



UNIVERSIDAD
POLITECNICA
DE VALENCIA



Máster Universitario
en Tecnologías, Sistemas y
Redes de Comunicaciones

Implementación de un Prototipo de Estación Base 5G mediante la Transmisión con USRPs

Autor: Rubén Darío Riaño Álvarez

Director 1: Jose Francisco Monserrat del Río

Director 2: Sergio Pastor Tur

Fecha de comienzo: 18/02/2020

Lugar de trabajo: Grupo de Comunicaciones Móviles ITEAM

1 Implementación de un Prototipo de Estación Base 5G mediante la Transmisión con USRPs

Objetivos — Este trabajo final de Máster (TFM) entra dentro del marco del proyecto Valencia Campus 5G, el cual tiene como principal objetivo la implementación de una estación base 5G NSA (*Non-Standalone*) privada y de código abierto, mediante la transmisión con un dispositivo de tipo USRP (*Universal Software Radio Peripheral*), para así generar un entorno educativo y experimental. El desarrollo de este TFM se centra en el despliegue de la red de acceso radio 5G, por lo que se definieron los siguientes objetivos para la correcta elaboración de este proyecto:

- Conocer las arquitecturas de red 5G.
- Conocer y entender las plataformas SDR (*Software Defined Radio*) que implementan soluciones 5G y sus arquitecturas de implementación.
- Entender el funcionamiento del USRP: inicialización, configuración y despliegue.
- Desplegar un equipo transmisor 5G NSA de doble conectividad (EN-DC) usando OpenAirInterface (OAI).
- Validar y analizar las prestaciones radio del punto de acceso.

Metodología — Para el desarrollo de este TFM fue necesario dividirlo en dos partes: la primera consta del estudio de la arquitectura de red 4G, conociendo sus componentes, funcionamiento, pila de protocolos e interfaces. La segunda consiste en el estudio de las arquitecturas de red para 5G, con un especial enfoque en la NSA. De esta manera se estudiaron las interfaces de conexión, el paso de mensajes y la asignación de recursos radio entre las dos tecnologías. Se realizó una investigación detallada acerca del funcionamiento de la herramienta open-source de OAI (*OpenAirInterface*), conociendo así su arquitectura de carpetas, código fuente, funcionalidades y características. Adicionalmente, se estudió la funcionalidad de los equipos radio multipropósito que se emplearon en la instalación, siendo en este caso los USRP B210. Por último, se utilizó el software ROME DRIVE TEST del Instituto de Telecomunicaciones y Aplicaciones Multimedia (ITEAM, Universidad Politécnica de Valencia, UPV), con el cual se realizó el estudio de cobertura y prestaciones de la señal radio de nuestra red 5G NSA.

Desarrollos teóricos realizados — Este TFM fue desarrollado en un entorno experimental. Sin embargo, se estudiaron los fundamentos teóricos de las redes 4G y 5G.

Desarrollo de prototipos y trabajo de laboratorio — Después de asentar las bases teóricas de las tecnologías 4G y 5G, los equipos y software a utilizar, se comenzó con el despliegue de la red. Junto con los compañeros del grupo de investigación, se logró poner en marcha una red 4G privada, donde mi contribución consistió en el despliegue de la red de acceso (*radio access network*, RAN). También se implementó la arquitectura de red NSA para 5G. Para esto fue necesario el uso de un servidor comercial, donde se instaló el software de OAI y dos USRP, con la función de generar las estaciones base para 4G y 5G. Se verificaron las interfaces de conexión, configuración de parámetros, asignación de frecuencias y pilas de protocolos entre el eNB (*evolved node B*) y en el gNB (*next generation node B*). Finalmente se utilizó el software ROMES TEST DRIVE y un analizador de señales para detectar y medir nuestra red desplegada. Se generaron dos escenarios de medición: uno desde el laboratorio de comunicaciones móviles ITEAM y el otro en el pasillo de este.

