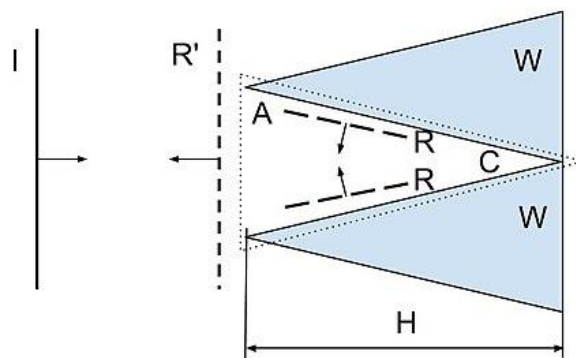


Figura 4. Principio geométrico de la disposición de los conos para minimizar las pérdidas [14].

Con estas características, la cámara semianecoica actúa como un sitio de prueba controlado, inmune al ruido exterior y sin reflexiones internas notables. A diferencia de una cámara totalmente anecoica, la SAC mantiene el piso metálico. Esto se debe a que en muchos ensayos se requiere un plano de tierra reflectante similar al de un sitio abierto para reproducir las condiciones de medición estándar. En cambio, para ensayos de inmunidad radiada es común revestir temporalmente el suelo con los mismos absorbentes,

convirtiendo efectivamente la sala en una cámara anecoica completa y evitando reflexiones hacia la antena receptora.

Una cámara semianecoica bien diseñada permite reproducir resultados de medición semejantes al campo abierto. Un ensayo típico para verificar esto es la medición de patrones de radiación de antenas; un ejemplo sería, emitir con una antena espiral de banda ancha, montada sobre un rotor. Durante la prueba la antena bajo test se va girando en incrementos de 10° mientras se registra la potencia recibida en distintos ángulos, a frecuencias de 2 GHz y 3 GHz. El objetivo de este experimento es trazar el diagrama de radiación de la antena en un entorno libre de reflexiones, y comprobar que la cámara no introduzca anomalías en dicho patrón. De igual manera, existen trabajos que validan el comportamiento de una SAC mediante comparaciones de rendimiento con diferentes antenas, como por ejemplo una bicónica o una log-periódica con un dipolo de referencia. En la Figura 5 se ve un ejemplo de cómo el patrón de radiación de los diagramas se mantiene estable gracias a la absorción de una cámara, demostrando que las reflexiones son despreciables y que la geometría de la antena es el principal factor que marca la diferencia en la distribución angular observada.

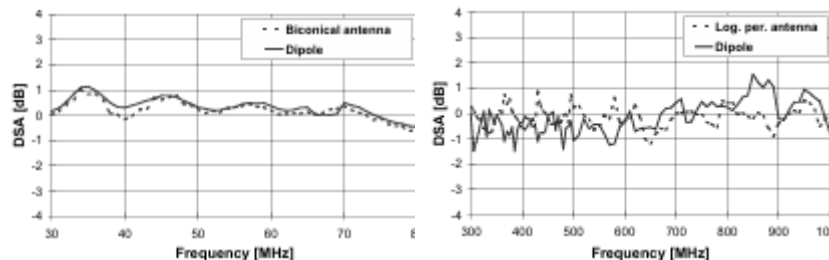


Figura 5. Diagrama de radiación para PRD calibrados a 80 MHz y 1 GHz.

Otro ejemplo de cómo certificar una cámara semianecoica es la calibración NSA, en la que, una antena transmisora y otra receptora a una distancia fija midiendo la señal en la cámara y comparándola con el valor teórico de espacio libre. Si la diferencia se mantiene dentro del rango permitido, que es ± 4 dB, la cámara pasa la validación.

En este proyecto, se ha optado por el diseño de una cámara semianecoica frente a una cámara completamente anecoica. Esta decisión se debe a que teniendo en cuenta criterios técnicos como prácticos. Las cámaras totalmente anecoicas, al absorber la energía electromagnética en todas las superficies, incluido el suelo, proporcionan un entorno más próximo al espacio libre ideal. Sin embargo, este tipo de recintos requiere cubrir el suelo con absorbentes de gran tamaño que, además de reducir considerablemente el volumen útil de la cámara, complican el montaje y encarecen significativamente la construcción.

Esta decisión nos permite mantener un alto grado de aislamiento RF y repetibilidad en las mediciones, sin asumir las restricciones adicionales de una cámara totalmente anecoica.

Para los objetivos establecidos, centrados en el despliegue y validación experimental de redes móviles 5G y el análisis de parámetros RF, no es estrictamente necesario reproducir un espacio libre ideal. La utilización de un plano metálico en el suelo, característico de las cámaras semianecoicas, no compromete la validez de las pruebas a realizar. Por el contrario, este diseño resulta una ventaja para ensayos EMC (compatibilidad electromagnética), ya que reproduce la configuración de un sitio abierto con plano conductor (OATS), tal como contemplan normas como CISPR 16 1-4 [15]. Además, al no cubrir el suelo con absorbentes, se facilita el acceso y manipulación de los equipos bajo prueba (EUT), especialmente aquellos de mayor tamaño o peso.

Finalmente, cabe destacar que en nuestro caso particular no necesitamos que la cámara se comporte como un espacio libre “estrictamente” conforme a norma, ya que nuestros ensayos tienen como objetivo principal no interferir con señales exteriores, y en el interior la única condición a cumplir es que se permita una comunicación con calidad suficiente. Esto nos permite tomar ciertas licencias en el diseño y uso de la cámara. Por ejemplo, podríamos aceptar ligeras desviaciones en la uniformidad de campo o en la absorción de alguna banda de frecuencia, siempre que dichas desviaciones no comprometan los resultados que buscamos. En otras palabras, dado que no realizaremos una certificación oficial sino pruebas adaptadas a nuestras necesidades, podemos flexibilizar algunos criterios sin que ello invalide la utilidad de la cámara. Esta aproximación reduce costos y complejidad, manteniendo no obstante un nivel de aislamiento RF suficiente para cumplir con los requisitos operativos de nuestro proyecto.

2.3 Marco regulatorio espectral

El **espectro radioeléctrico** en España es un dominio público cuya gestión y planificación corresponden exclusivamente al Estado, según la competencia estatal en telecomunicaciones establecida en la Constitución. En 2025, el marco regulatorio español se basa en la Ley General de Telecomunicaciones (Ley 11/2022, que sustituye a la Ley 9/2014) y en normativa de desarrollo como el Reglamento sobre el uso del dominio público radioeléctrico (Real Decreto 123/2017)[16] y el Cuadro Nacional de Atribución de Frecuencias (CNAF). El CNAF es la pieza central de la ordenación del espectro: asigna cada banda de frecuencia a ciertos servicios y condiciones, incorporando las decisiones

internacionales (UIT) y europeas (UE) para asegurar un uso armonizado y eficiente del espectro. España, como miembro UIT, aplica las disposiciones del Reglamento de Radiocomunicaciones resultantes de las Conferencias Mundiales de Radiocomunicaciones (CMR) de la UIT. De hecho, la edición del CNAF aprobada en 2021 incorporó los cambios acordados en la CMR-19 (en vigor desde enero de 2021), así como nuevas decisiones y recomendaciones técnicas de organismos internacionales, manteniendo la alineación con la normativa europea.

En este marco, el espectro se gestiona bajo principios de uso racional, eficiente y compartido cuando es posible. La normativa nacional distingue entre uso común (bandas de uso libre bajo condiciones generales), uso especial (usos por administraciones públicas o radioaficionados, etc.) y uso privativo, que es el aprovechamiento exclusivo de frecuencias otorgadas a un titular mediante concesión demanial. Las concesiones de uso privativo del espectro se otorgan cuando una banda tiene el número de licencias limitado; en tal caso la ley exige un procedimiento público de selección (normalmente subasta) respetando publicidad, concurrencia y no discriminación. Estas concesiones suelen tener una duración de 20 años, prorrogables una sola vez por otros 20 años, según la legislación vigente que incorporó las directivas europeas. Con ello, España da la máxima seguridad jurídica y plazo de explotación a los adjudicatarios, a la vez que puede imponer obligaciones de servicio y cobertura en pro del interés general.

Por otro lado, la introducción de la tecnología 5G ha sido una prioridad estratégica en la UE y en España, materializada en el Plan Nacional 5G (2018-2020) y la agenda España Digital 2025. En línea con las recomendaciones del Grupo de Política del Espectro Radioeléctrico (RSPG) de la UE, que en 2016 identificó tres bandas prioritarias para 5G (700 MHz, 3,4-3,8 GHz y 24,25-27,5 GHz), España ha liberado y asignado estas bandas para sistemas 5G. Las condiciones técnicas de uso vienen armonizadas por decisiones de la Comisión Europea: por ejemplo, la banda 700 MHz se rige por la Decisión (UE) 2016/687, que armoniza 694-790 MHz para servicios móviles de banda ancha; la banda 3,5 GHz se armoniza según la Decisión 2008/411/CE (actualizada en 2014 y 2019); y la banda 26 GHz sigue la Decisión (UE) 2019/784 (modificada por Decisión 2020/590) que establece las condiciones técnicas para 24,25-27,5 GHz en 5G. A continuación, se sintetizan las asignaciones de estas bandas en España y sus condiciones [3]:

- **Banda 700 MHz (694-790 MHz):** Corresponde al “segundo dividendo digital”, liberado de la televisión digital terrestre para 5G. Mediante la Orden

ETD/534/2021 se convocó la licitación de 7 concesiones en esta banda (4 bloques pareados de 2×5 MHz y 2×10 MHz FDD, y 3 bloques de 5 MHz *downlink* solo). Los adjudicatarios fueron los tres operadores móviles principales. Las concesiones se otorgaron por 20 años (prorrogables otros 20). Se impusieron obligaciones de cobertura estrictas dada la importancia de la banda de 700 MHz para mejorar la cobertura en interiores y zonas rurales. Entre otras condiciones, los licenciatarios deben desplegar 5G antes de mediados de 2025 cubriendo un alto porcentaje de la población y todas las capitales de provincia (por ejemplo, Valladolid figura explícitamente entre las ciudades que deben tener cobertura con 700 MHz en los plazos fijados). También se incluyeron obligaciones de cobertura en corredores de transporte (autovías, líneas ferroviarias AVE) y en determinados aeropuertos y puertos estratégicos. Estas obligaciones aseguran que provincias como Valladolid queden integradas en el despliegue inicial de 5G en banda baja, reduciendo la brecha digital territorial.

Directiva/Decisión	Frecuencias	Ref. CNAF
Decisión de Ejecución (UE) 2016/687 de la Comisión, relativa a la armonización de la banda de frecuencias 694-790 MHz para los sistemas terrestres capaces de prestar servicios de comunicaciones electrónicas inalámbricas de banda ancha y para un uso nacional flexible en la Unión.	694-790 MHz.	UN-153

Figura 6. Ocupación de banda n 28.

- Banda 3,5 GHz (3400-3800 MHz):** Es la banda media principal para 5G por su amplio ancho de banda disponible (400 MHz) y buenas propiedades de propagación. En España, parte de esta banda ya estaba en uso: antes de 5G existían concesiones localizadas en 3400-3600 MHz (unas 160 MHz ocupados, por ejemplo para WiMAX/FWA) y el resto 3600-3800 MHz fue liberado de usos militares de radiolocalización. El Gobierno realizó dos subastas: primero en 2018 (Orden ETU/531/2018) se subastaron 200 MHz en 3600-3800 MHz, y luego en diciembre 2020 (Orden ETD/1248/2020) los restantes 40 MHz en 3400-3600 MHz más una reorganización de los 160 MHz ocupados por determinadas concesiones demaniales[17]. Con ello, cada operador pudo alcanzar bloques contiguos de 80-100 MHz, conforme a las recomendaciones europeas para 5G. Las condiciones técnicas requieren limitar las emisiones fuera de banda para proteger servicios adyacentes (por ejemplo, se estableció un límite estricto de potencia fuera de banda para proteger los radares militares por debajo de 3400 MHz). Las licencias de 3,5 GHz también imponen obligaciones de

despliegue, aunque algo menos exigentes que en 700 MHz debido a su uso más orientado a capacidad urbana. Dado que esta banda ya se asignó en 2018, en 2025 está plenamente en servicio con 5G en entornos urbanos e industriales, incluyendo despliegues en Castilla y León (Telefónica, Orange y Vodafone cubren con 5G la ciudad de Valladolid y otras localidades de la provincia gracias a estas frecuencias).

Decisión de Ejecución (UE) 2014/276 de la Comisión de 2 de mayo de 2014 por la que se modifica la Decisión 2008/411/CE, relativa a la armonización de la banda 3400-3800 MHz para sistemas terrestres capaces de prestar servicios de comunicaciones electrónicas en la Comunidad.	3400-3800 MHz.	UN-107
--	----------------	--------

Figura 7. Uso establecido por la CNAF para sistemas terrestres.

- Banda 26 GHz (24,25-27,5 GHz):** Es la banda milimétrica pionera para 5G, destinada a ultra alta capacidad en entornos de alta densidad o casos especiales (por su alcance reducido). La UE instó a su asignación para 5G, y España la incluyó en su Estrategia de Impulso 5G y en el Plan de Recuperación. La banda fue liberada de usos previos (principalmente enlaces fijos de corto alcance) y se lanzó su subasta en diciembre 2022, dentro del marco del Plan de Recuperación. La Orden ETD/1059/2022 reguló esta licitación, innovando al ofrecer concesiones nacionales y también concesiones regionales para fomentar usos locales o industriales. La subasta concluyó en diciembre de 2022 con cuatro adjudicatarios: los tres operadores móviles nacionales adquirieron unos 1,8 GHz en total (repartidos en bloques estatales), y un cuarto operador local obtuvo 200 MHz en una comunidad autónoma. Concretamente, en Castilla y León se adjudicó un bloque regional de 200 MHz a la empresa Globe Operator Telecom, siendo esta la única licencia regional adjudicada en todo el país (los demás 18 ámbitos regionales quedaron desiertos). En cuanto a las condiciones técnicas, la banda 26 GHz se asigna con carácter no exclusivo para sistemas de comunicaciones electrónicas inalámbricas, coexistiendo con otras aplicaciones limitadas (por ejemplo, usos científicos o satelitales están protegidos en sub-bandas adyacentes). La Decisión (UE) 2019/784 armoniza la potencia máxima, máscaras de emisión y zonas de protección (especialmente para evitar interferencias con servicios pasivos en 23,6-24 GHz), condiciones que han sido incorporadas a la normativa española.

Decisión de Ejecución 2019/784/UE de la Comisión de 14 de mayo de 2019 relativa a la armonización de la banda de frecuencias de 24,25-27,5 GHz para los sistemas terrenales capaces de prestar servicios de comunicaciones electrónicas de banda ancha inalámbrica en la Unión.	24,25-27,5 GHz.	UN-92
---	-----------------	-------

Figura 8. Uso establecido por la CNAF del espectro de banda milimétrica[3].

La normativa española permite un uso flexible para investigación y pruebas tecnológicas con espectro radioeléctrico para fines experimentales y de investigación. En particular, el secretario de Estado de Telecomunicaciones e Infraestructuras Digitales tiene facultad para autorizar usos temporales o experimentales de frecuencias al margen de lo previsto en el CNAF. Estas autorizaciones, pensadas para proyectos de corta duración y potencia limitada, no otorgan derechos permanentes, pero permiten a universidades, centros de I+D o empresas emplear bandas no licenciadas comercialmente para ensayos, siempre dentro que se respeten las condiciones técnicas y no se generen interferencias perjudiciales con servicios autorizados, estos límites, recogidos en la ley española recogida en la Orden ETD/1449/2021[18] establecen un marco flexible. En este contexto, los dispositivos de corto alcance, *short range devices*(SRD) pueden operar sin licencia en determinadas bandas como las comprendidas entre 836-870 MHz o 5,725-5,875 GHz, siempre que se respeten las potencias y los ciclos de trabajo especificados (Figura 9), destinada para enlaces unidireccionales de servicio fijo, para transporte de programas estudio-emisora de radiodifusión sonora de entidades que dispongan del correspondiente título habilitante [18].

Tipo de dispositivo y rango de frecuencias	Límite de potencia	Reglas de acceso al canal y otras restricciones de uso
Dispositivos de corto alcance (SRD) no específicos en 862863 MHz.	Potencia máxima 25 mW (p.r.a.).	Ancho de banda ≤ 350 kHz. Ciclo de trabajo $\leq 0,1\%$.
Dispositivos de corto alcance (SRD) no específicos en 863865 MHz.	Potencia máxima 25 mW (p.r.a.).	Estos dispositivos deberán utilizar técnicas de acceso y mitigación de interferencias con rendimiento al menos equivalente a las técnicas descritas en las normas armonizadas según la Directiva 2014/53/UE, o alternativamente un ciclo de trabajo $\leq 0,1\%$.
Dispositivos de corto alcance (SRD) no específicos en 865868 MHz.	Potencia máxima 25 mW (p.r.a.).	Estos dispositivos deberán utilizar técnicas de acceso y mitigación de interferencias con rendimiento al menos equivalente a las técnicas descritas en las normas armonizadas según la Directiva 2014/53/UE, o alternativamente un ciclo de trabajo $\leq 1\%$.
Dispositivos de corto alcance (SRD) para aplicaciones de audio y multimedia en 863-865 MHz.	Potencia máxima 10 mW (p.r.a.).	Sólo para dispositivos inalámbricos de flujo de audio y multimedia.
Dispositivos de corto alcance (SRD) para transmisión de datos de banda ancha en 863868 MHz.	Potencia máxima 25 mW (p.r.a.).	Ancho de banda >600 kHz y ≤ 1 MHz. Ciclo de trabajo $\leq 10\%$ para los puntos de acceso a red y ciclo de trabajo $\leq 2,8\%$ en el resto de los casos. Estos dispositivos deberán utilizar técnicas de acceso y mitigación de interferencias con rendimiento al menos equivalente a las técnicas descritas en las normas armonizadas según la Directiva 2014/53/UE.
Dispositivos de corto alcance (SRD) para redes de datos. Seguimiento, rastreo y adquisición de datos, incluidos los puntos fijos de acceso a la red (NAP). En los siguientes rangos de frecuencia: 865,6-865,8 MHz, 866,2-866,4 MHz, 866,8-867,0 MHz, 867,4-867,6 MHz.	Potencia máxima 500 mW (p.r.a.).	Ancho de banda ≤ 200 kHz, disponiendo de control de potencia adaptativa (APC: Adaptive Power Control), con un ciclo de trabajo $\leq 10\%$ en los NAP y $\leq 2,5\%$ en el resto de casos. Estos dispositivos deberán utilizar técnicas de acceso y mitigación de interferencias con rendimiento al menos equivalente a las técnicas descritas en las normas armonizadas según la Directiva 2014/53/UE.

Figura 9. Especificaciones exigidas por la regulación para radiodifusión.

Estos requisitos han favorecido la realización de ensayos tecnológicos en entornos controlados, pero, no permiten, en nuestro caso emisión libre en banda 5G, a pesar, de que la banda n28, abarque los rangos de 863-868 MHz. Esa banda no admite ese ancho de canal ni potencia suficiente para un despliegue de red móvil. Se podría usar esta banda para IoT de bajo consumo tipo NB-IoT con anchos de canal de 180 KHz.

2.4 Investigación de las redes

La investigación en el campo de las redes es fundamental para impulsar avances tecnológicos como los que vemos en las redes 5G y futuras 6G. Empresas líderes de telecomunicaciones y tecnología desempeñan un papel clave en esta innovación. A la vez, la colaboración entre universidades y centros privatizados como son las empresas nos permiten llegar a niveles inalcanzables por ambas partes por separado. A continuación, exploramos ambos aspectos: el rol de compañías punteras en la I+D de redes, y la importancia de la investigación colaborativa interuniversitaria en proyectos de redes de nueva generación.