Resultados — Con la implementación de una red 4G privada con OAI, desplegada por el grupo de investigación del ITEAM, se logró desarrollar un prototipo de estación base 5G privada NSA con un dispositivo radio de propósito general. Por medio del software de OAI, se validó el establecimiento de cada una de sus interfaces de comunicación y especialmente la interfaz X2, que comunica el eNB y gNB de nuestra red. Posteriormente, con el equipo de medición y el software de ROMES TEST DRIVE, se lograron evidenciar las prestaciones de nuestra red, respecto a la calidad (SS-RSRQ), potencia (SS-RSRP) y la relación señal a ruido más interferencia (SS-SINR) de nuestra señal. Esta implementación arrojó resultados positivos respecto a la cobertura y calidad de conexión, proporcionando potencialmente una buena experiencia de usuario.

Líneas futuras — Como líneas futuras de investigación y aplicación de esta red, se pueden mencionar:

- Actualizar el código fuente de OAI, optimizando la transmisión de mensajes entre el gNB y el UE (*user equipment*), para establecer una conexión celular estable.
- Validar las prestaciones de esta solución 5G NSA de OAI, analizando las velocidades de transmisión y latencias principalmente.
- Realizar configuraciones de la RAN para validar las prestaciones a las tres categorías de servicios (mMBB, eMTC y URLLC)
- Implementar una arquitectura de red 5G Standalone (SA), donde tanto el Core como el gNB son 5G nativos.
- Implementar escenarios de pruebas e investigación utilizando nuestra red 5G privada.

Publicaciones — Aun no se cuentan con publicaciones con respecto a este TFM aunque se está trabajando ya en la redacción de una con un resumen de la experiencia llevada a cabo.

Abstract — One of the main technological advances of the 5G network is its architecture, which allows the use of Network Function Virtualization (NFV) and Software Defined Network (SDN) techniques. For this reason, the Open RAN (O-RAN) alliance was created, allowing an open and interoperable environment among different mobile communications devices. This Master Thesis focuses on the implementation of a Non-Standalone 5G base station using OpenAirInterface (OAI) open source software, integrated with a 4G evolved packed core (EPC) and eNB. In this Master Thesis, the deployment of the NSA network architecture was successfully achieved by the establishment of the X2 interface. Such interface was used between the gNB and eNB for the control layer and for communication with the EPC. Additionally, it was possible to establish the communication interfaces necessary for the 5G NSA network and to set the radio parameters for the gNB. To validate the behaviour of our 5G network in an indoor space, two coverage studies were carried out within the ITEAM research institute, in order to obtain results for different parameters such as SS-RSRP, SS-RSRQ and SS-SINR. The obtained results were within the recommended values that guarantee the connection of a mobile device to the network, potentially offering a good user experience. In the future, this 5G network will allow interconnecting IoT devices, machines, robots, 5G routers, autonomous cars and many other intelligent systems.

Autor: Rubén Darío Riaño Álvarez, email: rurial@teleco.upv.es

Director: Jose F. Monserrat, email: jomondel@iteam.upv.es

Director Experimental: Sergio Pastor, email: serpastu@iteam.upv.es

Fecha de entrega: 7 de septiembre de 2020

INDICE

I. INTRODUCCIÓN.....	4
I.1. CONTEXTO ACTUAL	4
I.2. ANÁLISIS DEL ESTADO DEL ARTE	6
I.3. OPEN RAN	9
I.4. OPEN AIR INTERFACE - OAI	10
I.5. OBJETIVOS.....	11
I.6. PRINCIPALES APORTACIONES DEL TRABAJO DE FIN DE MÁSTER	12
I.7. ORGANIZACIÓN DE LA MEMORIA.....	12
II. ARQUITECTURA DE RED.....	12
II.1. OPCIÓN 3 NSA	13
II.2. SOFTWARE DEFINED NETWORK Y NETWORK FUNCTION VIRTUALIZATION.....	15
II.3. SOFTWARE DEFINED RADIO – SDR.....	16
III. DESPLIEGUE DE LA RED CON OPEN AIR INTERFACE.....	17
III.1. CORE NETWORK-EPC.....	18
III.2. REQUERIMIENTOS DE SOFTWARE Y HARDWARE	18
III.3. INSTALACIÓN RAN.....	19
III.4. CONFIGURACIÓN	22
III.5. EJECUCIÓN	24
IV. ANÁLISIS DE PRESTACIONES DE LA RED NR.....	29
IV.1. PRIMER ESCENARIO DE MEDICIÓN.....	30
IV.2. SEGUNDO ESCENARIO DE MEDICIÓN	32
V. CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS	33
AGRADECIMIENTOS.....	34
REFERENCIAS.....	35

I. INTRODUCCIÓN

A lo largo de los últimos años, los sistemas de comunicaciones móviles han jugado un papel clave para el continuo avance tecnológico en el mundo, permitiendo conexión de millones de teléfonos móviles, tabletas y dispositivos inteligentes, contribuyendo así al desarrollo económico, social y a la mejora de calidad de vida de la población.

Cada generación de comunicaciones móviles viene ligada a un gran avance tecnológico ofreciendo diferentes servicios para el usuario, así lo podemos ver cuando a principios de los años 80 nace la primera generación de comunicaciones móviles (1G) ofreciendo servicios de voz de forma analógica por medio de conmutación de circuitos, usando señales de radio moduladas en frecuencia (FDMA). Posteriormente, en 1990 nace GSM (*Global System for Mobile*) más conocida como 2G, siendo la pionera en la comunicación digital permitiendo mejoras notables en la calidad de la transmisión de voz, además fue la primera tecnología en implementar SMS (*Short Message Service*). En el 2001 nace UMTS (*Universal Mobile Telecommunication System*) también conocida como tercer sistema de comunicación móvil - 3G, destacándose por su gran avance en la alta velocidad de transmisión de datos, alcanzando los 42 Mbps, fue la primera tecnología en ofrecer servicios de internet y la posibilidad de hacer *roaming* internacional. Debido al consumo constante de datos (Internet) en los usuarios y la facilidad de acceder a un dispositivo móvil, nació en el año 2010 la cuarta generación de comunicación móvil - 4G también conocida como LTE (*Long Term Evolution*) que proporciona una considerable mejora en la experiencia de usuario con altas velocidades de transmisión de datos hasta 326 Mbps y con latencias de 20 ms, enfocada en la transmisión de video, video conferencia, juegos en línea, soportando altos tráfico de datos y mayores conexiones de dispositivos [1].

La quinta generación de comunicaciones móviles ha sido diseñada para cubrir con las necesidades actuales y futuras. La 5G promete mayores velocidades de transmisión, mayores conexiones de dispositivos, mayor eficiencia energética tanto en la implementación de la red como de los dispositivos, bajas latencias, alta disponibilidad, etc. La 5G romperá muchas de las barreras actuales y permitirá la implementación de una infinidad de servicios como por ejemplo las ciudades inteligentes, los carros autónomos, la realidad aumentada, las Smart Health, comunicación tipo Maquina a Maquina (M2M), Smart Agriculture, ...etc., abriendo el camino a un nuevo mundo digital, globalizando el internet a las cosas y ayudando al bienestar de la sociedad.

I.1. CONTEXTO ACTUAL

En la actualidad, las comunicaciones móviles han tenido un gran crecimiento de demanda, no solo por la cantidad de dispositivos conectados sino también por los servicios de nuevas aplicaciones con requerimientos de ancho de banda y latencia más exigentes, estimando que para el año 2023 se tengan alrededor de 29 billones de conexiones [2], donde se estima que las soluciones industriales tipo M2M

tendrían una penetración del 50% del mercado global (Fig. 1), constatando así la necesidad del despliegue de una nueva generación de comunicaciones móviles, la 5G.

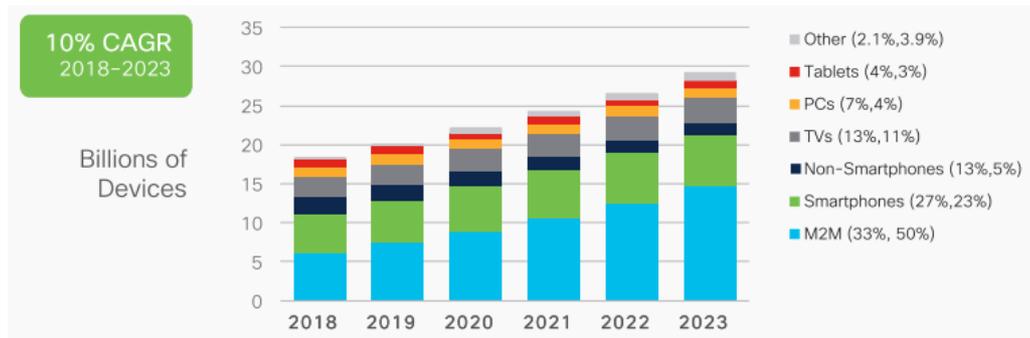


Fig. 1 Reporte Anual Cisco, 2018–2023 [2]