En el ámbito empresarial, ponemos el ejemplo de Ericsson, que anunció recientemente una inversión de 200 millones de euros en I+D enfocada en redes abiertas, desagregadas y programables con automatización para 5G, estableciendo un nuevo centro de investigación en Athlone (Irlanda) con apoyo gubernamental[19]. Esta iniciativa busca desarrollar infraestructuras programables *multivendor*, apoyándose en su Plataforma de Automatización Inteligente (EIAP) y aplicaciones de red inteligentes (rApps). En otras palabras, Ericsson está trabajando en herramientas abiertas que permitan combinar equipos de distintos fabricantes en redes gestionadas de forma automática e inteligente. Gracias a ello surgen funcionalidades avanzadas –por ejemplo, automatizaciones de red, virtualización de funciones y *slicing* de red (segmentación de red)– que luego se traducen en mejoras palpables en las redes comerciales. Cabe mencionar que no solo las multinacionales contribuyen; también compañías más pequeñas de software e ingeniería, como es Alvatross, empresa española, nacida del equipo de SATEC en 2020 y convertida en entidad independiente desde 2023, especializada en OSS/BSS (Operational & Business Support Systems) para proveedores de telecomunicaciones, colaboran en la redacción de procesos de estandarización en TM Forum[20], para una mejor implementación de las redes. Estas empresas aportan soluciones de *cloud*, IA y DevOps que complementan el ecosistema de telecomunicaciones, muchas veces trabajando junto

a universidades o centros de investigación locales. En conjunto, el sector industrial aporta experiencia práctica, recursos y visión de mercado a la investigación en redes.

Por otra parte, la investigación académica proporciona las bases teóricas y experimentales para grandes avances. Cuando múltiples universidades unen fuerzas, a menudo con apoyo de instituciones públicas y empresas privadas, se logran proyectos enormes con resultados de alto impacto. Un ejemplo claro es el del Grupo de Comunicaciones Ópticas (GCO) de la Universidad de Valladolid (UVa), que colabora con numerosos centros. Actualmente, este grupo participa en proyectos en conjunto con otras universidades españolas como la Universidad de Alcalá, Universidad de Deusto e Instituto de Investigación Biomédica de Salamanca, entre otros. Estas iniciativas, financiadas por programas nacionales, abordan retos complejos (por ejemplo, aplicar TIC a la salud mental en el hogar, como en el proyecto AGINPLACE) aprovechando las distintas especialidades de cada institución.

Del mismo modo, gracias a programas europeos y alianzas internacionales, grupos como el GCO de la UVa han sido parte de consorcios de investigación verdaderamente masivos. Por ejemplo, en el proyecto europeo BONE (Building the Future Optical Network *in* Europe), la UVa trabajó junto a 48 instituciones europeas además de socios colaboradores[21]. Este proyecto (una Red de Excelencia del 7º Programa Marco) reunió a decenas de universidades y empresas para sentar las bases de las futuras redes ópticas en Europa. La magnitud de BONE refleja cómo la unión de múltiples universidades permite abordar problemas de gran escala en redes de comunicación óptica que trascienden las capacidades de un solo grupo.

De igual forma, la Universidad de Castilla-La Mancha (UCLM) ha estrechado lazos con Telefónica para impulsar la investigación en 5G. En 2022 ampliaron la *Cátedra UCLM-Telefónica* al campus de Cuenca, inaugurando un nuevo laboratorio dotado de equipamiento avanzado cedido por la compañía [22]. Este espacio permite a los investigadores del grupo de Electromagnetismo y Procesado de Señal de la UCLM desarrollar prototipos y sistemas de comunicaciones móviles con nuevas aplicaciones y dispositivos emergentes como son. *wearables*, realidad virtual/aumentada, e incluso explorar el uso de inteligencia artificial en la optimización de redes inalámbricas.

Además de colaborar con empresas, las universidades colaboran entre sí para afrontar la complejidad tecnológica del 5G. Es común la creación de consorcios interuniversitarios y redes de excelencia que reúnen a múltiples grupos de investigación complementarios. Un ejemplo es la red temática Go2Edge, en la cual la UVa (GCO) trabajó junto a una

decena de universidades españolas (UC3M, UPC, UPCT, UPM, UPV, Universidad de Vigo, etc.) para diseñar futuras arquitecturas seguras de computación en el extremo de la red[21]. Estas colaboraciones permiten aunar expertos, desde comunicaciones ópticas hasta ingeniería telemática, ciberseguridad o *cloud computing* y compartir plataformas experimentales distribuidas por distintas instituciones. Otro ejemplo fue la acción conjunta FIERRO (Future Internet: Eficiencia en Redes de Altas Prestaciones), donde el GCO-UVa se integró en una red nacional con numerosos grupos de diferentes universidades y centros (RedIRIS, UPNA, UC3M, UPC, UPV/EHU, UAM, UPM, entre otros) orientados a mejorar la eficiencia de Internet del futuro[21].

Acabamos esta sección, con ONOFRE, (Optical Networks OpenFlow for RESilience), proyecto nacional de investigación que abrió la línea de investigación sobre redes Ópticas flexibles y SDN (Software Designed Networking), proyecto de 2015, que finalizó en 2018, en el que participaban el GCO de la Uva, y lo organizaba el grupo GIRTEL de la UPCT. Este proyecto ha evolucionado en distintas convocatorias públicas, y actualmente las universidades UPCT, UMU y UVa forman un consorcio para desarrollar los objetivos planteados en ONOFRE-4 (2024-2027)[23]. El proyecto actual amplía el foco inicial a redes multiRAT, VRU (usuarios vulnerables), técnicas SDN avanzadas y redes móviles 5G. Destacamos los dos últimos *workshops*, donde se visualiza el trabajo conjunto realizado, el primero con colaboración nacional e internacional, consolidando el papel del GCO en el ámbito de las redes ópticas y la integración con sistemas industriales, realizado en diciembre de 2024, y, el más reciente, **“Luz y Qubits - Mujeres en la Revolución Cuántica”**, realizado en el marco de la Delegación del Rector para la Responsabilidad Social Universitaria por el 8 M, donde destacadas expertas de LuxQuanta, CSIC (Consejo Superior de Investigaciones Científicas) y de la propia Universidad de Valladolid, relataban los campos de desarrollo en los que trabajaban, explorando avances en ciberseguridad cuántica y la tecnología QKD (Quantum Key Distribution).

3. Despliegue de red 5G usando SDR

La implementación de una red 5G con radio SDR requiere integrar componentes de red (acceso de radio y núcleo) y configurar adecuadamente tanto *hardware* como *software*. En este capítulo se describe primero cómo es la arquitectura de una red 5G, posteriormente se analizan los paquetes *software* que se pueden utilizar para realizar un despliegue sobre SDR, y una vez hecha la elección, se explica el proceso de configuración de los ficheros y los dispositivos involucrados, así como soluciones encontradas para superar los retos encontrados. También se incluyen comparativas de las herramientas empleadas para análisis y monitorización del sistema.

3.1 Arquitectura de Red 5G.

La arquitectura de la red 5G es similar a la de 4G en cuanto a la separación entre el equipo de usuario (UE, User Equipment), la red de acceso radio (RAN, Radio Access Network) y el núcleo de red (Core), ver la **Error! Reference source not found.**, pero presenta algunos cambios clave en la distribución de funciones. A continuación, se describe la RAN y el núcleo 5G tal como se han implementado en este proyecto.



Figura 10. Estructura publicada en [24].

Red de Acceso Radio 5G

Está controlada por estaciones base de nueva generación, conocidas como *gNodeB* (gNB), análogas al *eNodeB* de LTE. En 4G LTE, la estación base (Evolved Node B) integraba todas las funciones de comunicación entre el usuario y el núcleo de red.

En 5G NR, la estación base evoluciona al Next Generation Node B (gNodeB), adoptando una arquitectura desagregada que separa sus funciones en distintas unidades [**Error! Reference source not found.**]. En concreto, se divide en una Unidad Distribuida (DU), encargada de las capas física y de enlace de datos, y una Unidad Central (CU), que maneja las capas superiores incluyendo las funciones de control y gestión de sesiones. Esta separación funcional (DU/CU) otorga mayor flexibilidad y escalabilidad en el despliegue de la RAN 5G.

Núcleo 5G (5GC)

El núcleo de la red 5G (5GC) representa una evolución radical respecto al EPC de LTE³, adoptando un enfoque totalmente basado en servicios (Service-Based Architecture, SBA) que facilita la comunicación entre funciones de red mediante APIs estandarizadas. Entre sus principales componentes destacan:

AMF (Access and Mobility Management Function). Responsable de gestionar el acceso y la movilidad de los dispositivos.

SMF (Session Management Function). Encargada de la gestión y control de las sesiones de datos.

UPF (User Plane Function). Elemento clave para la separación del plano de control y usuario, permitiendo una mayor eficiencia en el encaminamiento del tráfico.

PCF (Policy Control Function). Función central para la aplicación de políticas de red y gestión de QoS (Quality of Service).

NRF (Network Repository Function). Facilita el descubrimiento dinámico de funciones y la orquestación de servicios.

NSSF (Network Slice Selection Function). Permite la asignación de *slices* según las necesidades de los diferentes servicios.

³ Explicado en el TFM de Ignacio Royuela[1]

Este diseño modular orientado a servicios permite una escalabilidad flexible, integración con *edge computing*, y un control más granular del tráfico, ideal para entornos IoT y servicios con requisitos estrictos de QoS. Además, la separación de planos de usuario y control, junto con la orientación a servicios (SBA) simplifican el despliegue de nuevas funciones y la automatización de la red.

3.2 Plataformas SDR

En un sistema 5G con SDR, la radio definida por software actúa de interfaz entre el computador que ejecuta la RAN y el medio inalámbrico, enviando y recibiendo las señales de radiofrecuencia. En este proyecto se emplearon dos dispositivos SDR para pruebas: una BladeRFxA9 [25] y una USRP NI-B2901 [26]. La comparativa entre ambos la realizamos siguiendo sus respectivas especificaciones, vemos esta comparativa en **Error! Reference source not found..**

Tabla 3 Comparativa de especificaciones de SDR

Característica	BladeRF xA9	USRP NI B2901
Fabricante	Nuand	National Instruments (NI)
Rango de Frecuencia	47 MHz – 6 GHz	70 MHz – 6 GHz
Ancho de Banda	Hasta 56 MHz	Hasta 40 MHz
MIMO	2x2	1x1(puede expandirse)
Interfaz de Conexión	USB 3.0	USB 3.0
FPGA Integrado	Intel Cyclone V (5CGXFC9D6F27C7N)	Xilinx Spartan-6 LX150
Potencia de Transmisión	Hasta +6 dBm	Hasta +20 dBm
Recepción Sensible (RX)	-80 dBm a -130 dBm (aprox.)	-80 dBm a -120 dBm (aprox.)
Software Compatible	GNU Radio, Pothos, MATLAB, SDR#	LabVIEW, GNU Radio, MATLAB
Aplicaciones	SDR (Software Defined Radio), LTE, 5G, Radar	SDR, Investigación, Pruebas 5G

Precio	~415€	~3200€
--------	-------	--------

En el anterior proyecto se decidió utilizar la BladeRF porque, aunque sus capacidades son menores a las de otras opciones como la USRP, su menor coste permite ajustar el presupuesto sin comprometer los objetivos planteados. Como muestra la **Error! Reference source not found.**, sus especificaciones resultan suficientes para realizar el seguimiento y las pruebas necesarias.

No obstante, durante la configuración del gNodeB para la BladeRF, surgió un problema relacionado con la sincronización de relojes. A diferencia de la USRP, la BladeRF no dispone de un mecanismo interno para volver a sincronizarse automáticamente en caso de pérdida de conexión o desbordamiento de búfer. Esto provoca errores de *timeout* en la transmisión o la recepción cuando el reloj pierde la referencia, lo que impide mantener una sesión estable con el Core 5G.

La solución a este inconveniente se encontró gracias al foro de problemas y discusiones del proyecto srsRAN [27] en la discusión 222, se indica que se debe modificar el código fuente antes de realizar el proceso de instalación para evitar que se produzcan interrupciones en la transmisión cuando la BladeRF pierde la referencia temporal. Los pasos fueron los siguientes:

- Instalar las dependencias necesarias: SoapySDR [28] SoapyBladeRF [29], SoapyUHD [30] and BladeRF [31].
- Eliminar la referencia al parámetro `time_source` en
- `lib/radio/uhd/radio_uhd_device.h: 254`
- Establecer el temporizador de tiempo de espera del búfer de transmisión (`TRANSMIT_TIMEOUT_S`) a 0 en
- `srsRAN_Project/lib/radio/uhd/radio_uhd_tx_stream.h:44`
- Establecer el temporizador de tiempo de espera del búfer de recepción (`RECEIVE_TIMEOUT_S`) a 0 en
- `srsRAN_Project/lib/radio/uhd/radio_uhd_rx_stream.h:40`

Estas modificaciones desactivan los límites de tiempo rígidos durante la transmisión y recepción, flexibilizando el proceso y permitiendo que la BladeRF siga funcionando, aunque se produzcan ligeras pérdidas de sincronización o retrasos en la entrega de datos,

tal y como se puede ver en la Figura 11.

```

nter t to stop trace.
set RX sampling rate 11.52 Mhz, filter BW: 9.22 Mhz
Setting frequency: DL=2670.0 Mhz, UL=2550.0 Mhz for cc_idx=0 nof
set TX frequency to 2669999998
set RX frequency to 2550000000
RF status: O=3, U=0, L=0
RACH: tti=7471, CC=0, DCI=1, Preamble=

```

Figura 11. Ejemplo de desbordamiento del búfer.

Los desbordamientos pueden ser por el búfer del receptor (*overflow*), o por haber un subflujo (*underflow*), o por que algún evento se ha producido “tarde” (*late*) Figura 12.

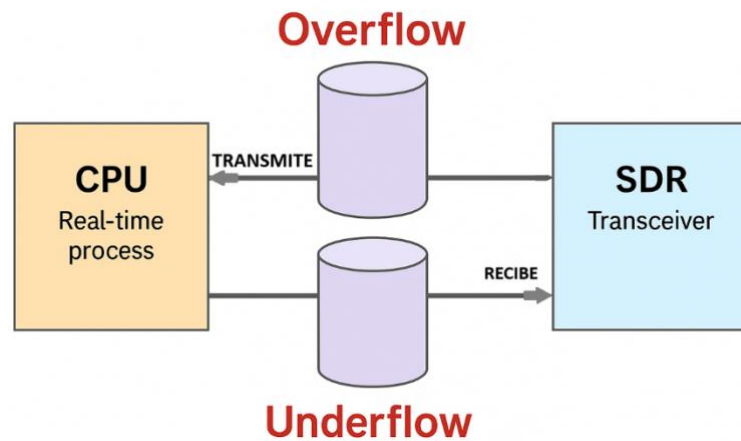


Figura 12. Explicación de la sincronización necesaria entre gNodeB y radio utilizada.

Cabe mencionar que, con una USRP, al perder muestras también aparecerían dichos errores, sin embargo, los UHD (USRP Hardware Drivers) suelen reintentar sincronizar de nuevo usando su reloj interno o un oscilador disciplinado por GPS(GPSDO). En la USRP al utilizar este mecanismo diferente de sincronización basado en UHD, depende del parámetro `time_source` para mantener la referencia temporal externa (GPSDO, reloj interno, etc.). Si se eliminan estas referencias o se establecen los *timeouts* a 0, se pueden producir desbordamientos de búfer y fallos de sincronización que afectan a la estabilidad de la red, lo que imposibilita la red con una USRP, si se utiliza la configuración especificada en este capítulo.

3.3 Software 5G

Con la llegada de 5G han surgido numerosas soluciones *software* (de código abierto y comerciales) que implementan parcial o totalmente la pila de protocolos 5G, tanto en el plano de usuario como de control. Estas plataformas permiten desplegar tanto la Red de

Acceso Radioeléctrico (RAN) como el núcleo 5G (*Coree*) con distintos grados de compatibilidad con los estándares 3GPP, facilitando la creación de entornos de prueba y el análisis académico de la tecnología. Comparar dichas plataformas y conocer sus diferencias resulta clave para decidir cuál utilizar en cada proyecto. A continuación, se analizan las principales alternativas disponibles (Free5GC, Open5GS, OpenAirInterface, srsRAN, UERANSIM y Amarisoft) haciendo énfasis en su facilidad de instalación, soporte de 5G Standalone (SA) o Non-Standalone (NSA), y otras características relevantes, con el fin de justificar la elección del software empleado en este trabajo.

Free5GC:

Es una implementación abierta del núcleo 5G (5GC) basada en arquitectura de microservicios (SBA). Nació orientada a 3GPP Release 15 y proporciona las funciones principales del Core 5G (AMF, SMF, UPF, UDM, PCF, etc.) de forma modular.

Core	SMF	AMF	PCF	UDM	NEF	UPF
Open5GS	✓	✓	✓	✓	✗	✓
Free5GC	✓	✓	✓	✓	✗	✓
OAI5G-CN	✓	✓	✗	✓	✓	✓
RAN	PHY	MAC	RLC	PDCCP	SDAP	RRC
UERANSIM	✗	✗	✗	✗	✗	✓
srsRAN	✓	✓	✓	✓	✓	✓
OAI5G	✓	✓	✓	✓	✓	✓
RFSimulator	✓	✓	✓	✓	✓	✓

Figura 13. Comparativa de servicios ofrecidos[32].

Gracias a esta alta modularidad, Free5GC ofrece mucha flexibilidad y una interfaz fácil de usar, lo que lo hace atractivo para investigación. Su diseño SBA (Service Based Architecture) cumple con las especificaciones 5G y facilita integrar componentes distribuidos.

Sin embargo, Free5GC solo implementa la red Core 5G, sin parte RAN, por lo que no soporta emulación radio en tiempo real (solo simula las funciones de núcleo). Esto implica que, para pruebas completas con UEs reales, debe combinarse con una plataforma RAN separada. En cuanto a la instalación, se considera de dificultad media [32], aunque existen contenedores Docker y guías oficiales para simplificar el despliegue. Free5GC es software libre y cuenta con una comunidad activa de desarrolladores. En resumen, es una opción flexible para simular el Core 5G SA y experimentar con *slicing*, funciones de red 5G, etc., pero limitada al plano Core y no incluye una solución RAN.

Open5Gs:

Es otra implementación *open source* del núcleo móvil, que abarca tanto EPC 4G como 5GC 5G SA. A diferencia de Free5GC, Open5GS adopta una estructura más simplificada y está orientado a cumplir las funciones primordiales de la red central con alta eficiencia. Implementa la mayoría de Network Functions (NFs) de 4G/5G (MME, HSS, SGW, PGW para LTE; AMF, SMF, UPF, etc. para 5G) brindando compatibilidad con 5G Standalone (ver Figura 13). Se destaca por estar optimizado para escenarios de bajos recursos, permitiendo desplegar un *Core* funcional en *hardware* modesto. Además, su diseño es modular pero más ligero que Free5GC, lo que facilita seleccionar solo los componentes necesarios, por ejemplo, arrancar únicamente el núcleo 5G o solo el EPC 4G según la necesidad. Posee una comunidad muy activa y soporte frecuente de actualizaciones[33]. En cuanto a la facilidad de instalación, Open5GS es reconocida como muy fácil de desplegar. Dispone de paquetes precompilados y una interfaz *web* opcional para administración, lo que agiliza la configuración inicial[33]. Esta accesibilidad la hace ideal para prototipado rápido de redes 5G privadas o de laboratorio. Open5GS se distribuye bajo licencia AGPLv3. En resumen, es una solución robusta y sencilla para implementar el Core 5G SA (o un *Core* LTE/5G NSA) de forma rápida, siendo una alternativa conveniente en proyectos con recursos limitados o que requieran fiabilidad[32].

OpenAirInterface:

Es un proyecto *open source* desarrollado por la Alianza de Software de OpenAirInterface(OAI), que reúne a una comunidad de desarrolladores por todo el mundo, cuyo objetivo es trabajar juntos para desarrollar la tecnología de una Red de acceso por Radio (RAN) y un núcleo (CN)[34].