Es por tal razón que las compañías de comunicaciones móviles están en el proceso de implementación y despliegue de esta tecnología para así abarcar un gran mercado que antes no estaba contemplado, ofreciendo soluciones nuevas enfocadas en servicios específicos, haciendo necesaria la creación de alianzas estratégicas con los fabricantes para así generar un ecosistema confiable en realización de pruebas piloto, garantizando el cumplimiento de las prestaciones ofrecidas por la 5G, estas soluciones están enfocadas a los nuevos mercado de la industria vertical, como la industria 4.0, automotriz, energía, salud, industrial, medios y entretenimiento, seguridad pública, ciudades inteligentes, logística, transporte, etc.

Los países más avanzados respecto a las pruebas y pilotos lanzados de 5G son [3]: Estados Unidos, con empresas como AT&T, Verizon, Sprint, T-Mobile USA, las cuales han realizado diferentes pruebas, tales como mediciones de latencias en bandas milimétricas con cientos de usuarios conectados, mediciones del comportamiento de interferencias a causa del ambiente y del estado del clima, y realizaron comprobaciones sobre el comportamiento de la penetración de la señal en ciertos materiales. En la actualidad, las principales ciudades de Estados Unidos ya cuentan con red 5G comercial

En Corea del Sur, el ministerio de ciencia, TIC y planificación futura, junto la empresa público privada 5G Forum definieron la estrategia de despliegue de 5G, donde participaron alrededor de 26 compañías, operadores, fabricantes e instituciones con el objetivo de realizar una implementación conjunta y unificada de la red 5G. En febrero del 2018 se realizó la primera prueba piloto en los juegos olímpicos de invierno, realizando transmisión 4K, transmitiendo en la banda de los 28GHz, demostrando la transmisión de video, donde verificaron la calidad en la sincronización y el retardo, además, se realizaron pruebas de realidad virtual y conectaron un autobús autónomo demostrando un nivel 4 de autonomía. En marzo del 2019 lanzaron la red 5G comercial.

China, con su plan “Made in China 2025” [4], el cual consiste en transformar el país como en potencia industrial tecnológica, ha puesto todo su empeño y disposición en acelerar las nuevas tecnologías, incluyendo la 5G, por lo que el gobierno Chino inyectó capital a empresas como Huawei

y ZTE para realizar el desarrollo y la realización de pruebas de esta tecnología, dando como resultado el lanzamiento de 5G comercial para finales del 2019 junto con las compañías móviles China Mobile, China Unicom y China Telecom.

Respecto a la Unión Europea, también se han realizado alrededor de 105 pruebas piloto de redes 5G privadas, siendo España el país con más aportaciones y pruebas realizadas, seguido de Alemania, Francia, Inglaterra e Italia. [5]

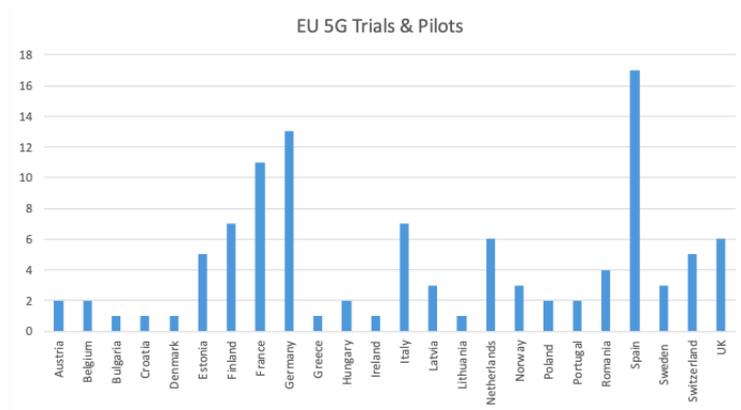


Fig. 2 Pruebas y pilotos de 5G en UE [5]