Desarrollada por la OAI Software Alliance que provee tanto la RAN como el Core 5G completos. Es única en el ecosistema *open-source* por ofrecer una pila 5G de extremo a extremo: implementa la RAN 5G (gNodeB) en modos Non Stand-Alone (NSA) y Stand-Alone (SA), así como un conjunto propio de funciones de núcleo 5G (OAI-CN)[34]. Incluso dispone de un software UE 5G, lo que permite simular tanto la estación base como el terminal. OAI soporta funcionalidades avanzadas alineadas con 3GPP, incluyendo soporte de bandas FR2 (ondas milimétricas), MIMO y división CU/DU. Un punto fuerte, es su validación a nivel de comercio individual, por ejemplo, se ha utilizado en *testbeds* para validar rendimiento 5G con UEs reales y evaluar QoS *end-to-end*. No obstante, toda esta potencia conlleva mayor complejidad de instalación y configuración. OAI es

conocida por ser la alternativa más pesada y exigente: al incluir RAN y core, requiere instalar numerosas dependencias (herramientas de tiempo real, *drivers* SDR, etc.) y su puesta en marcha es laboriosa. Estudios comparativos indican que OAI necesita más tiempo de instalación y consume más CPU que otras plataformas más ligeras. En términos de desempeño, OAI ha mostrado *throughput* elevados en enlace de descarga, pero a costa de utilizar considerable potencia de cómputo. OAI ofrece capacidades únicas: gNodeB 5G completo independiente, y permite establecer todos los servicios en contenedores Docker, independientes unos de otros. Su núcleo 5G (OAI-CN) implementa también la arquitectura orientada a servicios (SBA) y puede interoperar con la RAN OAI fácilmente[34]. Resumiendo, OpenAirInterface es la opción más completa y realista en el ámbito *open-source* (Core + RAN), recomendada para proyectos que requieran experimentar con todos los aspectos de una red 5G; pero supone un desafío significativo en instalación y demanda *hardware* potente para un funcionamiento fluido[35].

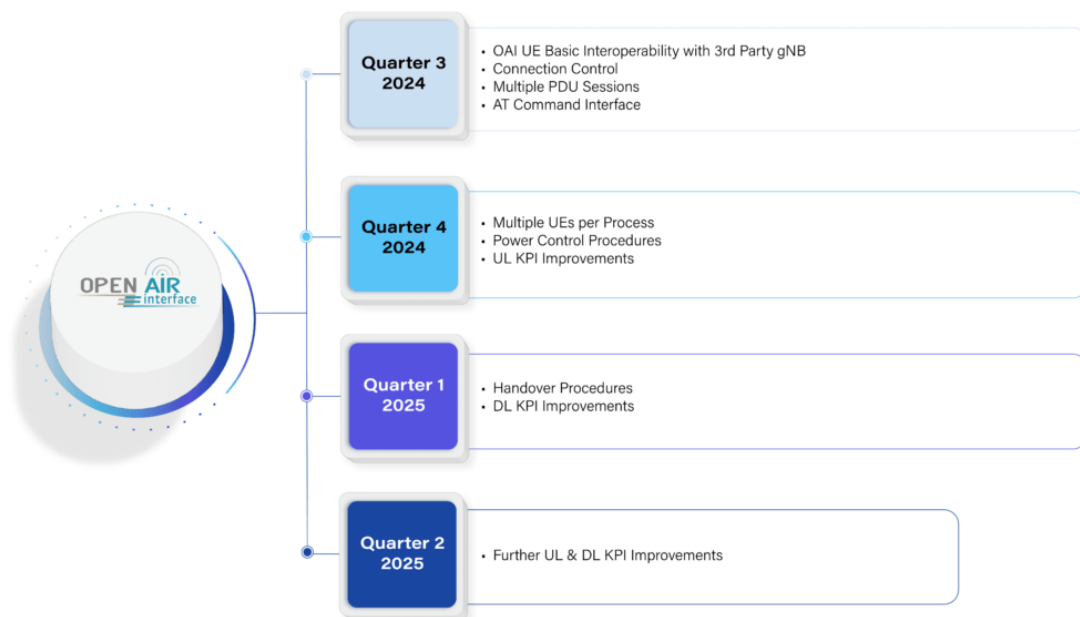


Figura 14. Roadmap OAI Alliance Software[34].

SrsRAN:

Software Radio Systems RAN, anteriormente srsLTE es una *suite* de código abierto centrada en la RAN celular. Incluye implementaciones de eNodeB 4G, gNodeB 5G y también un UE software, originalmente concebidas para LTE y extendidas a 5G NR. Históricamente, srsRAN introdujo soporte 5G NSA (Non Standalone) en 2021, permitiendo agregar una celda 5G anclada a LTE. En sus primeras versiones 5G, el gNB de srsRAN solo funcionaba en modo NSA, por lo que debía ejecutarse juntamente con un

eNB LTE en el mismo dispositivo SDR y PC, compartiendo recursos. Esto implicaba que, para montar una red 5G NSA completa, era necesario un SDR con dos canales TX/RX independientes, algo que muchos radios económicos de múltiples canales no soportan (suelen operar ambos canales en la misma frecuencia MIMO)[1]. No obstante, srsRAN ha evolucionado rápidamente: desde 2022 cuenta con una rama renovada (“srsRAN Project”) que ofrece una solución 5G Stand-Alone completa, soportando *gNB* y UE 5G SA sin necesidad de ancla LTE. La versión 23.10, por ejemplo, ya permite configurar celdas 5G SA plenamente compatibles. En comparación con OAI, srsRAN se destaca por su eficiencia y menor carga. Pruebas de rendimiento han comprobado que srsRAN está mejor optimizado, logrando tiempos de procesamiento más reducidos y usando mucha menos memoria que OAI para tareas equivalentes. De hecho, en condiciones similares de configuración, srsRAN alcanzó índices de modulación/codificación más altos (MCS) y *throughput* ligeramente superior en ciertos casos respecto a OAI[1]. Gracias a su diseño liviano, el consumo de CPU y RAM de srsRAN resulta significativamente menor, lo que lo hace más recomendable que OAI en términos de eficiencia cuando los recursos de *hardware* son limitados. Otra ventaja práctica es la simplicidad de configuración: srsRAN provee más de 400 parámetros ajustables a través de archivos de configuración de forma bastante amigable, con abundantes ejemplos y documentación, lo que facilita su puesta a punto. La instalación de srsRAN se considera de dificultad media: requiere compilar desde código fuente y tener instaladas las librerías SDR (UHD para USRP, etc.), pero la propia comunidad proporciona guías paso a paso. En nuestro caso, se optó por srsRAN debido a la extensa información y tutoriales disponibles [2], que han facilitado su integración. Cabe mencionar que srsRAN está publicado bajo licencia AGPLv3 y cuenta con una comunidad activa. En resumen, srsRAN es una opción muy sólida para desplegar la RAN 4G/5G en entornos de prueba, destacando por su alto rendimiento relativo y menor complejidad en comparación con OAI; si bien, hasta fechas recientes, su principal limitación era la ausencia de un modo SA “puro” sin LTE (limitación ya solventada en sus versiones más actuales).

Amarisoft

Representa una alternativa comercial completa para desplegar redes LTE/5G. Ofrece un paquete integral de software 100% implementado en CPU que incluye eNodeB LTE, gNodeB 5G, simulador de UE, núcleo EPC 4G, núcleo 5GC 5G, servidor IMS, *gateway*

eMBMS, N3IWF, todo en uno[35]. Es decir, con Amarisoft un solo equipo puede actuar simultáneamente como estación base y Core de una red móvil, usando hardware genérico (PC estándar) más una tarjeta SDR. Esta solución es muy popular en entornos de test y validación industrial, ya que permite montar redes completas 4G/5G de manera inmediata. En particular, Amarisoft soporta tanto el modo 5G SA como NSA *out-of-the-box*, cumpliendo las especificaciones 3GPP en todos los nodos de red. Por ejemplo, su producto AMARI Callbox es capaz de emular simultáneamente múltiples celdas 4G/5G, gestionar hasta cientos de UEs simulados, e incluso realizar *handovers* entre celdas, resultando ideal para pruebas de dispositivos (UEs comerciales) bajo distintas condiciones. Una de las grandes ventajas de Amarisoft es la facilidad de uso: al ser un *software* cerrado orientado a clientes, viene con configuraciones de ejemplo y una interfaz sencilla. La propia documentación destaca la fácil configuración mediante archivos JSON con plantillas predefinidas[36], lo que reduce drásticamente la complejidad de puesta en marcha en comparación con las soluciones *open-source* (donde a menudo hay que compilar código o editar múltiples ficheros manualmente). De hecho, es común que en pocos minutos se tenga operativa una red SA/NSA con Amarisoft, mientras que con OAI o srsRAN el proceso puede llevar horas. Amarisoft es compatible con hardware x86 o ARM estándar y múltiples SDRs (USRP, BladeRF, etc.), y su rendimiento está optimizado al nivel de productos comerciales (soporta celdas de 100 MHz, MIMO 4x4, hasta 6 Gbps DL / 2 Gbps UL agregados, etc. en modelos avanzados). La gran desventaja es su coste elevado para uso profesional y su rigidez, que no permite modificar el código. Esto puede limitar su uso en proyectos académicos con presupuesto reducido, a menos que se cuente con acuerdos o versiones de prueba.

En la Tabla 4 se puede ver una tabla resumen que compara todas las plataformas software analizadas en el trabajo.

En este trabajo, dada la disponibilidad de hardware limitado y la prioridad de un despliegue manejable, se optó por srsRAN junto con un Core 5G separado, aprovechando sus buenos resultados de rendimiento y la abundante documentación de apoyo. Esto permitió montar un entorno 5G de pruebas cumpliendo con los requerimientos de 5G SA, a la vez que minimizando la complejidad de implementación en comparación con alternativas más pesadas como OAI.

Tabla 4 Comparativa de Plataformas de software[35]

Plataforma	Naturaleza y componentes	Licencia	Soporte 5G	Facilidad de instalación
Open5GS	Núcleo 5G (implementación completa de AMF, SMF, UPF, etc.)	Código abierto (AGPLv3)	Solo SA (Core 5G autónomo)	Fácil
Free5GC	Núcleo 5G (arquitectura SBA por microservicios)	Código abierto (Apache 2.0)	Solo SA (Core 5G autónomo)	Media
OpenAirInterface	RAN 5G (<i>gNB</i> NSA/SA) + núcleo 5G (CN opcional)	Código abierto (OAI Public Lic.)	NSA y SA (RAN y Core)	Difícil
srsRAN	RAN 4G/5G (<i>eNB</i> LTE, <i>gNB</i> 5G; núcleo LTE opcional)	Código abierto (AGPLv3)	NSA (5G) (<i>SA en versiones recientes</i>)	Media
Amarisoft	Solución completa (RAN + Core + UE integrados)	Comercial (cerrado)	NSA y SA (RAN y Core integrados)	Instalación inmediata

Los ficheros de configuración que hemos tenido que modificar, han sido, única y exclusivamente.

1. En el Core, solo los ficheros YAML UPF, NRF y AMF., indicando, el PLMN, y las IPs, indicadas en Anexo III.
2. La configuración básica del *gNodeB*, se realiza en la modificación de un único fichero Anexo III. Ahí se ajustaron parámetros como el PLMN de la celda (001/01), el EARFCN/ARFCN de operación, y la potencia de transmisión. Adicionalmente, al compilar srsRAN, se aplicaron los parches mencionados para BladeRF en caso de usar esta SDR, o se seleccionó el *backend* UHD en caso de usar la USRP. No se requirieron más cambios significativos, ya que srsRAN por defecto viene preparado para un despliegue 5G SA básico.

sLa descripción de los ficheros de configuración de los componentes de red viene en el Anexo III

3.4 Instrumentación y Medida RF

Para la comprobación del espectro radioeléctrico y validar que la emisión de nuestra celda 5G se realizaba en la banda deseada, se utilizó un analizador Rohde & Schwarz FSH6 para la detección de portadoras en varias bandas (Anexo IV), con ello, se llegó a la conclusión de que la banda n78(3480-3500MHz), podría usarse a pesar de estar utilizada. Finalmente, se utilizó ese mismo analizador de espectros para verificar la emisión en esa banda, así como para detectar posibles interferencias o emisiones no deseadas. Las mediciones confirmaron la correcta activación de la señal portadora, en 64850, lo que significa que estaba en 3.489 GHz, la portadora. Cálculos explicados en Anexo IV.

3.5 Configuración de la red

En secciones anteriores ya se ha descrito como se configuraba en general la red móvil. En este apartado se viene a explicar principalmente la configuración del Equipo de Usuario (UE).

Para verificar el funcionamiento de la red, se llevaron a cabo dos casos de uso con dos casos de uso con equipos de usuario diferentes, primero un terminal móvil comercial (COTS UE) y, posteriormente, un módem 5G industrial. A continuación, se detalla el proceso de configuración de cada uno, incluyendo la programación de la tarjeta SIM y los ajustes necesarios para lograr el registro en la red.

Xiaomi Redmi Note 12 5G (terminal móvil comercial)

Este proceso requirió un trabajo intensivo de configuración y ajustes, que se extendió durante aproximadamente cuatro semanas desde que se consiguió establecer la comunicación básica entre el Core y el gNodeB. En esta fase inicial, uno de los principales retos fue lograr la compatibilidad completa con la BladeRF. Debido a las características de esta SDR, se identificaron varios problemas relacionados con la sincronización de relojes y la gestión de búferes (*overflow* y *underflow*), que exigieron la aplicación de parches específicos en la capa de radio, tal y como se detalla en el apartado Plataformas SDR, explicados todos ellos en secciones anteriores.

Superados los problemas iniciales de comunicación, el siguiente obstáculo fue la configuración de la tarjeta SIM. Este fue uno de los puntos críticos durante la fase de pruebas, ya que la programación de la SIM inicialmente tenía programados valores por defecto (MCC, MNC, PLMN, IMSI, Ki y OPc) que no coincidían con los de nuestra red.

El núcleo rechazaba el registro del terminal, arrojando errores como “NAS Attach Reject” y “*authentication failure*”. Tras varias iteraciones, se identificó que el problema residía en dos aspectos:

El perfil del terminal debía de ser modificado. El smartphone no estaba configurado para soportar única y exclusivamente servicios 5G SA, ya que inicialmente solo soportaba redes LTE, lo que no permitía visualizar nuestra red.

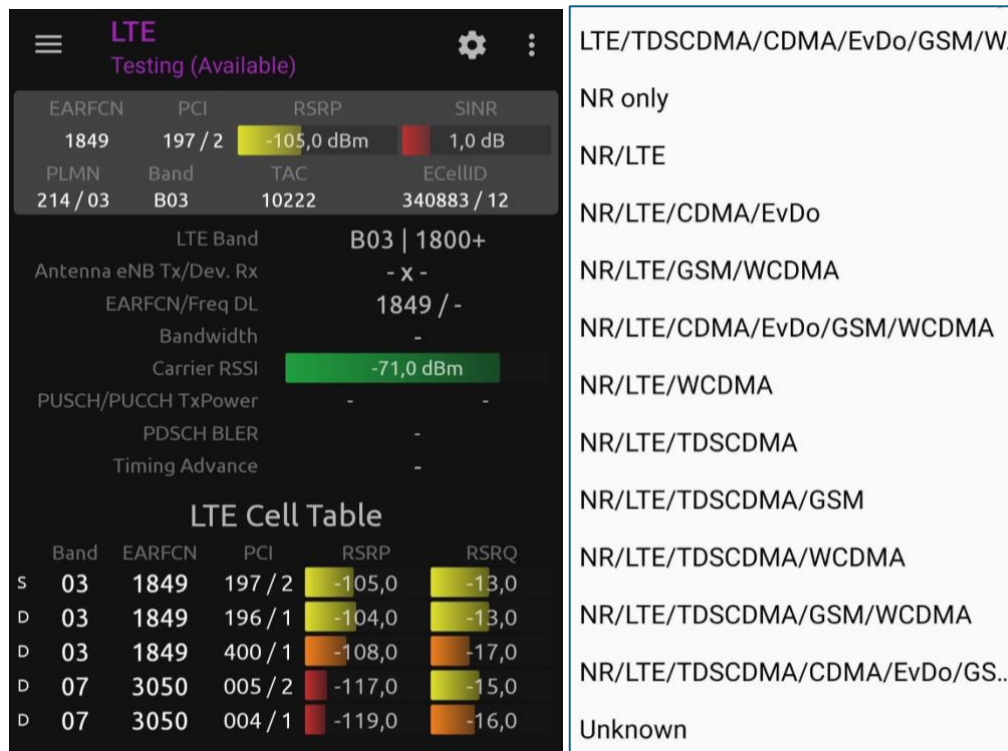


Figura 15. Utilización de Administrador de red 5G y de lector de redes vistas, mediante apps accesibles.

Se requirió modificar la configuración del dispositivo (usando menús ocultos o herramientas de desarrollador) para forzar que operase exclusivamente en modo 5G Standalone, deshabilitando la búsqueda de redes LTE. En la Figura 15 se muestra el uso de aplicaciones (Network Manager) para verificar la red a la que se conecta y ajustar esos parámetros.

Por otro lado, la tarjeta SIM debía soportar los procedimientos específicos de autenticación e identificación en 5G. Fue necesario habilitar y deshabilitar ciertos servicios de la USIM para adaptarla a 5G SA, ya que la SIM inicialmente estaba configurada para LTE. En particular, la USIM Service Table (UST) define los servicios activos en la SIM. Los siguientes servicios deben activarse si no lo están

- 122 → Gestión de movilidad 5G

- 123 → Seguridad 5G
- 124 → Privacidad del identificador (SUPI/SUCI)

Por otro lado, el siguiente servicio debe estar desactivado:

- 125 → Cálculo de SUCI en la USIM

De esta forma, para permitir que la SIM se registre correctamente en redes 5G y evitar errores durante el cálculo SUCI y la autenticación, se debieron desactivar servicios no soportados por la SIM, además de configurar el Routing Indicator adecuado. Los pasos para seguir son:

1. Desactivar servicios no soportados

En algunas tarjetas (como las sysmocom ISIM v2), la funcionalidad de cálculo SUCI no está implementada en la propia SIM y debe delegarse en el módem. Por ello, el servicio 125 – SUCI (Subscribed User Concealed Identifier) calculation in USIM debe desactivarse. Esta operación evita que se produzcan errores SW al intentar calcular el SUCI desde la SIM cuando no tiene soporte.

```
pySIM-shell (MF/ADF.USIM/EF.UST)> ust_service_deactivate 125
```

2. Activar servicios necesarios

Es importante asegurarse de que los siguientes servicios están activados:

124 – Privacy of *identifiers* (SUPI/SUCI)

122 – 5G Mobility Management

123 – 5G Security

Para activarlos:

```
pySIM-shell (MF/ADF.USIM/EF.UST)> ust_service_activate 124  
pySIM-shell (MF/ADF.USIM/EF.UST)> ust_service_activate 122  
pySIM-shell (MF/ADF.USIM/EF.UST)> ust_service_activate 123
```

3. Configuración del *routing indicator*

El archivo `EF.Routing_Indicator` debe contener un valor válido para que la funcionalidad SUCI funcione correctamente. Si el valor está vacío (por ejemplo `ffffff`), es necesario actualizarlo. Para un valor típico:

```
pySIM-shell (MF/ADF.USIM/DF.5GS/EF.Routing_Indicator)>
update_binary 0071ffff
```

En algunas tarjetas que requieren inversión de bytes, puede ser necesario verificar después de la modificación el cambio:

```
pySIM-shell (MF/ADF.USIM/DF.5GS/EF.Routing_Indicator)>
read_binary_decoded
```

```
pySIM-shell (MF/ADF.USIM/DF.5GS/EF.Routing_Indicator)>
update_binarv 17ffffff
```

4. Configuración de claves para la autenticación

En la configuración de `EF.SUCI_Calc_Info` debe cargarse la clave pública del operador, de acuerdo con el estándar TS 33.501, usando como esquema de protección Profile-B y dando prioridad al identificador 27. Si no se hace, los comandos para calcular SUCI generarán un error SW.

Ejemplo de carga:

```
pySIM-shell (MF/ADF.USIM/DF.5GS/EF.SUCI_Calc_Info)>
update_binary_decoded '{ "publicKey": "...",
"protectionScheme": "Profile-B", "priority": 27 }'
```

Gran parte de estos ajustes se pudieron simplificar usando un *script* incluido en pySim, `deactivate-5g.script` ya que este ejecuta las operaciones anteriores automáticamente. Solo fue necesario editar dicho script para introducir la clave pública correspondiente a nuestro operador (Figura 16).

```
10 # TODO: add your card-specific ADM pin at the end of the verify_adm line below
11 verify_adm
```

Figura 16. Parte del código a modificar, con la clave de administración de la SIM.