Como se puede observar en la Fig. 2, España es uno de los países de la Comunidad Europea que más aportes y pruebas ha realizado a lo largo de los últimos años, contribuyendo a la investigación, desarrollo y despliegue de la red 5G, para satisfacer cada una de las categorías de servicios (eMBB, mMTC y URLLC), con desarrollos como los realizados por Telefónica y ZTE, con la implementación de la primera prueba de MIMO masivo en Madrid [6] o como Orange y ZTE, quienes realizaron una llamada de voz y datos en 5G con arquitectura nativa SA en Valencia [7], también cabe resaltar la implementación realizada por Telefónica, Nokia, TELDAT y Avanza, donde implementaron un autobús conectado a 5G transmitiendo video en 4K en Segovia [8], todo esto con el objetivo claro de ganar la experiencia necesaria para afrontar las necesidades que se presenten para el despliegue de la red y la prestación de servicios.

1.2. ANÁLISIS DEL ESTADO DEL ARTE

A principios del año 2014, entidades internacionales como la ITU (*International Telecommunications Union*) y la 3GPP (*3rd Generation Partnership Project*) iniciaron el proceso de estandarización de la nueva generación de las comunicaciones móviles 5G y para el año 2015 se publicó el estándar de Telecomunicaciones Móviles Internacionales IMT-2020, donde se establecieron los requerimientos mínimos para la 5G [9].

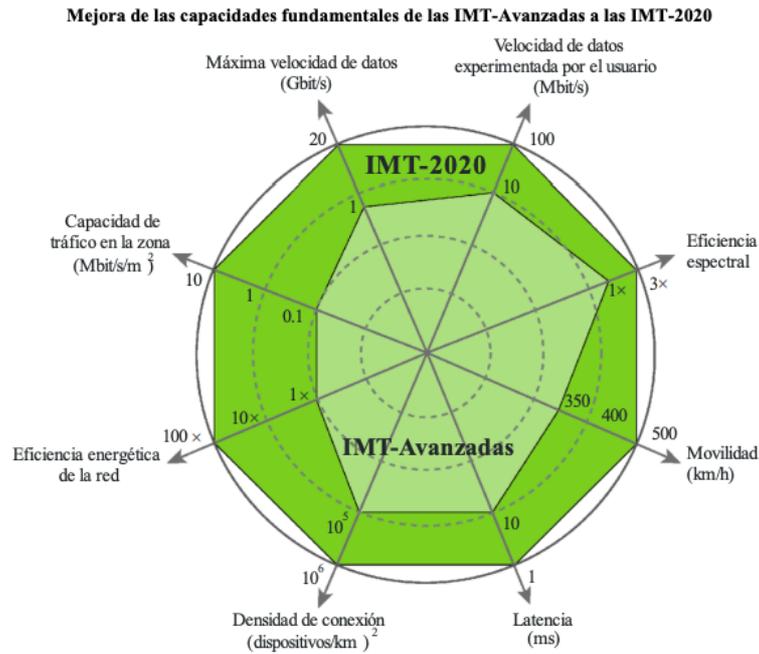


Fig. 3 Requerimientos IMT-2020 [10]

- Velocidad de datos máxima que un usuario puede alcanzar, se definieron valores hasta 20 Gbit/s en el enlace descendente y 10 Gbit/s para el enlace ascendente.
- Velocidad de datos experimentada por usuario, siendo 100 Mbit/s para en enlace descendente y 50 Mbit/s en el enlace ascendente.
- Eficiencia Espectral de 30 bits/s/Hz para el enlace descendente y 15 bits/s/Hz para el enlace ascendente.
- Movilidad, es la velocidad máxima que un dispositivo puede llegar a tener obteniendo una buena calidad en el servicio, sin pérdida de paquetes y conexión estable, para 5G soportara velocidades hasta 500 km/h.
- Latencia hasta de 1 ms.
- Densidad de conexión, cantidad de dispositivos que pueden conectarse por km^2 garantizando la calidad en el servicio, donde se pretende alcanzar hasta 1.000.000 de dispositivos conectados por km^2 .
- Hasta 100 veces mayor eficiencia energética.
- Capacidad de tráfico en la zona, siendo de 10 Mbit/s/m^2 [10]

Adicionalmente a estos requerimientos, la ITU ha clasificado tres categorías de servicios de comunicación para 5G:

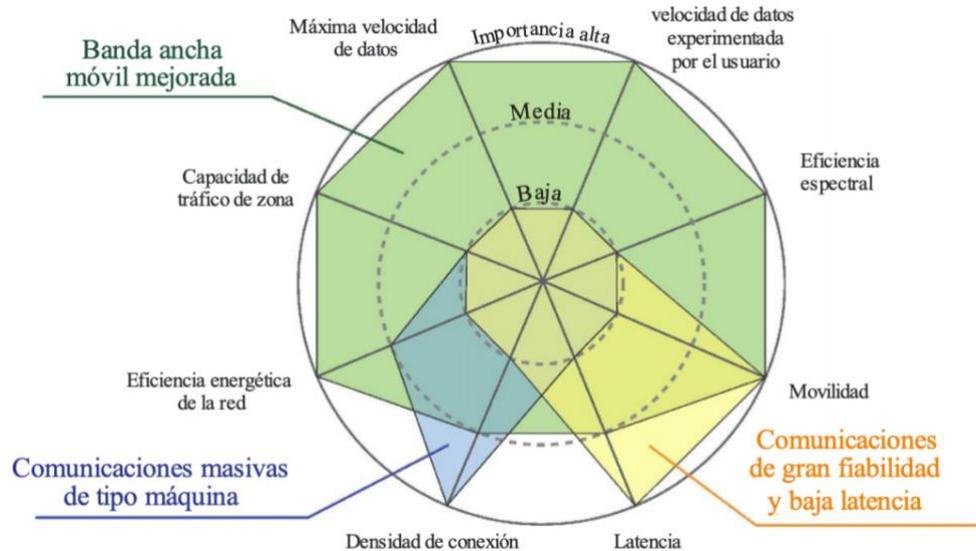


Fig. 4 Categorías de servicios de comunicación para 5G [10]

- Banda ancha móvil mejorada (eMBB): Está orientada al servicio del usuario, permitiendo mayores velocidades de transmisión para los contenidos de multimedia, transmisión de datos, mejorando la experiencia de usuario, permitiendo el acceso a servicios de realidad virtual, realidad aumentada, tv en vivo, descargas en segundos, juegos en línea, etc.
- Comunicaciones de gran fiabilidad y baja latencia (URLLC): Abarca todas las conexiones donde es de gran importancia el uso de latencias mínimas como lo es el vehículo autónomo, cirugía remota, automatización industrial, servicios de emergencias, etc.
- Comunicaciones masivas tipo máquina. (mMTC): Enfocada en la conexión de millones de dispositivos, ofreciendo servicios de comunicación para IoT, como las smart cities, smart agricultura, sensores, etc.

Ahora bien, dadas las características anteriores, se han establecido los siguientes indicadores claves para garantizar el rendimiento para la red 5G (ver Fig. 5), definido en tres ramas de aplicación [11]:

- Eficiencia espectral y energética: donde se encuentran nuevas implementaciones de MIMO Masivo, Full dúplex radio, nuevas formas de codificación, modulación y forma de ondas, acceso NOMA (*Non-Orthogonal Multiple Access*).
- Nuevo espectro: Nuevas bandas de frecuencia FR1 (450 MHz – 6000 MHz) y FR2 llamadas también bandas milimétricas que van de (24250 MHz – 52600 MHz) [12], uso de espectro sin licencia (6GHz – 100 GHz) permitiendo anchos de banda más grandes.
- Nueva Arquitectura de red: Donde se encuentran soluciones basadas en NFV y SDN, Cloud RAN – Virtual RAN, edge computing, entre otros