Después de realizar la modificación, ejecutar el script aplicó todos los cambios de forma rápida.

```
./pySim-shell.py -p0 --script ./scripts/deactivate-5g.script
```

Otras pruebas realizadas con *smartphones* comerciales

Además del smartphone Xiaomi utilizado como dispositivo principal, se intentó establecer conexión 5G con otros terminales comerciales (COTS UE, los terminales de prueba fueron el iPhone 12 mini, el 13, el 15 y el 16 pro). Sin embargo, estos dispositivos no especificados no lograron conectarse a la red desplegada. Este hecho pone de manifiesto una cuestión crítica en el ámbito de las redes de prueba: la mayoría de los terminales comerciales no están diseñados para operar fuera de las redes de operadores convencionales. Las causas más probables incluyen las restricciones impuestas por el firmware del fabricante [2], y la ausencia de perfiles abiertos de red que permitan conexión con núcleos no certificados.

Conexión con Módem de datos 5G (Telit FN990A28).

Tras conseguir la conexión con el smartphone, se decidió utilizar un módem 5G dedicado para las siguientes pruebas, ya que proporciona mayor control y posibilidades de desarrollo. La elección del módem se basó en un estudio de los dispositivos soportados por srsRAN (

Make	Model	Codename	Baseband	FDD	TDD	Configuration
Telit	FN990A28		Snapdragon X62	n7 - 5, 10, 20 MHz n71 - 5, 10, 20 MHz	n78 - 20, 30 MHz	IMSI 00101, 99970 gNB PLMN: 00101, 99970

Figura 17. Datos obtenidos de [23].

Para dotar al banco de pruebas de un dispositivo 5G Usuario Final (UE) fiable, nos decantamos por el módem Telit FN990A28, con una tarjeta de datos 5G en formato M.2. Este módulo industrial soporta las bandas 5G NR sub-6 GHz en modos SA (Standalone) y NSA (Non-Standalone) conforme a 3GPP Rel.16, además de ofrecer retrocompatibilidad con 4G LTE (Cat 19, hasta 5×CA) y 3G HSPA+. Tales características lo hacían idóneo para el entorno experimental, garantizando compatibilidad con la red 5G desarrollada y altos caudales de datos (teóricamente hasta 3,4 Gbps de descarga en NSA)[37]. El FN990A28 está basado en el *chipset* Qualcomm Snapdragon X62 e incluye funcionalidad GNSS integrada, cumpliendo los requisitos de flexibilidad y rendimiento

necesarios en el proyecto. Para su integración en el banco de pruebas, el módulo se montó en un adaptador M.2 a USB con ranura SIM, conectándolo a un PC con Linux para su configuración y pruebas.

Se describe a continuación los pasos realizados para instalar este hardware. El primer paso consiste en reconocer las interfaces del dispositivo. Una vez instalado el *hardware*, se procedió a verificar que el sistema operativo reconocía correctamente el módem. Los mensajes de `dmesg` y `lsusb` confirmaron la detección del Telit FN990A28 como dispositivo USB compuesto. El *kernel* registró múltiples interfaces: puertos serie accesibles en `/dev/ttyUSB[0-4]` (dos de ellos dedicados a comandos AT), un dispositivo QMI en `/dev/cdc-wdm0` para control del módem, y una interfaz de red celular (`wwan0`) para datos[37]. Los *drivers* de Linux adecuados (`qmi_wwan` para la interfaz QMI y `option` para los puertos seriales) se cargaron automáticamente en pruebas realizadas con Ubuntu, dado que el soporte para este módulo ya estaba incluido en el *kernel*. Esto sentó la base para interactuar con el módem tanto vía comandos AT (a través de los puertos serie) como mediante comandos QMI a nivel de control de módem.

Tabla 5 Comandos utilizados dentro del modo de diagnóstico

Comando	Descripción
AT	Debe responder OK, confirma comunicación.
ATI	Muestra información del módem.
AT+CPIN?	Verifica si la SIM está lista (READY).
AT+CREG?	Verifica registro en red (esperas 0,1 o 0,5).
AT+CGDCONT?	Verifica el perfil PDP configurado.
AT+CSQ	Fuerza de señal (0–31, donde >10 es aceptable).
AT+CGATT?	¿Está enganchado a la red? Debe responder 1.
AT+CGACT?	¿Está activado el contexto?
AT+CNMP=71	Fuerza al módem para que permita 5G NR.

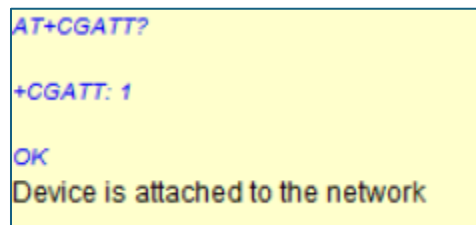
A continuación, se realizaron comprobaciones iniciales de conectividad mediante comandos AT. Se utilizó una consola serial (herramienta `minicom`) conectada al puerto adecuado.

```
sudo minicom -D /dev/ttyUSB2 -b 115200
```

A través de esta consola, se enviaron varios comandos AT estándar para comprobar el estado del módem y de la SIM. Algunos de dichos comandos se pueden ver en la Tabla 5.

Se realizaron pruebas iniciales de diagnóstico en el módem Telit FN990A28 mediante comandos AT. La comunicación fue confirmada con AT y ATI, mientras que AT+CPIN? mostró que la SIM estaba lista (READY). Sin embargo, los comandos AT+CREG? y AT+CEREG? indicaron que el módem no estaba registrado en red. Al consultar AT+CGDCONT?, se observaron dos contextos PDP (Packet Data Protocol) inactivos y sin configuración válida de APN (Access Point Network). La intensidad de señal fue adecuada (+CSQ: 21,4 $\approx$ -71 dBm), pero AT+CGATT? y AT+CGACT? confirmaron que el módem no estaba unido a la red ni tenía contexto de datos activo. Se concluyó que el módem no establecía conexión por falta de configuración adecuada para redes 5G SA, al igual que se tuvo que forzar el uso de 5G en el terminal móvil, se hizo lo mismo para el módem, usando el último comando de la Tabla 5.

Cuando la conexión de datos es establecida, se ve la salida mostrada en la Figura 18.



```
AT+CGATT?  
+CGATT: 1  
OK  
Device is attached to the network
```

Figura 18. Respuestas obtenidas al establecer la conexión.

Adicionalmente, se emplearon herramientas de diagnóstico a nivel QMI (Qualcomm MSM Interface). Por ejemplo, usando qmicli se interrogó el modo operativo del dispositivo ejecutando `qmicli -d /dev/cdc-wdm0 --dms-get-operating-mode`. Este comando permite verificar si el módem está en modo *online* (activo y con radio encendida) o en algún estado restringido (modo de avión, solo emergencias, *low-power*, etc.). Los resultados mostraron que el FN990A28 se hallaba en modo operativo normal (*online*), por lo que no fue necesario enviar comandos de habilitación adicionales (como AT+CFUN=1). No obstante, este paso confirmó que el módem estaba listo desde el punto de vista de *hardware/firmware* para unirse a la red, y que el obstáculo residía en la configuración de la conexión. En este caso, otra manera de forzar al módem a operar sobre 5G, restringiendo la búsqueda de servicio al FN990A28 es:

```
sudo qmicli -d /dev/cdc-wdm0 --nas-set-system-selection-preference="5gnr"
```

Finalmente, conseguimos tener una conexión correcta, como se puede ver en la Figura 19, el módem logró registrarse, obteniendo resultados que avalan la operatividad del Telit

FN990A28 en el contexto planteado y proporcionan un referente técnico para futuras integraciones de equipos 5G en entornos de investigación similares.

```
lorena@lorena-Modem-15-ASH: ~/Downloads/tellit_qm_sdk-1.11.11-0/tellit_qm_sdk-1.11.11-0/tellit_qm_sdk/tqcn/examples/data_connection_example$ sudo ./tellit_data_connection -c data_connection.c
onf
[1752170759.673633451] INFO: Tellit qm SDK version: 1.11.17-0
[1752170763.751565360] INFO: pdp_type 0,
[1752170763.751603006] INFO: profile index 23,
[1752170763.751618609] INFO: ipv4 address (170721321) 10.45.0.41
[1752170763.751618373] INFO: G4 ipv4 address (170721322) 10.45.0.42
[1752170763.751626962] INFO: ipv4 subnet mask (4294967292) 255.255.255.252
[1752170763.751634595] INFO: ipv4 primary dns (134744072) 8.8.8.8
[1752170763.751642607] INFO: ipv4 secondary dns (134743044) 8.8.4.4
[1752170763.751652735] INFO: IP version 4
[1752170763.751673129] INFO: MTU 1400
[1752170763.792078512] INFO: Data connection setup done
[1752170763.792107567] INFO: Press ctrl+c to terminate data connections
^C[1752170898.187897626] INFO: pdp_type 0,
[1752170898.187927939] INFO: profile index 23,
[1752170898.187933247] INFO: ipv4 address (170721321) 10.45.0.41
[1752170898.187939393] INFO: G4 ipv4 address (170721322) 10.45.0.42
[1752170898.187944142] INFO: ipv4 subnet mask (4294967292) 255.255.255.252
[1752170898.187950708] INFO: ipv4 primary dns (134744072) 8.8.8.8
[1752170898.187956575] INFO: ipv4 secondary dns (134743044) 8.8.4.4
[1752170898.187962302] INFO: IP version 4
[1752170898.187969915] INFO: MTU 1400
```

Figura 19. Salida por consola de conexión establecida con Modem 5G.

Se comentó anteriormente que fue necesario cambiar ciertos parámetros de las tarjetas SIM. Para gestionar y programar las tarjetas SIM sysmocom v2 se empleó la herramienta pySim, de la que también hemos hablado anteriormente. Con un lector Omnikey 3x21 y la utilidad pySim-prog.py, se leyeron y escribieron los valores de IMSI, ICCID, Ki y OPC en las SIM de prueba. Este paso fue crítico para autorizar el registro de los UEs en la red 5G experimental, ya que los valores por defecto de las tarjetas no coincidían con los de nuestra red.

Los parámetros que había que cambiar estaban relacionados con una cuestión de seguridad de srsRAN y es que su configuración de srsRAN está pensada para pruebas de laboratorio y entornos controlados, por lo que por seguridad o regulación limita la emisión a la banda de pruebas reservada por 3GPP, que es la PLMN 001-01, MCC⁴=01 y MNC⁵=01. De este modo, srsRAN asegura que ningún equipo conectado pueda emitir accidentalmente en bandas con licencia sin autorización, lo cual podría generar conflictos regulatorios y técnicos. Esta medida de seguridad puede ser desactivada en entornos controlados modificando la configuración o el código fuente, pero requiere precaución para no vulnerar las restricciones de uso del espectro.

Tabla 6 Datos de la SIM modificados

	IMSI	MCC/ MNC	Ki	OPC
Anteriores	9017000 0005212 9	MCC : 901 / MNC : 88	A094C31704244A2014 A7B689A7A41091	BBCAB121E440E160E7 8E2AB6D76E028B

⁴ Mobile Country Code

⁵ Mobile Network Code

Nuevos	0101000005 2121	MCC : 001 / MNC : 01	1d1aba01a67ea150fac7 abbe1e530b80	364de2e1b0f38521aa012 33f07b3f761
--------	--------------------	-------------------------------	--------------------------------------	--------------------------------------

Con las SIM actualizadas y colocadas en el smartphone y el módem, ambos equipos de usuario pudieron registrarse exitosamente en la red 5G privada, la estructura de la red se realizó en Figura 20.

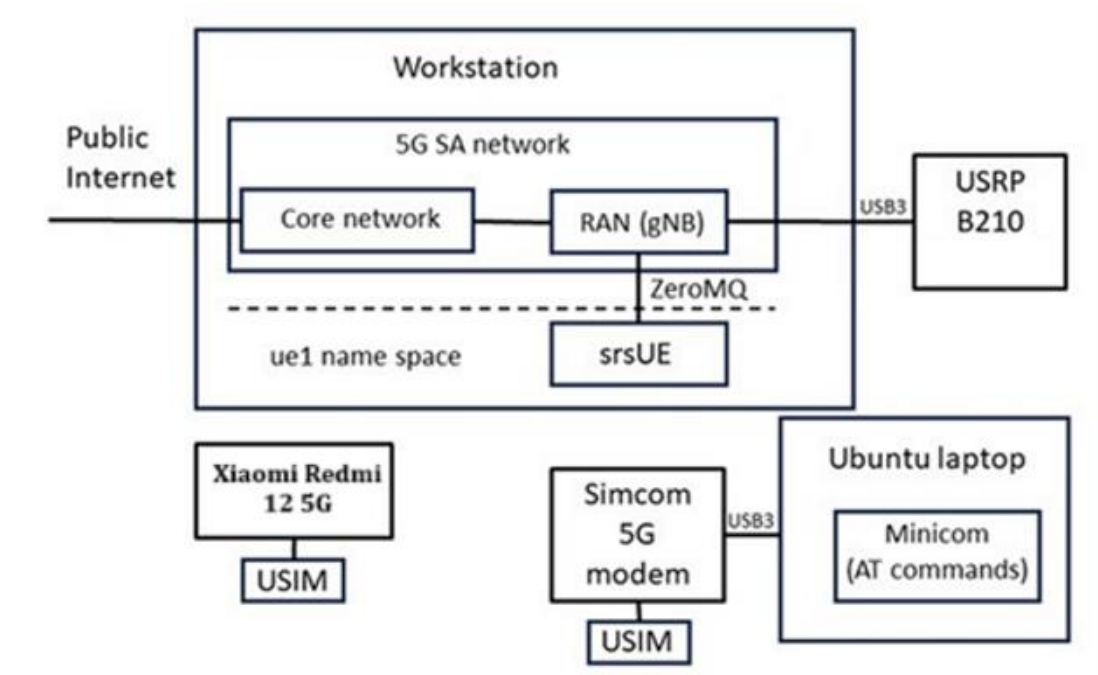


Figura 20. Arquitectura final de la red 5G.

3.6 Configuración de la herramienta pySim

Debido a su interés, describimos en esta sección cómo instalar el programador de tarjetas SIM, que se utilizó durante toda la sección anterior. Los pasos seguidos han sido:

- 1. Preparación del entorno.

Todas estas operaciones se ejecutaron en un **entorno virtual de Python 3.12** para aislar las dependencias, validando finalmente la configuración mediante pruebas de conexión a la red.

```
sudo apt update

sudo apt install python3 python3-pip python3-venv git pcscd
libpcsclite1 libpcsclite-dev

sudo systemctl enable --now pcscd
```

```
python3 -m venv pysim_env
```

2. Instalación de pySim:

Clonamos el repositorio oficial de pysim, y seguidamente instalamos las herramientas necesarias con sus dependencias.

```
git clone https://github.com/osmocom/pysim.git

cd pysim

pip install -r requirements.txt
```

3. Programación de la SIM.

Finalmente, dentro del entorno, y dentro de la carpeta, ejecutamos:

```
pySim-prog.py -p <pcsc_reader> --ki <ki_value> --
opc <opc_value> --mcc <mcc_value> --mnc <mnc_value> --
country <country_code> --imsi <imsi_value> --
```

Que con nuestros datos sería:

```
-p 0: 0 significa que seleccionamos el primer lector detectado por el servicio PC/SC.
--ki A094C31704244A2014A7B689A7A41091, clave de autenticación.
--opc BBCAB121E440E160E78E2AB6D76E028B, código de operador para cifrado
--mcc 01
--mnc 01
--imsi 001010000052121, identificador único del suscriptor dentro del PLMN.
```

4. Verificación

Con pySim-read se comprueba que se han cambiado correctamente los datos.

```
Using reader PCSC[HID Global OMNIKEY 6121 Smart Card Reader
[OMNIKEY 6121 Smart Card Reader] 00 00]
Ready for Programming: Insert card now (or CTRL-C to cancel)
Generated card parameters :
  > Name      : Magic
  > SMSP      :
e1ffffffffffffffffffffffff0581005155f5ffffffffffff000000
  > ICCID     : 8988211000000521214
  > MCC/MNC   : 001/01
  > IMSI      : 001010000052121
  > Ki        : 6fdca27c74c6d7798e063dd62d413d59
  > OPC       : 364de2e1b0f38521aa01233f07b3f761
  > ACC       : None
  > ADM1(hex) : 3831343230303736
  > OPMODE    : None
Programming ...
Warning: Programming of the ICCID is not implemented for this
type of card.
Warning: the database format of recent OsmoHLR versions is not
compatible with pySim-prog!
Programming successful: Remove card from reader
```

3.7 Herramientas de análisis y monitorización.

Durante todo el despliegue, se hizo uso intensivo de herramientas de *logging* y monitorización para depurar problemas y evaluar el rendimiento de la red 5G.

Por un lado, el propio sistema de registro (*logs*) de las aplicaciones del Core y del gNodeB resultó invaluable. Al ejecutar el núcleo 5G (Open5GS) y el gNodeB (srsRAN), se observaron mensajes detallados en consola que permitieron identificar configuraciones erróneas o fallos de conexión. Por ejemplo, en una fase temprana el log del AMF mostraba intentos fallidos de conectar con el NRF debido a una IP mal configurada (ver Figura 21) muestra un ejemplo de error donde el gNodeB no encuentra el núcleo a causa de una dirección incorrecta.

```

artemis@artemis-nuc1:/usr/share/srsran$ sudo gnb -c gnb_rf_b210_fdd_srsUE.yml
srsLog error - Unable to create log file "/tmp/gnb.log": Permission denied
Lower PHY in quad executor mode.

--== srsRAN gNB (commit ) ==--

Connecting to AMF on 192.168.0.112:38412
Failed to connect SCTP socket to 192.168.0.112:38412. error="Network is unreachable"
srsGNB ERROR: Failed to create SCTP gateway.

Abortado ('core' generado)
artemis@artemis-nuc1:/usr/share/srsran$

```

Figura 21. Ejemplo donde se ve el fallo de conexión.

Analizando estos registros, se corrigieron los parámetros en los ficheros YAML del núcleo (por ejemplo, asegurando que el AMF apuntase al NRF en la IP correcta, y que el gNodeB tuviese configurada la dirección del AMF adecuadamente). Estos registros han sido esenciales para entender la interacción entre componentes y afinar los detalles de configuración necesarios. **srsRAN proporciona estadísticas en tiempo real** de la capa física a través de la consola del gNodeB. Observando métricas clave como el RSRP, RSRQ, SINR y la asignación de portadoras a los distintos UEs conectados.

```

artemis@artemis-nuc1: ~/Artemis/4g-network/core-05GS-ra...
Supported RF device list: UHD bladeRF zmq file
Opening bladeRF...
Set RX sampling rate 1.92 Mhz, filter BW: 1.92 Mhz

==== eNodeB started ====
Type <t> to view trace
Set RX sampling rate 11.52 Mhz, filter BW: 9.22 Mhz
Setting frequency: DL=2670.0 Mhz, UL=2550.0 Mhz for cc_idx=0 nrof_prb=50
set TX frequency to 2669999998
set RX frequency to 2550000000
t
Enter t to stop trace.
RACH: tti=291, cc=0, pci=1, preamble=38, offset=10, temp_crnti=0x46
Disconnecting rnti=0x46.
RACH: tti=441, cc=0, pci=1, preamble=40, offset=10, temp_crnti=0x47

-----DL-----|-----U-----
-----
rat pci rnti cqi ri mcs brate ok nok (%) | pusch pucch phr mcs br
e ok nok (%) bsr
lte 1 47 n/a 0 6 7.3k 1 0 0% | 30.5 15.2 0 0 1
k 1 0 0% 0.0
Disconnecting rnti=0x47.

```

Figura 22. Ejemplo de conexión exitosa con BladeRF.

Adicionalmente, srsRAN proporciona estadísticas en tiempo real de la capa física a través de la consola del gNodeB. Durante la ejecución, se monitorizó la calidad del enlace radio consultando métricas clave que se imprimen periódicamente: RSRP (potencia de referencia recibida), RSRQ (calidad de recepción), SINR, CQI reportado por el UE, MCS utilizado, throughput estimado, entre otros. En la Figura 22 se aprecia una captura de

consola de una conexión exitosa usando la BladeRF, en la cual se listan estos parámetros por subtrama.

Finalmente, se llevaron a cabo pruebas de tráfico y se monitorizó el rendimiento de la conexión tanto en el gNodeB como en el UE. Utilizando la consola de srsRAN, se observaron las métricas de enlace en tiempo real. A modo de ejemplo, en la Figura 23. Ejemplo de registros obtenidos por muestra una captura de la consola srsRAN durante una sesión. A continuación, se interpretan algunos de los indicadores registrados para comprender la calidad de la comunicación:

pci	rnti	cqi	ri	mcs	brate	ok	nok	(%)	dl_bs	pusch	rsrp	ri	mcs	brate	ok	nok	(%)	bsr	ta	phr
10	4603	13	1.0	11	8.3k	17	0	0%	0	5.7	ovl	1	10	50k	11	0	0%	0	228n	-2
10	4603	13	1.0	0	0	0	0	0%	0	7.1	ovl	1	11	4.1k	1	0	0%	0	244n	-2
10	4603	13	1.0	0	0	0	0	0%	0	n/a	n/a	1	0	0	0	0	0%	0	229n	-2
-----DL-----																				
pci	rnti	cqi	ri	mcs	brate	ok	nok	(%)	dl_bs	pusch	rsrp	ri	mcs	brate	ok	nok	(%)	bsr	ta	phr
10	4604	10	1.0	11	6.9k	12	9	42%	0	5.5	ovl	1	8	21k	5	0	0%	0	2n	-5
10	4604	9	1.0	15	504	1	2	66%	0	5.0	ovl	1	1	1.7k	1	0	0%	0	225n	-4
10	4604	9	1.0	14	456	1	1	50%	0	4.6	ovl	1	1	6.3k	3	0	0%	0	219n	-5
10	4604	9	1.0	12	18k	12	11	47%	0	5.6	ovl	1	2	39k	18	0	0%	0	223n	-4
10	4604	9	1.0	10	640	2	1	33%	0	5.4	ovl	1	3	14k	4	0	0%	0	227n	-4
10	4604	10	1.0	0	0	0	0	0%	0	5.6	ovl	1	1	1.7k	1	0	0%	0	226n	-4
10	4604	9	1.0	10	320	1	0	0%	0	5.3	ovl	1	3	4.0k	1	0	0%	0	227n	-4
10	4604	9	1.0	0	0	0	0	0%	0	n/a	n/a	1	0	0	0	0	0%	0	210n	-4
10	4604	9	1.0	0	0	0	0	0%	0	n/a	n/a	1	0	0	0	0	0%	0	220n	-4
10	4604	9	1.0	11	3.8k	6	2	25%	0	5.1	ovl	1	2	17k	6	0	0%	0	228n	-4
10	4604	9	1.0	0	0	0	0	0%	0	4.9	ovl	1	2	4.5k	2	0	0%	0	266n	-4
-----DL-----																				
pci	rnti	cqi	ri	mcs	brate	ok	nok	(%)	dl_bs	pusch	rsrp	ri	mcs	brate	ok	nok	(%)	bsr	ta	phr
10	4604	9	1.0	0	0	0	0	0%	0	n/a	n/a	1	0	0	0	0	0%	0	212n	-4
10	4604	9	1.0	0	0	0	0	0%	0	n/a	n/a	1	0	0	0	0	0%	0	224n	-4
10	4604	9	1.0	11	3.3k	5	4	44%	0	5.5	ovl	1	2	21k	7	0	0%	0	238n	-4
10	4604	9	1.0	0	0	0	0	0%	0	n/a	n/a	1	0	0	0	0	0%	0	206n	-4
10	4604	9	1.0	0	0	0	0	0%	0	4.8	ovl	1	2	2.8k	1	0	0%	0	255n	-4
10	4604	9	1.0	0	0	0	0	0%	0	n/a	n/a	1	0	0	0	0	0%	0	217n	-4
10	4604	9	1.0	0	0	0	0	0%	0	6.0	ovl	1	1	1.7k	1	0	0%	0	250n	-4
10	4604	9	1.0	0	0	0	0	0%	0	4.7	ovl	1	3	4.0k	1	0	0%	0	223n	-4
10	4604	9	1.0	0	0	0	0	0%	0	n/a	n/a	1	0	0	0	0	0%	0	220n	-4
10	4604	9	1.0	0	0	0	0	0%	0	5.0	ovl	1	2	4.5k	2	0	0%	0	237n	-4
10	4604	9	1.0	0	0	0	0	0%	0	5.0	ovl	1	2	4.5k	2	0	0%	0	254n	-4
-----DL-----																				
pci	rnti	cqi	ri	mcs	brate	ok	nok	(%)	dl_bs	pusch	rsrp	ri	mcs	brate	ok	nok	(%)	bsr	ta	phr
10	4604	9	1.0	0	0	0	0	0%	0	n/a	n/a	1	0	0	0	0	0%	0	205n	-4
10	4604	9	1.0	7	18k	9	8	47%	0	5.0	ovl	1	2	48k	17	0	0%	0	198n	-5
10	4604	9	1.0	0	0	0	0	0%	0	n/a	n/a	1	0	0	0	0	0%	0	191n	-5
10	4604	9	1.0	0	0	0	0	0%	0	4.6	ovl	1	1	1.7k	1	0	0%	0	228n	-5
10	4604	9	1.0	0	0	0	0	0%	0	4.5	ovl	1	1	3.5k	2	0	0%	0	235n	-5
10	4604	9	1.0	0	0	0	0	0%	0	4.4	ovl	1	1	3.5k	2	0	0%	0	222n	-5
Late: 0; Underflow: 1; Overflow: 0;																				
10	4604	9	1.0	0	0	0	0	0%	0	n/a	n/a	1	0	0	0	0	0%	0	211n	-5
10	4604	9	1.0	0	0	0	0	0%	0	4.4	ovl	1	1	3.5k	2	0	0%	0	239n	-5
10	4604	9	1.0	0	0	0	0	0%	0	n/a	n/a	1	0	0	0	0	0%	0	229n	-5
10	4604	9	1.0	0	0	0	0	0%	0	4.3	ovl	1	1	1.7k	1	0	0%	0	217n	-5
10	4604	9	1.0	0	0	0	0	0%	0	n/a	n/a	1	0	0	0	0	0%	0	209n	-5
-----DL-----																				
pci	rnti	cqi	ri	mcs	brate	ok	nok	(%)	dl_bs	pusch	rsrp	ri	mcs	brate	ok	nok	(%)	bsr	ta	phr
10	4604	9	1.0	7	4.4k	9	12	57%	0	5.0	ovl	1	2	31k	14	0	0%	0	234n	-6

Figura 23. Ejemplo de registros obtenidos por la Blade(logs).

Métricas de DownLink(DL) desde la estación base hacia el UE:

- Channel Quality Indicator (CQI): El valor registrado es constante en 15, lo que corresponde a la máxima calidad de canal reportada por el UE. Este valor indica que el terminal percibe un canal libre de interferencias y con condiciones óptimas de propagación, permitiendo el uso de esquemas de modulación y codificación de alta eficiencia.

Capítulo 3: Despliegue de red 5G usando SDR

- Rank Indicator (RI): Con un valor fijo de 1, la transmisión se está realizando en modo SISO (Single Input Single Output), es decir, sin explotación de técnicas MIMO. Esto puede ser debido a la configuración del gNodeB o a limitaciones del UE utilizado en las pruebas.
- Modulation and Coding Scheme (MCS): El valor observado, 19, se traduce generalmente en una modulación 64-QAM con una tasa de codificación elevada. Esta configuración es coherente con las buenas condiciones de canal derivadas del CQI máximo.
- Bitrate (brate): Las tasas de transferencia descendente varían entre 5,1 kbps y 87 kbps. En una de las instancias se registra un pico de 87 kbps, aunque acompañado de un incremento de errores (nok=33, 2%).
- Errores (nok): En algunos intervalos aparecen porcentajes de error relativamente elevados, destacando un 81% en uno de los periodos. Esto podría estar asociado a congestión momentánea del búfer, errores en la codificación o pérdidas en la capa física debidas a fluctuaciones de la potencia de señal.
- Reference Signal Received Power (RSRP): Los valores oscilan entre -36,4 dBm y -47,2 dBm, lo cual se considera una potencia excelente en el contexto de pruebas de laboratorio o entornos controlados

Métricas de UpLink(UL) desde la el UE base hacia la estación base:

- MCS (UL): El esquema de modulación y codificación en UL varía dinámicamente entre 0 y 17, ajustándose en función de la calidad percibida en sentido ascendente.
- Bitrate (brate): Se han registrado tasas de subida desde 4,2 kbps hasta un máximo puntual de 121 kbps, evidenciando un comportamiento variable.
- Errores (nok): En general los errores de subida son bajos, salvo un caso aislado donde se observa un 32% de fallos, lo que podría estar relacionado con la saturación de búfers o interferencias momentáneas.
- Timing Advance (TA): Los valores de TA se sitúan en torno a 300n, lo que indica que el UE se encuentra a una distancia media de la estación base.

Capítulo 3: Despliegue de red 5G usando SDR

- Power Headroom Report (PHR): Se observan márgenes de potencia positivos (ej. 4 dB), lo que indica que el UE aún dispone de capacidad para aumentar su potencia de transmisión si fuese necesario.

4. Construcción de cámara semianecoica

4.1 Requisitos

El diseño de la cámara planteó desde un inicio una serie de requerimientos fundamentales. En primer lugar, exigía un diseño portátil, lo suficientemente rígido como para soportar el peso de las espumas absorbentes, pero a la vez ligera para facilitar su desplazamiento dentro de la universidad. De igual manera, era necesario introducir material o cables a través de aperturas controladas, sin comprometer el aislamiento electromagnético del interior. La idea inicial era, haber metido cables blindados, por donde tampoco hubiese pérdidas, pero, se llegó a la conclusión de que no era estrictamente necesario.

4.2 Diseño y simulación de la cámara SAC

Las SAC se diferencian de las cámaras anecoicas completamente (FAC, *full anechoic chamber*) en que el suelo no está cubierto de absorbentes electromagnéticos, sino que permanece reflectante o parcialmente apantallado. Esta configuración es adecuada para nuestro caso porque los requisitos experimentales son menos exigentes que los estándares de ensayo completos[15]:

- Operar en frecuencias entre 500MHz y 6 GHz, cubriendo las bandas principales de 4G y 5G.
- Despreciar los efectos parásitos debido a que, al trabajar en estas frecuencias, las reflexiones internas son despreciables en comparación con las longitudes de onda implicadas.
- Permitir probar que las emisiones de los dispositivos cumplen los estándares internacionales de emisiones radioeléctricas[18].
- Conseguir la mayor velocidad de la red sin interferencias externas.

Las frecuencias a las que se van a trabajar son en las de trabajo de 4G, inicialmente. Siendo bajo y medio espectro (entre 300 MHz y 3.8 GHz)

- Bajo: Banda 5 (850 MHz), Banda 12 (700 MHz), Banda 20 (800 MHz).
- Medio: Banda 1 (2100 MHz), Banda 3 (1800 MHz), Banda 7 (2600 MHz).

Para 5G evolucionaríamos a tener 3 bandas, diferenciando entre espectro: bajo, medio y alto. Permitiendo combinar cobertura, velocidad y capacidad:

- Bajo: Gran cobertura, pero velocidades más bajas.
- Medio: entre 1 y 6 GHz, incluye la banda C (3.5 GHz)
- Espectro alto: con longitudes de onda de mm: 24Ghz a 52GHz: con cobertura limitada.

4.1 Utilizamos el rango medio, debido a la compatibilización con el terminal de prueba y, después de hacer el estudio adecuado para ello como se ve en la sección 5.1 Introducción

Explicar aquí qué se va a hacer en este capítulo, en que orden y por qué, porque empezar con validación de cobertura en banda 78 sin saber por qué sí ni por qué no, parece poco científico.

En este capítulo se presentan los distintos ensayos realizados para validar el funcionamiento de la red 5G desplegada y para analizar su rendimiento en diferentes escenarios. Las pruebas incluyen estudios de cobertura, comparativas de parámetros de red frente a tecnologías anteriores como 4G, y análisis técnicos como la potencia de transmisión, con el objetivo de evaluar la capacidad real de sistema implementado.

Las pruebas se han llevado a cabo en entornos controlados, utilizando equipos comerciales y herramientas de análisis de red, se comienza relatando estudio de la banda n78 (3,5 GHz), por ser una de las principales bandas utilizadas para el despliegue de redes 5G en Europa.

Validación de cobertura en banda 78.

El diseño de la cámara conforma la parte más compleja del proyecto, al ser un ámbito el cual no es usual en mi entorno. Utilizamos herramientas, sencillas de implementar, como es TinkerCad[38] para desarrollar una primer diseño virtualizado Figura 24 .

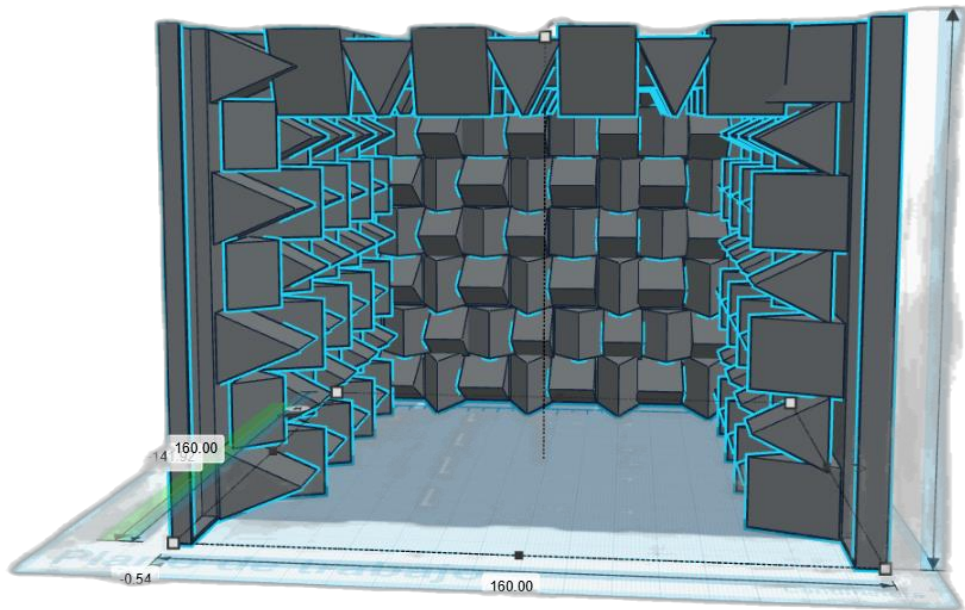


Figura 24. Primera versión de la SAC.

Las espumas absorbentes miden 60x120 cm [5] y, utilizamos dos por pared, por lo que tenemos unas paredes de 120x120 cm, sin embargo, la estructura de la cámara mide 160cm, como se aprecia en la Figura 24. Esto se debe a que, para resolver los huecos en las esquinas, ha sido necesario ampliar la estructura hasta alcanzar unas dimensiones de 160x160x120cm. Esta solución se identificó durante el diseño, ya que se vio necesario que hubiese prismas con espacio de 17,5 x 17,5 x 120cm, de forma que se evitase el choque entre los conos adyacentes en las esquinas.

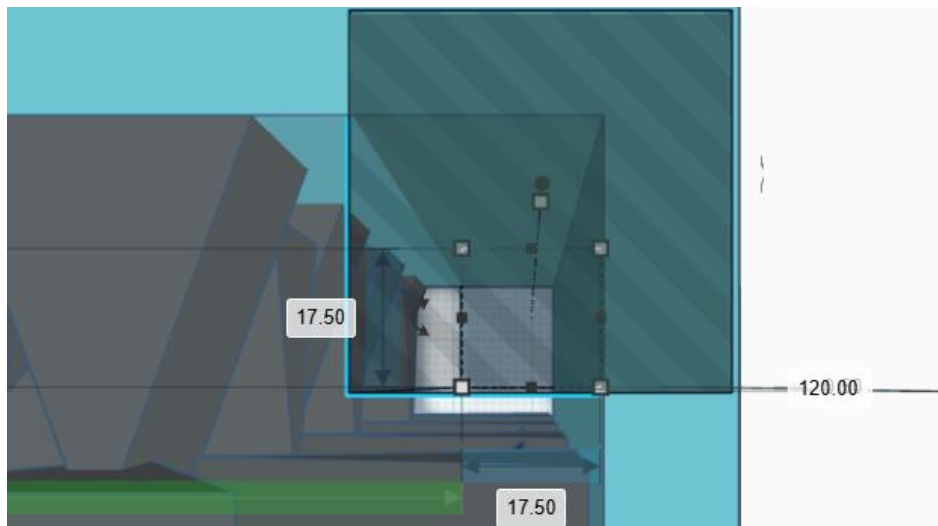


Figura 25. Vista superior de las esquinas.

Con ello, si se hace la cuenta, debería medir 155 cm, pero, los conos están apoyados en unos listones, que mide 2'5 cm, por lo que agrega 5 cm en total, llegando a las 160 iniciales.

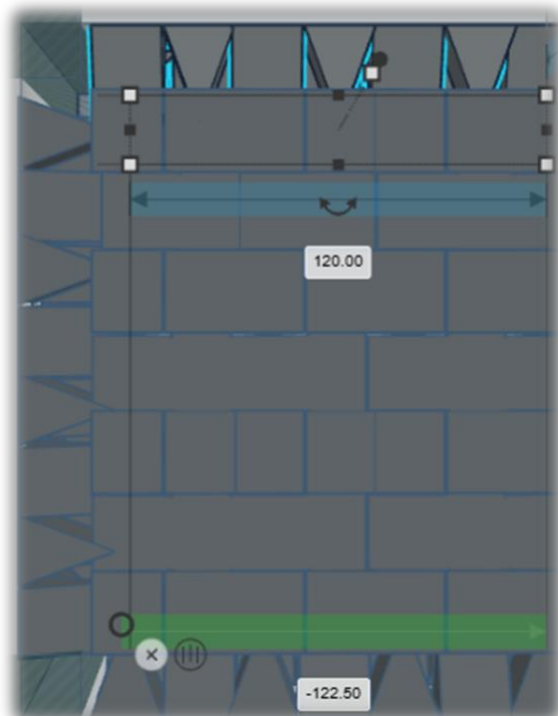


Figura 26. Explicación de los cm extras necesarios.

Una vez resuelta la cuestión de las dimensiones de la cámara, debemos enfrentarnos a cómo vamos a unir todos los materiales que forman parte de la misma.

Hay que tener en cuenta que no solo es disponer las espumas atenuadoras, sino que también hay que construir una caja de Faraday cuyo material principal son planchas metálicas. La explica perfectamente todos los elementos que nuestra cámara va a tener. Desde el exterior hacia el interior, la estructura se compone de tres elementos principales. En primer lugar, una envolvente de acero galvanizado de 0,4 mm de grosor que formará la jaula de Faraday, garantizando el aislamiento electromagnético frente a señales externas. Sobre esta superficie metálica se colocan listones de madera (dimensiones $120 \times 2,5 \times 5$ cm) que sirven como soporte para fijar un perfil metálico de $2,5 \times 2,5$ cm. Con estos perfiles se crea la estructura de la caja y ayudarán mantener la integridad estructural. Finalmente, en la cara interna, se dispone la espuma absorbente Comtest de poliestireno de célula cerrada, diseñada para atenuar ondas electromagnéticas en un rango amplio (70 MHz – 40 GHz) [5]. Cada pared se construye con dos planchas de espuma de 120×60 cm, asegurando una cobertura continua. Cada pared tendrá por lo tanto cuatro perfiles,

dos de 160 cm que forman el ancho total de la pared de la caja, que van en horizontal y que además sostienen en su lugar la espuma, y otros dos perfiles en vertical, pegados a la espuma, de longitud total 120 cm y que ayudan a dar integridad estructural a la pared. Los perfiles se unen entre sí mediante escuadras. Cada pared, a su vez, se une a través de los perfiles horizontales también con escuadra, formando la caja deseada. Dado que el material utilizado no es el idóneo para este tipo de construcciones, en las esquinas que formaban las paredes quedaban huecos importantes. Estos huecos se sellan con cinta metálica de aluminio para evitar fugas de señal. Este diseño modular y ligero permite, además, la portabilidad de la cámara dentro del entorno universitario y facilita el acceso a su interior para introducir o retirar material durante las pruebas.