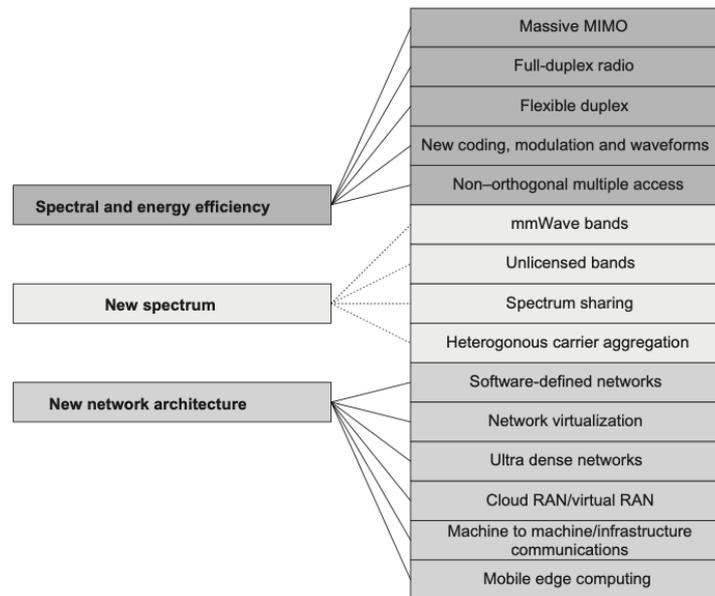


Fig. 5. KPI candidatas para 5G [11]

Uno de los avances más significativos en la 5G se encuentra en la arquitectura de red, ya que implementa nuevas técnicas de NFV (*Network Function Virtualización*) y SDN (*Software Defined Network*), las cuales cumplen una tarea importante a la hora del despliegue de la 5G, mejorando el rendimiento de la red, realizando funciones específicas de hardware por medio de virtualización y software, disminuyendo latencias y permitiendo realizar configuraciones y administraciones de la red en tiempo real, convirtiéndola en arquitecturas flexibles, personalizadas y escalables [13].

I.3. OPEN RAN

Uno de los mayores desafíos en el despliegue de una nueva tecnología móvil se encuentra en el costo de instalación ya que se requieren de actualizaciones de hardware y software que sean compatibles con las soluciones instaladas. Las implementaciones de red tradicionales son desarrollos de hardware y software de propietarios, es decir, que no se podrían mezclar soluciones de una marca con otra, haciendo que solo se permitan conexiones o actualizaciones sugeridas y aprobadas por la solución que ya se encuentra instalada.

Es por esta razón que nace la alianza internacional O-RAN (*Open RAN*) cuyo enfoque principal está en la arquitectura de red. O-RAN fue fundada en febrero del 2018 por diferentes operadores móviles, donde también participan compañías desarrolladoras de hardware y software, con el objetivo de definir requisitos de implementación, permitiendo que las redes de acceso radio sean abiertas e inteligentes, proporcionando interoperabilidad con diferentes dispositivos de hardware y software, habilitando las interfaces de conexión entre las BBU (*Band Base Unit*) y RRU (*Remote Radio Unit*), y así formar bases para construir redes de acceso radio con hardware abierto, cosa que con generaciones anteriores de acceso radio no se podía hacer. O-RAN permite gran escalabilidad en la implementación de la red 5G y de las futuras generaciones de comunicaciones móviles.

O-RAN junto con la Fundación Linux crearon una comunidad de software O-RAN con el propósito de que desarrolladores, ingenieros, institutos de investigación, empresas, participen conjuntamente en la evolución en la implementación de soluciones, lanzando interfaces y aplicaciones, para la red de acceso radio (RAN) y así cumplir con los desafíos propuestos por la 3GPP [14].

I.4. OPEN AIR INTERFACE - OAI

Es una plataforma de código abierto, desarrollada por el instituto de investigación EURECOM en Francia, la cual tiene como objetivo desarrollar herramientas para la implementación de una solución abierta para LTE y 5G, y que cuenta con los protocolos definidos y las características expuestas por la 3GPP para el EPC (*Evolved Packet Core*) y las entidades E-UTRAN (*Evolved – Universal Terrestrial Radio Access Network*), su software se puede ejecutar en procesadores de propósito general (como los X86) y se encuentra desarrollado en C bajo Linux. OAI contiene funcionalidades de red basadas en software, reduciendo así el costo de implementación, mejorando la flexibilidad de su despliegue y permitiendo escenarios para la investigación.

Actualmente, contiene una implementación completa de 4G LTE con los estándares de 3GPP - Release 10. Para la capa física se proporcionan las siguientes características [15]:

- FDD y TDD, con anchos de banda 5, 10 y 20 MHz
- Modos de transmisión SISO y MIMO.
- Canales para DL: PSS, SSS, PBCH, PCFICH, PHICH, PDCCH, PDSCH, PMCH.
- Canales para UL: PRACH, PUSCH, PUCCH, SRS, DRS.
- HARQ para UL y DL.
- Incluye Turbo decodificación
- Demodulación 64 QAM para DL y 16 QAM para UL (en 20 MHz, SISO).