Figura 27. Alzado de cámara de vista lateral.

4.2 Justificación de la elección

La decisión de optar por una cámara semianecoica se fundamenta en la necesidad de disponer de un entorno electromagnético controlado que permita garantizar la fiabilidad y reproducibilidad de las pruebas realizadas sobre la red 5G desplegada, la explicamos en profundidad previamente. Con el objetivo de optimizar los recursos disponibles y abaratar costes, se ha desarrollado un prototipo de cámara semianecoica de bajo coste, diseñado mediante una arquitectura de pruebas sencilla pero eficaz. Esta arquitectura se ha concebido para ser fácilmente implementable y modular, de manera que permita la adaptación de la cámara a distintas configuraciones según las necesidades experimentales

y, además, facilite su desplazamiento o reubicación en caso de ser necesario. Gracias a este planteamiento, ha sido posible no solo ajustar la cámara a las dimensiones requeridas para el entorno de pruebas, sino también validar de forma eficaz la calidad de la red móvil desplegada en condiciones controladas, garantizando así la integridad de los resultados obtenidos.

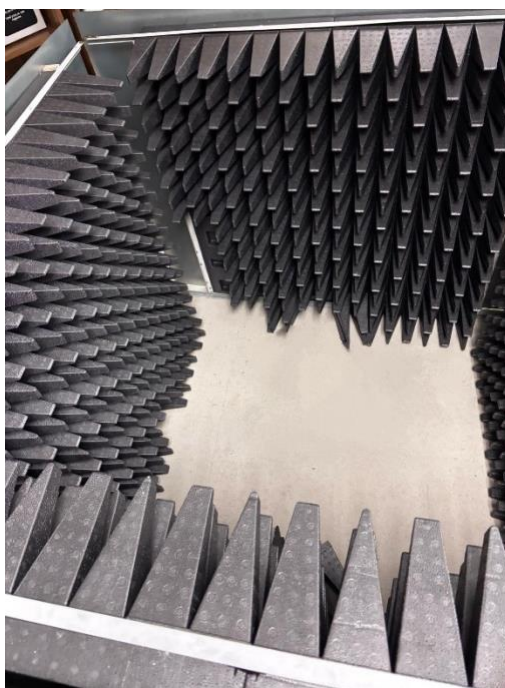


Figura 28. Cámara final sin tapa.

La estructura final de la cámara, representada en la Figura 29, muestra el diseño adoptado, incluyendo la distribución de los elementos absorbentes, la disposición de los dispositivos de medición y la integración de los equipos de red necesarios para las pruebas.

Finalmente, la metodología de desarrollo en fases ha permitido, modificar ciertos aspectos, como puede ser el reforzar la tapa para que las espumas no blandiesen la estructura, o, la introducción de agarres, para una mejor movilidad de la tapa también.



Figura 29. Izquierda, cámara abierta. Derecha, vista de la cámara final.

5. Evaluación y tests

5.2 Introducción

Explicar aquí qué se va a hacer en este capítulo, en que orden y por qué, porque empezar con validación de cobertura en banda 78 sin saber por qué sí ni por qué no, parece poco científico.

En este capítulo se presentan los distintos ensayos realizados para validar el funcionamiento de la red 5G desplegada y para analizar su rendimiento en diferentes escenarios. Las pruebas incluyen estudios de cobertura, comparativas de parámetros de red frente a tecnologías anteriores como 4G, y análisis técnicos como la potencia de transmisión, con el objetivo de evaluar la capacidad real de sistema implementado.

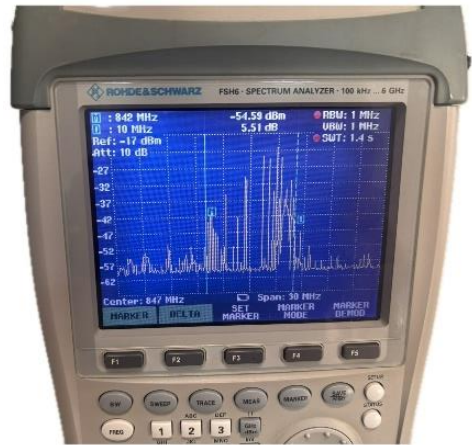
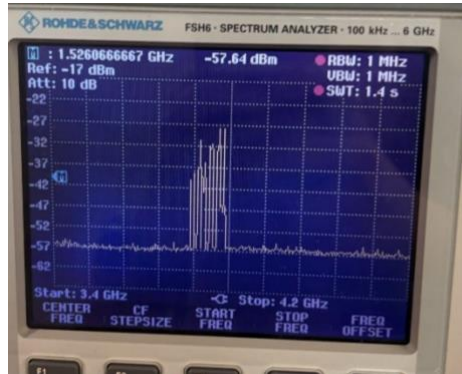
Las pruebas se han llevado a cabo en entornos controlados, utilizando equipos comerciales y herramientas de análisis de red, se comienza relatando estudio de la banda n78 (3,5 GHz), por ser una de las principales bandas utilizadas para el despliegue de redes 5G en Europa.

5.3 Validación de cobertura en banda 78

Comenzamos, con un barrido del espectro utilizando un analizador de espectros Rohde & Schwarz FSH6, con un rango de lectura entre 100 kHz y 6 GHz, mediante el que se hizo un amplio reconocimiento de las bandas a utilizar. El detalle de este estudio se encuentra en el Anexo IV

Tabla 7 Ocupación de bandas observadas con el analizador de espectros

Banda observada	Espectro visualizado
-----------------	----------------------

N20	
N78	
N5: vemos como la banda no está ocupada.	

Se identifican comportamientos claramente diferenciados en las bandas 5G evaluadas. En primer lugar, la banda N20 presenta un ancho de banda aproximado de 10 MHz, típico en despliegues DSS (Dynamic Spectrum Sharing), con una ocupación continua, aunque relativamente baja, propia del tráfico de control y señalización en bandas bajas.

Por su parte, la banda N78, situada en la franja de 3.5 GHz, muestra una ocupación constante y sostenida durante la prueba, lo que concuerda con el hecho de que se estaba descargando un vídeo en el terminal durante la captura. Esto confirma que esta banda está siendo utilizada activamente.

Acabamos con la banda n5, que corresponde a 824MHz con especificaciones de uso para y se encuentra armonizada para su uso en tecnologías IMT (International Mobile Telecommunication),

5.4 Comparativa de rendimiento 4G vs 5G

La caracterización del rendimiento de la red, la realizamos a partir de tres métricas principales: **latencia**, **jitter** y **throughput** (rendimiento máximo). A partir de estos parámetros, se ha realizado una comparativa con los datos obtenidos en el Trabajo Fin de Máster de Ignacio Royuela, lo que permite observar la evolución en el rendimiento de las redes móviles. Los resultados muestran cómo la red 5G es capaz de alcanzar valores significativamente superiores en términos de capacidad y estabilidad respecto a LTE, especialmente en escenarios de descarga intensiva. Además, se ha evaluado el impacto de realizar las pruebas en un entorno de experimentación controlado, como una cámara semianecoica, para garantizar la consistencia de las mediciones y reducir la influencia de interferencias externas.

Para realizar las pruebas de rendimiento, configuramos el servidor *iperf3* en el núcleo 5G (UPF/Open5GS) y el cliente en el gNodeB (srsRAN). Esta disposición permite evaluar el comportamiento de la red en sentido ascendente, midiendo métricas como *throughput*, latencia y *jitter* desde el acceso radio hasta el núcleo. Al situar el servidor en el Core, se facilita además la recolección de resultados en un punto central de la red, representativo del flujo de datos en aplicaciones donde el usuario envía tráfico hacia servicios externos.

La evolución de 4G LTE-*Advanced* (LTE-A) hacia 5G ha supuesto una mejora significativa en los parámetros clave de las redes móviles, especialmente en términos de velocidad de transferencia y latencia. Mientras que LTE-A ofrecía velocidades de hasta 1 Gbps en el enlace descendente en condiciones ideales y una latencia media de 30–50 ms, la quinta generación de redes móviles (5G) eleva estos valores gracias a la introducción de tecnologías como eMBB (*enhanced Mobile Broadband*) y URLLC (*Ultra-Reliable Low-Latency Communications*).

5G permite velocidades de descarga superiores a 10 Gbps en entornos controlados y una latencia ultra baja inferior a 1 ms en escenarios críticos, como la conducción autónoma o las aplicaciones de realidad aumentada. Estas mejoras son posibles gracias al uso de espectro adicional en bandas de frecuencia más altas (incluyendo *mmWave*) y la

incorporación de técnicas avanzadas como MIMO masivo. En nuestro caso, no utilizamos estas bandas debido a la limitación de la SDR utilizada.

En este trabajo se realiza una comparativa experimental entre las tecnologías 4G y 5G, midiendo parámetros como el *throughput* y la latencia tanto en un entorno abierto como dentro de una cámara semianecoica para evaluar el impacto de las condiciones controladas en la transmisión de datos.

Tomando como referencia los datos que se obtuvieron en el TFM de Ignacio Royuela[1], hemos podido realizar la siguiente tabla comparativa, con valores teóricos y medidos en ambas redes, tanto 4G como 5G.

Para este caso se ha implementado una red **5G StandAlone** operando en la banda n78 de 5G NR(TDD), muy utilizada para despliegues 5G por su buen equilibrio entre cobertura y capacidad.

La herramienta para medir ha sido **iperf3**, un estándar ampliamente reconocido en la evaluación de redes, capaz de generar tráfico TCP/UDP y medir el rendimiento extremo a extremo entre cliente y servidor.

Tabla 8 Comandos de iperf3 utilizados

Objetivo	Comando ejemplo
Medir caudal subida	<code>iperf3 -c <IP_SERVIDOR></code>
Medir caudal descarga	<code>iperf3 -c <IP_SERVIDOR> -R</code>
Medir estabilidad TCP	<code>iperf3 -c <IP_SERVIDOR> -t 60</code>
Medir latencia y <i>jitter</i>	<code>iperf3 -c <IP_SERVIDOR> -u -b 10M -t 60</code>
Comprobar RTT puntual	<code>ping <IP_SERVIDOR></code>

El primer paso es empezar a escuchar en el servidor en puerto 5201 para aceptar conexiones entrantes. El servidor se queda en espera hasta que un cliente se conecta. Los comandos que se ejecutan desde el cliente son: (ver Tabla 8) ejecutar una prueba TCP, aumentar el tiempo de prueba, medir UDP en lugar de TCP, para quitar el tiempo de establecimiento de conexión y finalmente medimos *jitter* y latencia. Para este último dato,

es una buena idea comprobar mediante ping la latencia puntual, porque no solo complementa iperf3, sino también porque muestra la latencia instantánea (RTT) en ms.

```

lorena@lorena-Modern-15-ASM:~$ iperf3 -c 10.45.0.1 -u -b 10M -t 10
Connecting to host 10.45.0.1, port 5201
[ 5] local 10.45.0.11 port 40022 connected to 10.45.0.1 port 5201
[ ID] Interval           Transfer     Bitrate     Total Datagrams
[ 5] 0.00-1.00 sec      662 KBytes  5.42 Mbits/sec  504
[ 5] 1.00-2.00 sec      186 KBytes  1.52 Mbits/sec  141
[ 5] 2.00-3.00 sec      124 KBytes  1.01 Mbits/sec   94
[ 5] 3.00-4.00 sec      124 KBytes  1.01 Mbits/sec   94
[ 5] 4.00-5.00 sec      124 KBytes  1.01 Mbits/sec   94
[ 5] 5.00-6.00 sec      124 KBytes  1.01 Mbits/sec   94
[ 5] 6.00-7.00 sec      124 KBytes  1.01 Mbits/sec   94
[ 5] 7.00-8.00 sec      124 KBytes  1.01 Mbits/sec   94
[ 5] 8.00-9.00 sec      124 KBytes  1.01 Mbits/sec   94
  
```

Figura 30. Medida más utilizada de las de iperf3.

Latencia

La latencia es el tiempo que tarda un paquete en ir desde el emisor al receptor y volver. Es una métrica crítica porque determina la capacidad de respuesta de la red. En redes móviles, la latencia depende de varios factores:

1. Los retardos en la red IP.
2. El tiempo de procesamiento en el núcleo de red (5GC en 5G).
3. El tiempo de transmisión sobre la interfaz radio (RAN).

Arquitectura de red implementada para el despliegue del sistema 5G. Se distinguen tres bloques funcionales: (1) la red de gestión y acceso, (2) el nodo que alberga el núcleo 5G (CORE) y (3) el nodo de acceso radio (eNB/gNB) con su correspondiente interfaz SDR (BladeRF), conectada al módem 5G.

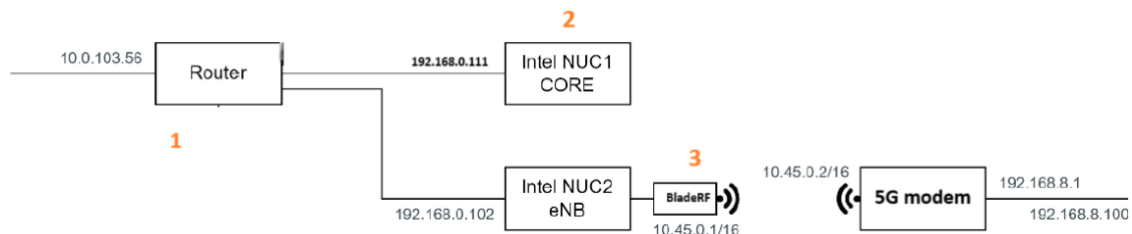


Figura 31. Arquitectura de la red con IPd.

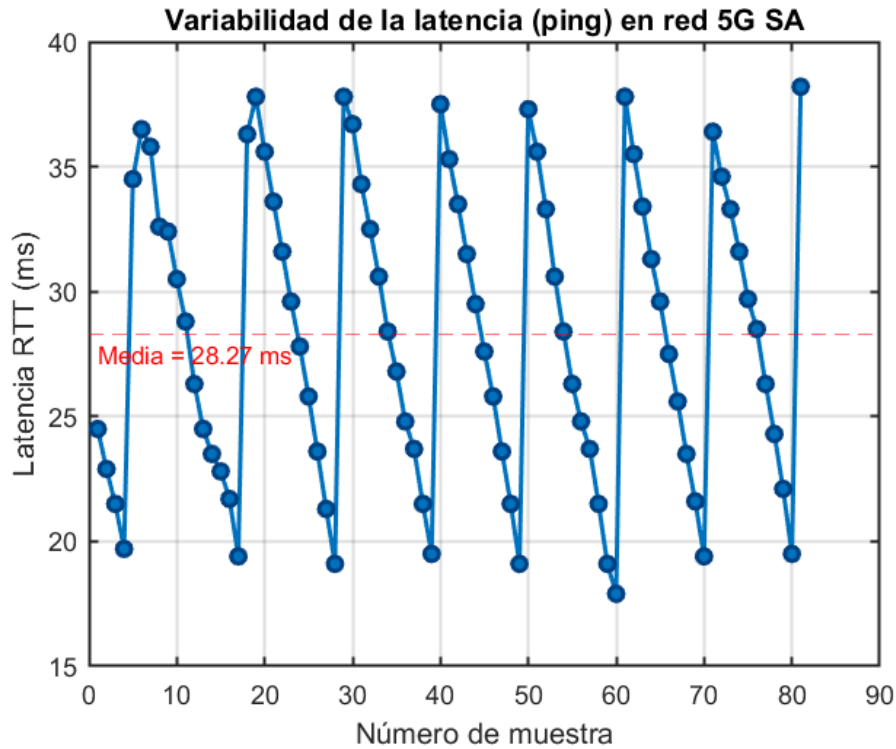


Figura 32. Comportamiento de DRX en redes 5G.

Las latencias observadas (~20–30 ms de promedio, mínimas ~18 ms) están por encima de lo que sería el mínimo teórico absoluto de 5G, pero son coherentes con las limitaciones de la plataforma empleada y la inclusión de una red extendida. En especificaciones 3GPP, la latencia objetivo para servicios eMBB (banda ancha móvil mejorada) es del orden de 8 ms de tiempo de ida y vuelta (RTT), e incluso ~1 ms RTT para casos URLLC de baja latencia extrema. Esos números ideales asumen condiciones óptimas: trama corta, dispositivos con *hardware* dedicado y núcleo muy cercano (por ejemplo, en *edge*). En nuestro escenario, varios factores elevan la latencia real:

- Trama y programación en 5G NR:** La red está configurada en modo TDD con una subtrama de ~5 ms (30 kHz SCS). En este formato, la propia ventana de *scheduling* introduce de ~6,5 a 11,5 ms de espera en el ciclo[8]. Esto significa que un paquete *uplink* puede tardar varios milisegundos en ser asignado a un intervalo UL, y lo mismo para la respuesta en DL, dependiendo de la sincronización con la trama. Aunque 5G soporta configuraciones más rápidas (por ejemplo, trama de 2,5 ms con SCS más alto, reduciendo la latencia de programación a ~3,5–6 ms), en la práctica srsRAN y el UE deben soportar esas opciones. Con la configuración usada (banda n78, SCS 30 kHz), una parte significativa de la RTT (quizás ~7–12 ms) proviene solo de esperar los intervalos adecuados para envío UL/DL.

- **Procesamiento *software* (SDR) en RAN:** Tanto el *gNB* (*srsRAN*) como, en menor medida, el UE (módem Telit) tienen retardos de **procesamiento de señal**. *srsRAN* al ser una implementación *software* en CPU general, añade latencia al codificar/decodificar las tramas NR. Estudios han señalado que el uso de una plataforma SDR sin aceleración *hardware* dedicada es un factor limitante clave para la latencia en 5G. Cada paquete debe pasar por la capa física (PHY) del *gNB* y del UE, y esos procesos (modulación, demodulación, codificación, etc.) introducen retrasos adicionales de varios milisegundos en cada extremo.
- **Transporte por red IP (núcleo remoto):** Al tener el núcleo 5G (AMF/UPF de Open5GS) comunicado vía Internet con el *gNB*, se añade latencia de propagación y encaminamiento. Incluso con una buena conexión, el *round-trip* entre el sitio del *gNB* y el servidor núcleo puede sumar ~5–15 ms extra. Esta es una diferencia respecto a un despliegue totalmente local, donde *gNB* y *Core* podrían comunicarse en <1 ms por LAN. En nuestro caso, parte de la variabilidad (picos de ~35 ms) puede atribuirse a fluctuaciones en la ruta IP pública. El ***jitter* de red** hace que algunas tramas experimenten mayor retraso que otras en llegar al destino y volver. Asimismo, si el destino final del ping estaba en Internet (no dentro de la red local/*Core*), entonces la ruta del paquete incluyó todavía más tramo por Internet, incrementando el RTT.

En conclusión, la latencia medida en este entorno experimental 5G SA refleja un equilibrio entre la flexibilidad de utilizar soluciones abiertas y el rendimiento alcanzable con ellas. Con una latencia media aproximada de **28 ms**, para un ejemplo fuera de la cámara, y de 13 ms, dentro de ella, la red demuestra ser adecuada para casos de uso habituales de acceso a Internet móvil, aunque existe margen de optimización para acercarse a los objetivos más ambiciosos de 5G en términos de latencia mínima.

Durante las mediciones, se observó un patrón periódico en el que la latencia disminuye significativamente durante ciertos intervalos, coincidiendo con momentos en que la red alcanza mayores velocidades de transferencia. En 5G NR, la trama de radio se divide en subtramas y *slots*, que son las unidades temporales donde se programan las transmisiones. La duración de un *slot* depende del espaciado de subportadora (SCS): a mayor SCS (30, 60, 120 kHz), los *slots* son más cortos y permiten programar más transmisiones por segundo, lo que es clave para reducir la latencia. En escenarios como el nuestro, se

utilizan *slots* relativamente grandes y no se priorizan tramas de baja latencia, lo que puede contribuir a aumentar el RTT observado.

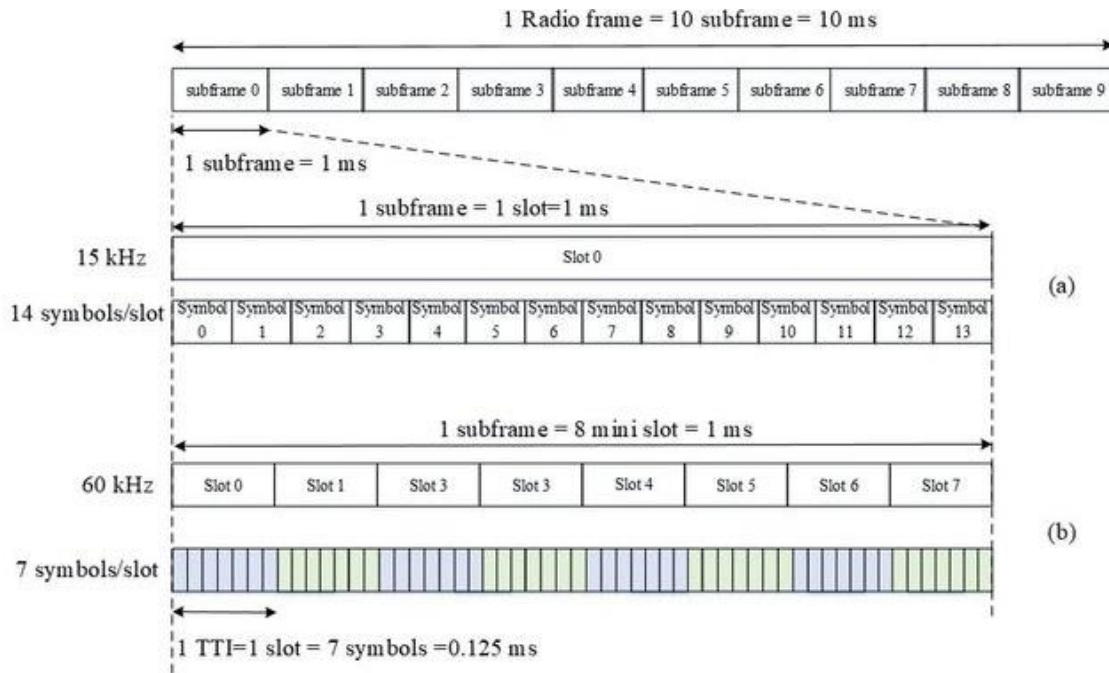


Figura 33. Explicación de retardo obtenido en función del espaciamiento entre subportadoras[44].

Adicionalmente, otro factor que podría explicar las oscilaciones periódicas en la latencia es el uso de Discontinuous Reception (DRX) en el dispositivo. Este mecanismo permite al UE entrar en ciclos de suspensión para ahorrar batería, despertando periódicamente para comprobar si hay datos en el canal de control. Si un paquete llega durante un ciclo de suspensión, debe esperar hasta que el UE vuelva a activarse, introduciendo una latencia adicional. Por tanto, se identifican dos posibles causas complementarias para el patrón observado en la figura: la programación de los paquetes en distintos *slots* y el impacto del **DRX** en la recepción.

Con una arquitectura basada en *srsRAN* y *Open5GS* sobre *hardware* SDR en un entorno de laboratorio, evidenciando tanto el potencial de estas tecnologías abiertas como las áreas en las que aún pueden evolucionar para cumplir plenamente con las expectativas de la quinta generación de redes móviles.

Jitter

Es la variación en la latencia entre paquetes consecutivos. Mide cuánto varía el tiempo de llegadas de los paquetes respecto a un intervalo ideal. Es por tanto el retardo variable de la red[39]

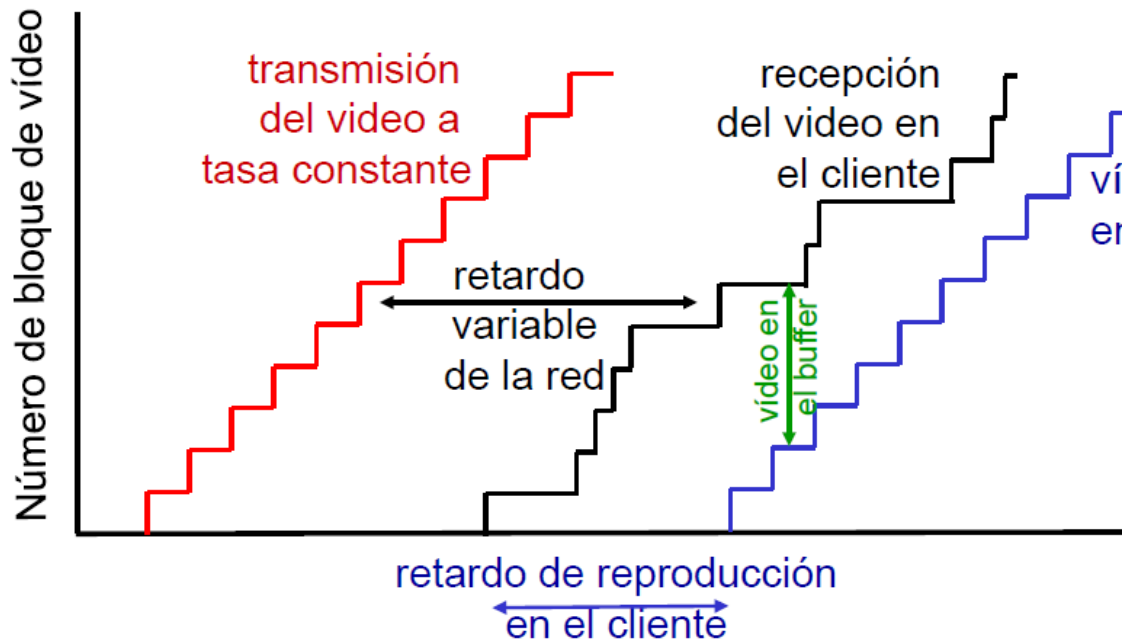


Figura 34. Explicación de Jitter

En nuestro caso utilizamos iperf3 para medir el jitter, es fiable, pero hay que entender bien lo que significa este dato. El jitter en este caso es la variación del tiempo de llegada de paquetes UDP medida en el servidor, en este caso 10.45.0.1.

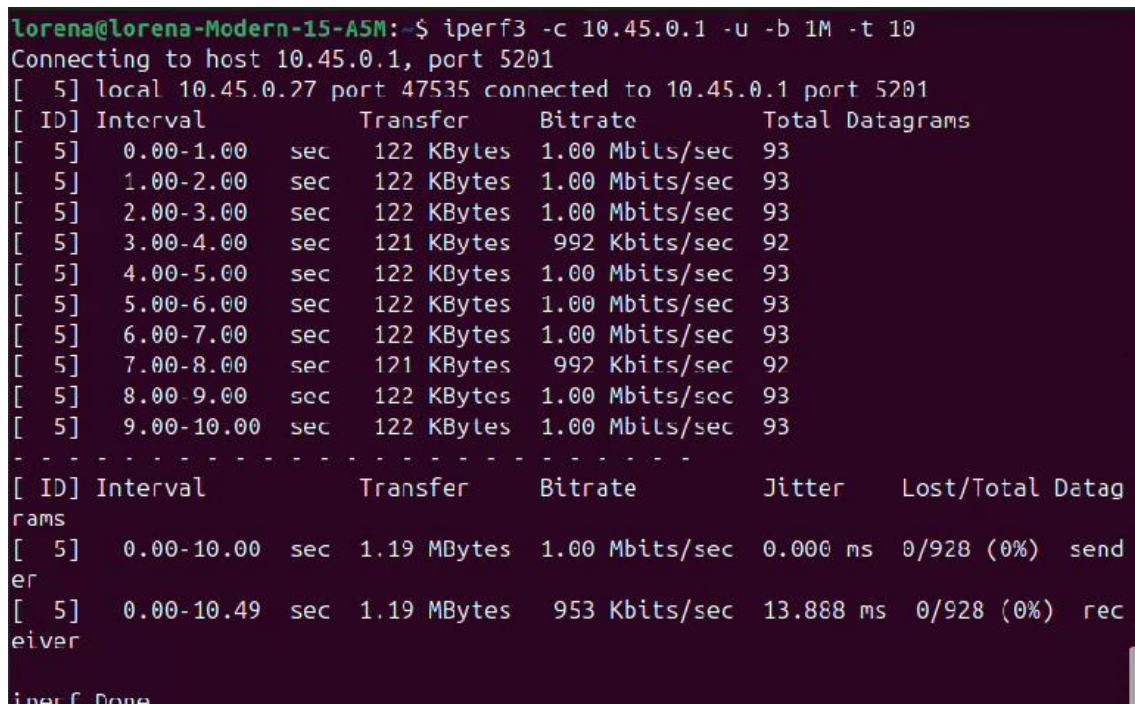


Figura 35. Resultados obtenidos con iperf3, donde se visualiza el jitter.

Para 5G, este valor de *jitter* resulta elevado, ya que en condiciones óptimas debería situarse por debajo de **5 ms**. Una posible explicación es que las variaciones observadas se vean amplificadas por fluctuaciones en la red pública, lo que introduce una mayor

inestabilidad en la entrega de paquetes. Concluimos con que el *jitter* medido fue de **13,88ms**, este apartado no se puede comparar con el TFM de Ignacio Royuela, ya que, ese trabajo se encarga de todo el procesamiento y la medición e incluye tanto la red como el sistema completo. Sin embargo, en este trabajo la latencia se ha medido únicamente en la red.

Throughput

El rendimiento máximo es la cantidad de datos que la red puede transmitir en un tiempo determinado, medido normalmente en Mbps (Megabits por segundo). Representa la capacidad efectiva de la red para enviar y recibir datos. Analizamos este parámetro observando tests de velocidad de la red, y, mediante *iperf*.

La observación de los datos obtenidos es importante, pero, más lo es, saber qué capacidad podemos llegar a obtener con la instrumentación y elecciones obtenidas. Para obtener este dato, tanto en LTE como en 5G NR, hay varios conceptos clave que conviene entender. Empezamos con el ancho de banda, define cuántos datos podemos transmitir por segundo y está directamente relacionado con los PRBs (Physical Resource Blocks), que son los bloques básicos de recursos en la red. En LTE, con un ancho de banda de 20 MHz podemos obtener hasta 100 PRBs, lo que permite alcanzar tasas teóricas de hasta 100 Mbps. Este dato se obtiene de que, cada PRB tiene 12 subportadoras y 7 símbolos en 0,5 ms, es decir, 84 símbolos por slot. Si usamos 6 bits por símbolo:

$$84 \text{ símbolos} \times \frac{6 \text{ bits}}{\text{símbolo}} = 504 \frac{\text{bits}}{\frac{\text{PRB}}{\text{slot}}}$$

Cada subtrama dura 1ms, es decir 2 slots, por lo que obtenemos $1008 \frac{\text{bits}}{\frac{\text{PRB}}{\text{slot}}}$

Con 100 PRBs simultáneos (máximo uso posible de Physical Resource Blocks simultáneo en LTE) obtendríamos 100,8 Mbps. Es decir, con 64-QAM, LTE a 20 MHz puede alcanzar un throughput máximo teórico de ~100.8 Mbps.

Para 5G, el cálculo es similar, pero hay diferencias importantes por el uso de Subcarrier Spacing (SCS) variable (15, 30, 60, 120, 240 kHz), y por el mayor número de PRBs en un canal de 20 MHz porque el tamaño de este cambia según el SCS. Tras hacer los cálculos oportunos, para:

- Ancho de banda (BW): 20 MHz

- SCS: 15 kHz (típico para eMBB)[40]
- No_PRB:50
- Modulación: 64-QAM (6 bits/símbolo)
- Número de antenas MIMO: 2x2
- Obtenemos un Throughput Máximo de 56,368 Mbps[41]

Calculated Throughput Max (Mbps): **56.368**

INPUT DATA

Enter the MCS index

15

v(j)Layers
(maximum
number of MIMO
layers)

Nprb
Total number of
allocated PRBs for
the UE

Numerology - Subcarrier Spacing (μ)
configuration

☒ 0: μ :15kHz
☐ 1: μ :30kHz
☐ 2: μ :60kHz
☐ 3: μ :120kHz
☐ 4: μ :240kHz

Select a 5G NR table from 38.214
(depends on DCI, C-RNTI, etc)

38.214-Table 5.1.3.1-2
▼

Modulation Order Qm

6

Figura 36. Rendimiento teórico obtenido.

Internet speed test
×

34.9
Mbps download

2.55
Mbps upload

Latency: 16 ms

Server: Madrid

Your Internet connection is fast.

Your Internet connection should be able to handle multiple devices streaming HD videos at the same time.

LEARN MORE
TEST AGAIN

Feedback

Figura 37. Speedtest realizado.

En las pruebas realizadas sobre la red 5G NR dentro de la cámara SAC, se ha obtenido un *throughput* efectivo de 34,9 Mbps en *downlink* y 2,55 Mbps en *uplink*. Estos valores, medidos con una herramienta sencilla como el *speedtest* de Google, reflejan el rendimiento real alcanzado, suponiendo un 61,9 % de la capacidad máxima en un escenario con ciertas limitaciones.

Por su parte, los resultados obtenidos en LTE, según el Trabajo Fin de Máster de Ignacio Royuela, muestran un *throughput* efectivo, de 24 Mbps[42]. Esta comparativa evidencia la mejora en eficiencia espectral y gestión de recursos que aporta 5G frente a 4G, y además abre un campo de estudio, ya que se podría profundizar en este tema y mediante la variación de los diferentes parámetros, conseguir una mejor eficiencia de la red.

Finalmente, en la Tabla 9 Tabla 8 observamos que los resultados obtenidos para 5G son superiores a los datos registrados en 4G. No obstante, cabe destacar que la velocidad de la red es mayor fuera de la cámara que en su interior, probablemente debido a que las reflexiones externas refuerzan la señal, mientras que en la cámara semianecoica estas se eliminan y pueden producirse ligeras pérdidas.

Tabla 9 Resultados finales

	Latencia (ms)	Jitter (ms)	Throughput DL(Mbps)	Throughput UL (Mbps)
4G LTE (teórico)	30	-	~100	-
4G medido (TFM)	-	-	24	-
5G SA (teórico)	<1	<5	>10.000	-
5G en cámara SAC	13	13.88	34.9	2,4
5G fuera del entorno	28	~19	41.0	1,9

Por otro lado, la capacidad del canal de subida es notablemente baja, lo cual se explica porque el número de *slots* asignados al canal de subida es reducido. Sería necesario profundizar en la configuración tanto de la BladeRF como del módem para analizar en detalle estos resultados y optimizar la asignación de recursos en el *uplink*.

5.5 Análisis de la potencia de transmisión dentro y fuera de la cámara.

Para este apartado, establecemos la efectividad de la cámara, viendo que fuera de la cámara con la radio y el UE, fuera de esta, obtuvimos una señal de -30 dBm como máximo. La BladeRF presenta una potencia de transmisión máxima de +6 dBm, un valor relativamente bajo comparado con otros equipos de telecomunicaciones. Además, al

utilizarla a través de Soapy, la capacidad de emisión efectiva se ve aún más limitada debido a la gestión de la ganancia y la potencia en la capa software. Esta restricción explica que, incluso fuera de la cámara semianecoica, la señal medida en el UE alcanzara únicamente $-31,23$ dBm, un nivel que, aunque es suficientemente alto para ser detectado (muy por encima del umbral de sensibilidad del receptor de -80 dBm), refleja la baja potencia radiada. Este valor es coherente, ya que, si calculásemos la pérdida obtenida en un metro en espacio libre, sería de $43,29$ dB[43]. Y, si tenemos en cuenta que estas medidas son tomadas fuera de la cámara, aumentarían las pérdidas.

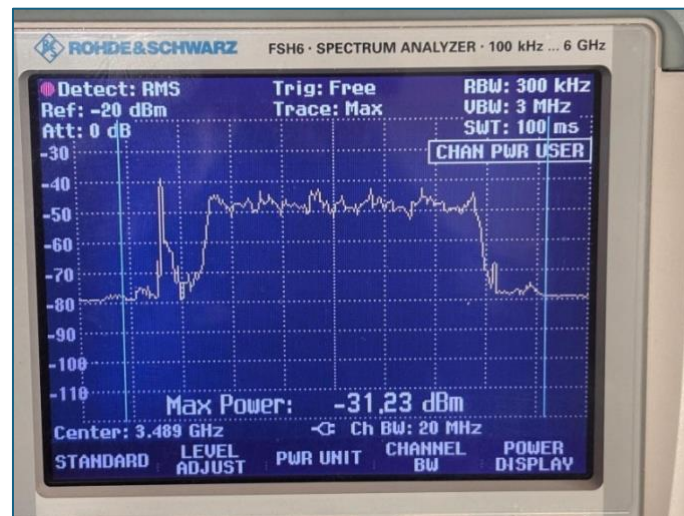


Figura 38. Espectrograma de la señal radiada fuera de la cámara.

Tras analizar las condiciones de transmisión fuera de la cámara semianecoica, pasamos a realizar el estudio dentro de esta. Al situar tanto la BladeRF como el dispositivo UE dentro de la cámara, se buscó evaluar la efectividad del aislamiento electromagnético y cómo este entorno de experimentación influye en la propagación de la señal. La cámara semianecoica permite minimizar interferencias externas y reflexiones no deseadas, ofreciendo un escenario ideal para estudiar el comportamiento real de la señal. La Figura 39 muestra como efectivamente se produce una atenuación significativa de la potencia detectada.

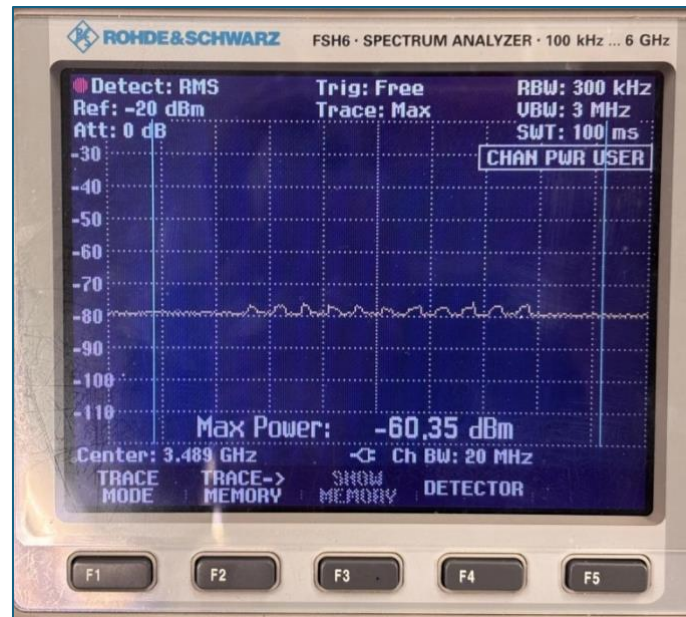


Figura 39. Espectrograma de la señal radiada dentro de la cámara.

6. Conclusiones

Se ha llevado a cabo el objetivo principal de este proyecto, que era implementar una red 5G SA, además de validar un entorno de experimentación oportuno como es el de la cámara semianecoica, para así dar la posibilidad de crear nuevas pruebas en un futuro que profundicen este desarrollo.

Se ha validado además un entorno de experimentación controlado, como es el proporcionado por la cámara semianecoica. Esta infraestructura abre la puerta a futuros trabajos experimentales que podrán explorar nuevas líneas de investigación basadas en la red desplegada.

Se ha conseguido conectar un terminal a la red 5G, y un módem 5G, y, finalmente ambos a la vez, sin que la red saturase.

No se ha podido lograr algunos de los principales desafíos debido a retrasos encontrados debido a la dificultad de acondicionar el entorno experimental, lo que ha limitado la dedicación a otras tareas, como el análisis exhaustivo del comportamiento de la red. Todo ello ha impedido continuar con el estudio detallado de funcionalidades avanzadas como el *network slicing*, y el lanzamiento de *5G Empowered*.

No obstante, a pesar de los obstáculos técnicos, este Trabajo Fin de Grado ha supuesto haber llegado a realizar los objetivos generales propuestos inicialmente.

7. Líneas Futuras

Una vez lanzada la red, y comprobado el uso de esta dentro de la SAC, se abren una inmensa variedad de posibilidades, para desarrollar en futuros proyectos. Los más importantes, los vemos en este capítulo

7.1 Ampliación de funcionalidades 5G.

La cantidad de servicios que brinda 5G, permite escalar en las capacidades ofrecidas por la red desplegada dentro de la SAC. Los ejemplos de estos servicios son:

- **Pruebas URLLC:** para habilitar aplicaciones de baja latencia, se pueden configurar slices con recursos garantizados, función que con network slicing, se puede llevar a cabo.
- **Edge computing accesible:** Con micro-servidores o equipos tipo Raspberry/Jetson se puede desplegar MEC para soporte local de aplicaciones de campus (realidad aumentada, entrega de contenidos).

Por otra parte, implementar tanto el **Core** como el **gNodeB** dentro del mismo equipo utilizando **contenedores Docker** ofrece varias ventajas claras. Al ejecutar cada servicio en un contenedor separado, cada uno con su propia IP, se consigue una arquitectura modular: el *Core*, el CU/DU y el gNodeB operan de forma aislada pero conectada en red.

7.2 Integración con Edge computing, IA e IoT

Una línea de trabajo especialmente emocionante que se abre tras el despliegue de la red 5G es su aplicación en entornos de movilidad inteligente, combinando capacidades de *edge computing*, inteligencia artificial (IA) e IoT. Esta combinación, conocida como *5G Empowered Edge Intelligence*, permite procesar datos muy cerca del usuario, lo que ayuda a reducir latencia, descongestionar la red y, además, proteger mejor la privacidad.

En este escenario, el guiado de vehículos autónomos o semiautónomos mediante redes móviles adquiere un papel protagonista. Utilizando de base el proyecto ARTEMIS, ahora sería posible comprobar cómo se comporta el sistema en condiciones reales de movilidad. Esto abre la puerta a retos más complejos, cómo gestionar el *handover* entre celdas o dar

prioridad al tráfico en función del servicio que se está utilizando, es decir, implementar *network slicing*.

Para que la red sea realmente “inteligente” se plantea la incorporación de nodos eMEC (Edge Multi-Access Edge Computing) muy cerca del gNodeB y del Core 5G, todo dentro de una SAC. Estos nodos permiten procesar en tiempo real datos de sensores que el vehículo lleva a bordo, como pueden ser datos de velocidad, ubicación o condiciones del entorno, y, aplicar modelos de IA ligeros, para, por ejemplo, predecir trayectorias o detectar posibles fallos antes de que ocurran.

En conjunto, esta línea ofrece una vía sólida para transformar el banco de pruebas actual en un entorno avanzado y flexible, ideal para validar aplicaciones vehiculares inteligentes basadas en 5G, computación en el borde e inteligencia distribuida.

Bibliografía

- [1] I. Royuela González, «Diseño e implementación de un testbed de Edge computing para el soporte de vehículos conectados», p. 100, sep. 2022.
- [2] srsran, «BladeRF support · srsran/srsRAN_Project · Discussion #222», GitHub. Accedido: 2 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: https://github.com/srsran/srsRAN_Project/discussions/222
- [3] Ministerio de Asuntos Económicos y Transformación Digital, *Orden ETD/625/2023, de 12 de junio, por la que se modifica la Orden ETD/1449/2021, de 16 de diciembre, por la que se aprueba el Cuadro Nacional de Atribución de Frecuencias*, vol. BOE-A-2023-14422. 2023, pp. 85969-85986. Accedido: 15 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.boe.es/eli/es/o/2023/06/12/etd625>
- [4] «(PDF) Implementación de una cámara anecoica en la banda de 2 - 3 GHz», *ResearchGate*, Accedido: 16 de enero de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/27557649_Implementacion_de_una_camara_a_necoica_en_la_banda_de_2_-_3_GHz
- [5] «MT25 - Comtest Engineering bv | Microwave Absorber». Accedido: 3 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.everythingrf.com/products/absorbers/comtest-engineering-bv/676-1041-mt25>
- [6] «Módulo DONGLE 5G, 4 Antenas, Puerto USB3.1, Disipador Térmico Waveshare», RobotShop Europe. Accedido: 4 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://eu.robotshop.com/es/products/modulo-dongle-5g-4-antenas-puerto-usb31-disipador-termico-de-aleacion-de-aluminio-waveshare>
- [7] «FN990A40/A28», Telit Cinterion. Accedido: 4 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.telit.com/devices/fn990axx/>
- [8] «3GPP and ITU Tutorial - Specs & Protocol Testing», telecomHall Forum. Accedido: 1 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.telecomhall.net/t/3gpp-and-itu-tutorial/6040>
- [9] «Tentative 3GPP timeline for 5G». Accedido: 1 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.3gpp.org/news-events/3gpp-news/timeline-5g>
- [10] «IMT-2020 (a.k.a. “5G”)», ITU. Accedido: 1 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.itu.int:443/en/ITU-R/study-groups/rsg5/rwp5d/imt-2020/Pages/default.aspx>
- [11] «3GPP Portal > Home». Accedido: 1 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://portal.3gpp.org/#/55934-releases>
- [12] G. Liu, Y. Huang, Z. Chen, L. Liu, Q. Wang, y N. Li, «5G Deployment: Standalone vs. Non-Standalone from the Operator Perspective», *IEEE Commun. Mag.*, vol. 58, n.º 11, pp. 83-89, nov. 2020, doi: 10.1109/MCOM.001.2000230.
- [13] «What is an Anechoic Chamber? Find Out How They Work», Antenna Test Lab Company. Accedido: 15 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://antennatestlab.com/antenna-education-tutorials/what-is-an-anechoic-chamber>
- [14] «Anechoic chamber», *Wikipedia*. 8 de julio de 2025. Accedido: 22 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Anechoic_chamber&oldid=1299487570
- [15] «CISPR 16-1-4». Geneva, Switzerland: IEC, 2019., 2019.
- [16] Ministerio de Energía, Turismo y Agenda Digital, *Real Decreto 123/2017, de 24 de febrero, por el que se aprueba el Reglamento sobre el uso del dominio público radioeléctrico*, vol. BOE-A-2017-2460. 2017, pp. 17029-17095. Accedido: 15 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.boe.es/eli/es/rd/2017/02/24/123>

- [17] «Orden ETD-1248-2020, de 21 de diciembre, por la que se aprueba el pliego de cláusulas administrativas particulares y de prescripciones técnicas para el otorgamiento por subasta de concesiones de uso privativo de dominio público radioeléctrico en la banda de 3400-3600 MHz y se convoca la correspondiente subasta.», vLex. Accedido: 23 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://vlex.es/vid/orden-etd-1248-2020-853342825>
- [18] Ministerio de Asuntos Económicos y Transformación Digital, *Orden ETD/1449/2021, de 16 de diciembre, por la que se aprueba el Cuadro Nacional de Atribución de Frecuencias*, vol. BOE-A-2021-21346. 2021, pp. 162420-162777. Accedido: 19 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.boe.es/eli/es/o/2021/12/16/etd1449>
- [19] A. Cuesta, «Ericsson invierte 200 M€ en I+D de redes abiertas», Mobile World Live. Accedido: 15 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.mobileworldlive.com/spanish/ericsson-invierte-200-me-en-id-de-redes-abiertas/>
- [20] «Alvatross | TM Forum ODA Component Directory». Accedido: 15 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.tmforum.org/oda/directory/software-providers/directory/alvatross>
- [21] «Proyectos | Grupo de Comunicaciones Ópticas». Accedido: 15 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://gco.uva.es/proyectos/>
- [22] L. T. de C. Real, «Telefónica y UCLM llevan cátedra de investigación 5G a Cuenca», La Tribuna de Ciudad Real. Accedido: 15 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.latribunadeciudadreal.es/noticia/z9677c855-0199-4246-241654427a19a693/202205/telefonica-y-uclm-llevan-catedra-de-investigacion-5g-a-cuenca>
- [23] «Concept», ONOFRE-4. Accedido: 23 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://onofre4.tel.uva.es/concept/>
- [24] *srsRAN Project Documentation*. 2025.
- [25] «bladeRF 2.0 micro», Nuand. Accedido: 16 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.nuand.com/bladerf-2-0-micro/>
- [26] «USRP-2901 Specifications - NI», <https://www.ni.com>. Accedido: 16 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.ni.com/docs>
- [27] «srsRAN Project Documentation».
- [28] *pothosware/SoapySDR*. (8 de julio de 2025). C++. Pothosware. Accedido: 15 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://github.com/pothosware/SoapySDR>
- [29] *pothosware/SoapyBladeRF*. (9 de junio de 2025). C++. Pothosware. Accedido: 15 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://github.com/pothosware/SoapyBladeRF>
- [30] *pothosware/SoapyUHD*. (9 de junio de 2025). C++. Pothosware. Accedido: 15 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://github.com/pothosware/SoapyUHD>
- [31] *Nuand/bladeRF*. (13 de julio de 2025). C. Nuand. Accedido: 15 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://github.com/Nuand/bladeRF>
- [32] M. Rouili *et al.*, «Evaluating Open-Source 5G SA Testbeds: Unveiling Performance Disparities in RAN Scenarios», en *NOMS 2024-2024 IEEE Network Operations and Management Symposium*, Seoul, Korea, Republic of: IEEE, may 2024, pp. 1-6. doi: 10.1109/noms59830.2024.10575687.
- [33] S. Lee, «Quickstart», Open5GS. Accedido: 3 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://open5gs.org/open5gs/docs/guide/01-quickstart/>
- [34] «OpenAirInterface – 5G software alliance for democratising wireless innovation». Accedido: 17 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://openairinterface.org/>

- [35] J. Ramírez Ruiz, «Despliegue de un prototipo de red móvil 5G completo». Accedido: 24 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://oa.upm.es/72303/>
- [36] «AMARI Callbox Ultimate». Accedido: 17 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.amarisoft.com/test-and-measurement/device-testing/device-products/amari-callbox-ultimate>
- [37] «wireless/modem – Gateworks». Accedido: 16 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://trac.gateworks.com/wiki/wireless/modem>
- [38] «3D design SAC_UVa», Tinkercad. Accedido: 4 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: [https://www.tinkercad.com/things/7RuiwQB3ZDF?googleCourseId=""&googleItemId=""&googleAttachmentId=""](https://www.tinkercad.com/things/7RuiwQB3ZDF?googleCourseId=)
- [39] J. Gomez Gil, «Tema 3 Multimedia _Asignatura RST». 2022.
- [40] «5G | ShareTechnote». Accedido: 16 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.sharetechnote.com/html/5G/5G_FR_Bandwidth.html?utm_source=chatgpt.com
- [41] «5G NR TBS (Transport Block size) Calculator | 5G-Tools.com», 5G Tools for RF Wireless. Accedido: 16 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://5g-tools.com/5g-nr-tbs-transport-block-size-calculator/>
- [42] Royuela González, «Diseño e implementación de un testbed de Edge computing para el soporte de vehículos conectados».
- [43] «RECOMMENDATION ITU-R P.525-5 (11/2024) Calculation of free-space attenuation».
- [44] «5G NR ARFCN calculator | 5G-Tools.com», 5G Tools for RF Wireless. Accedido: 18 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://5g-tools.com/5g-nr-arfcn-calculator/>
- [45] «5G Network Band Country List». Accedido: 21 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.giztop.com/5g-network-bands?utm_source=chatgpt.com

Anexo I

Enero																														Febrero																														Marzo																														Abril																														Mayo																														Junio																														Julio																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
w2501					w2502					w2503					w2504					w2505					w2506					w2507					w2508					w2509					w2510					w2511					w2512					w2513					w2514					w2515					w2516					w2517					w2518					w2519					w2520					w2521					w2522					w2523					w2524					w2525					w2526					w2527					w2528					w2529					w2530																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	

Anexo II

Producto	Cantidad	PRECIO	TOTAL	Proveedor	Peso	Precio total	PESO
Cámara SAC			3337,37			7186,32	62,38
Módulo de espuma 60x120x25 cm	10,00	307,70	3070,70	Grupo_Alava_Comtest_MT_25	55		
Perfiles de Acero	10,00	6,304	63,04	FERRETERIA			
Material de carpintería			99,50	LEROY MERLIN			
Escuadras Planas	28,00		5,60		*		
25 Tornillo de métrica cabeza plana avellanada phillips de acero , Ø 4 x L.12 mm	4,00		9,56	TORNILLO 4-12	*		
10 Tornillo de métrica cabeza plana avellanada phillips de acero , Ø 4 x L.60 mm	6,00		14,34	TORNILLO-4-60	*		
Listones de madera 25x50x2400 mm	8,00	8,75	70,00	LISTON SIN CEPILLAR-ABETO	7,38		
Cinta de aluminio 10x50mm PLATA	3,00	7,29	21,87				
Modem 5G			290,71				
Waveshare 5G DONGLE Module, 4 Antennas, USB3.1 Port, Heatsink	1,00	40,71	40,71	RobotShop	*		
Modem 5G FN990A28, Telit Cinterion	1,00	250	250,00	jm.pl TELIT CELERION	*		

Anexo III

Ficheros de configuración del *Core*.

```
D: > fich_conf > core > ! amf.yaml
1  logger:
2    file: /var/log/open5gs/amf.log
3    # level: info # fatal|error|warn|info(default)|debug|trace
4
5  global:
6    max:
7      ue: 1024 # The number of UE can be increased depending on memory size.
8      # peer: 64
9
10 amf:
11   sbi:
12     server:
13       - address: 127.0.0.5
14         port: 7777
15     client:
16       # nrf:
17       #   - uri: http://127.0.0.10:7777
18       scp:
19         - uri: http://127.0.0.200:7777
20   ngap:
21     server:
22       - address: 192.168.0.102
23   metrics:
24     server:
25       - address: 127.0.0.5
26       port: 9090
27   guami:
28     - plmn_id:
29       mcc: 001
30       mnc: 01
31     amf_id:
32       region: 2
33       set: 1
34
35   tai:
36     - plmn_id:
37       mcc: 001
38       mnc: 01
39     tac: 1
40   plmn_support:
41     - plmn_id:
42       mcc: 001
43       mnc: 01
44       s_nssai:
45         - sst: 1
46   security:
47     integrity_order : [ NIA2, NIA1, NIA0 ]
48     ciphering_order : [ NEA0, NEA1, NEA2 ]
49   network_name:
50     full: Open5GS
51     short: Next
52   amf_name: open5gs-amf0
53   time:
54     # t3502:
55     #   value: 720 # 12 minutes * 60 = 720 seconds
56     t3512:
57       value: 540 # 9 minutes * 60 = 540 seconds
```

```
D: > fich_conf > core > ! nrf.yaml
1  logger:
2    file: var/log/open5gs/nrf.log
3    # level: info # fatal|error|warn|info(default)|debug|trace
4
5  global:
6    max:
7      ue: 1024 # The number of UE can be increased depending on memory size.
8      # peer: 64
9
10 nrf:
11   serving: # 5G roaming requires PLMN in NRF
12     - plmn_id:
13       mcc: 001
14       mnc: 01
15   sbi:
16     server:
17       - address: 127.0.0.10
18       port: 7777
19
20   #####
```

```

D: > fich_conf > core > ! upf.yaml
1  logger:
2    file: /var/log/open5gs/upf.log
3    # level: info # fatal|error|warn|info(default)|debug|trace
4
5  global:
6    max:
7      ue: 1024 # The number of UE can be increased depending on memory size.
8      # peer: 64
9
10 upf:
11   pfcp:
12     server:
13       - address: 127.0.0.7
14     client:
15       # smf: # UPF PFCP Client try to associate SMF PFCP Server
16       # - address: 127.0.0.4
17   gtpu:
18     server:
19       - address: 192.168.0.112
20     session:
21       - subnet: 10.45.0.1/16
22       - subnet: 2001:db8:cafe::1/48
23     metrics:
24       server:
25         - address: 127.0.0.7
26         port: 9090
27

```

Fichero de configuración del gNodeB.

```

D: > fich_conf > ! gnb_custom_cell_properties.yml
5  cu_cp:
6    amf:
7      port: 38412
8      bind_addr: 192.168.0.111
9      supported_tracking_areas:
10       - tac: 7
11       plmn_list:
12         - plmn: "00101"
13         tai_slice_support_list:
14           - sst: 1
15
16
17  ru_sdr:
18    device_driver: uhd
19    device_args: ""
20    #clock:
21    #sync:
22    srates: 23.04
23    otie_format: sc12
24    tx_gain: 80
25    rx_gain: 40
26
27  # Properties set in this section are inherited for
28  cell_cfg:
29    dl_arfcn: 632628
30    band: 78
31    channel_bandwidth_MHz: 20
32    common_scs: 30
33    plmn: "00101"
34    tac: 7
35    pci: 10
36
37  # This section is represented as an array of cells
38  cells:
39    - pci: 10
40      channel_bandwidth_MHz: 20

```

Anexo IV

Banda 5G	Frecuencia Uplink (MHz)	Frecuencia Downlink (MHz)	Tipo de Duplex	NREF
n1	1920 - 1980	2110 - 2170	FDD	384000
n2	1850 - 1910	1930 - 1990	FDD	370000
n3	1710 - 1785	1805 - 1880	FDD	342000
n5	824 - 849	869 - 894	FDD	164800
n7	2500 - 2570	2620 - 2690	FDD	500000
n8	880 - 915	925 - 960	FDD	176000
n12	699 - 716	729 - 746	FDD	139800
n14	788 - 798	758 - 768	FDD	157600
n20	791 - 821	832 - 862	FDD	158200
n25	1850 - 1915	1930 - 1995	FDD	370000
n26	814 - 849	859 - 894	FDD	162800
n28	703 - 748	758 - 803	FDD	140600
n29	717 - 728	777 - 788	FDD	143400
n30	2305 - 2315	2350 - 2360	FDD	461000
n38	2570 - 2620	2620 - 2690	TDD	514000
n40	2300 - 2400	2300 - 2400	TDD	460000
n41	2496 - 2690	2496 - 2690	TDD	499200
n48	3550 - 3700	3550 - 3700	TDD	36667,26667
n53	2500 - 2570	2570 - 2630	TDD	500000
n66	1710 - 1780	2110 - 2200	FDD	342000
n70	1695 - 1710	1995 - 2020	FDD	339000
n71	663 - 698	617 - 652	FDD	132600
n75	1432 - 1517	1517 - 1602	FDD	286400
n76	1427 - 1517	1517 - 1602	FDD	285400
n77	3300 - 3400	3400 - 4200	TDD	20000,6
n78	3300 - 3400	3400 - 3800	TDD	20000,6
n79	4400 - 4500	4500 - 4600	TDD	93333,93333

El NREF, es el valor para indicar en los ficheros de configuración del *gnb*, su cálculo se encuentra en

$$F_{\text{REF}} = F_{\text{REF-Offs}} + \Delta F_{\text{Global}} (N_{\text{REF}} - N_{\text{REF-Offs}})$$

Figura 40. Fórmula insertada en la tabla[44].

Banda 5G	Frecuencia Uplink (MHz)	Frecuencia Downlink (MHz)	Tipo de Duplex	Movistar	Vodafone	Orange	MásMóvil
n28	703 – 748	758 – 803	FDD	Sí	Sí	Sí	Sí
n77	3300 – 4200	3300 – 4200	TDD	No	Sí	No	No
n78	3300 – 3800	3300 – 3800	TDD	Sí	Sí	Sí	Sí
n258	24.25 – 27.5	24.25 – 27.5	TDD	Sí	Sí	Sí	Sí
n41	2496 – 2690	2496 – 2690	TDD	No	No	No	No
n40	2300 – 2400	2300 – 2400	TDD	No	No	No	No

Tabla obtenida de [45], con una referencia a las bandas ocupadas por operadoras actualmente.