Para la pila de protocolos del E-UTRAN, contiene:

- Implementa las capas MAC, RLC, PDCP y RRC.
- Scheduling.
- Comprobación de integridad y cifrado por medio de los algoritmos AES y Sonw3G.
- Interfaz S1AP y GTP-U hacia el EPC.
- Compatibilidad con IPv4 y IPv6

Para 5G-NR, contiene lo siguiente [16]:

- Codificación y decodificación LDPC y códigos polares.
- Implementación del Release 15.
- Canales para DL: NR-PSS, NR-SSS, NR-PBCH, NR-PDCCH, NR-PDSCH.
- Canales para UL: NR-PRACH, NR-PUSCH, NR-PUCCH.
- Interfaz X2-AP.

La arquitectura de software de OAI está dividida en dos ramas (ver Fig. 6), una donde se encuentra todo el desarrollo para el EPC llamada “Openair-cn”, la cual contiene todos los ejecutables, códigos de las interfaces de la red troncal, binarios de configuración, archivos de configuración, etc. Y otra, para el desarrollo del E-UTRAN y UE llamada “Openairinterface5g”, que contienen los archivos para construir y ejecutar el software, códigos necesarios el desarrollo de la capa física, RLC, MAC, PDCP, RRC, configuración de interfaces de conexión con el EPC, software adicional de medición de tráfico, un oscilador digital, simuladores de RF, T-Tracer, etc.

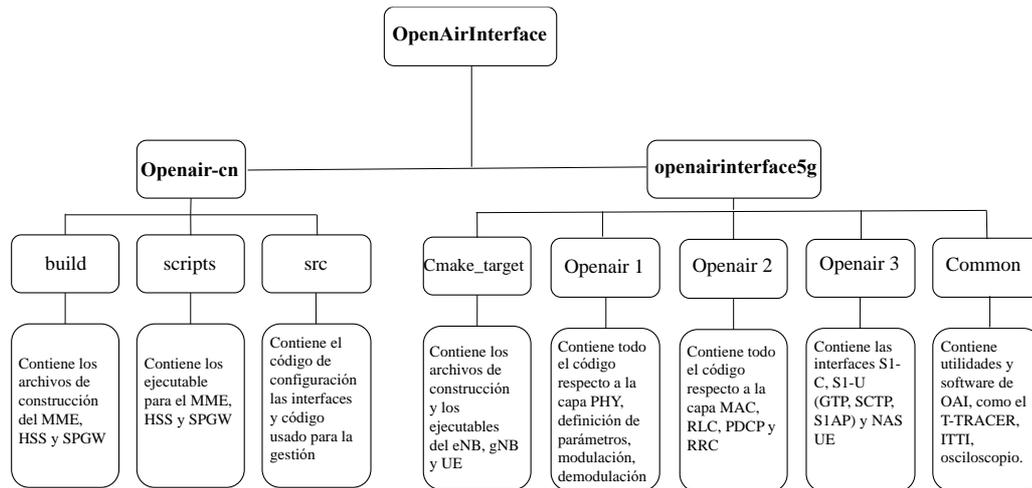


Fig. 6 Estructura de Carpeta OAI

Actualmente, OAI está compuesta por diferentes miembros colaboradores, como empresas desarrolladoras de software, hardware, universidades e institutos de investigación, donde nosotros la Universidad Politécnica de Valencia somos miembros.

1.5. OBJETIVOS

Este Trabajo Final de Máster (TFM) entra dentro del marco del proyecto Valencia Campus 5G, cuyo principal objetivo es el desarrollo de nuevas redes 5G. Dentro de este marco de trabajo, se define una línea de trabajo basada en la implementación de un transmisor 5G de código abierto sobre un transmisor de propósito general. El presente TFM se centrará en la implementación un emisor 5G utilizando un USRP de propósito general. Se validarán los parámetros de transmisión y se ajustará la interconexión con el núcleo de red. Para llevar a cabo la elaboración del siguiente TFM se definen los siguientes objetivos a cumplir.

- Conocer la arquitectura de red 5G.
- Entender y conocer las plataformas SDR (*Software Defined Radio*) que implementan soluciones 5G y sus arquitecturas de implementación.
- Entender el funcionamiento del USRP: inicialización, configuración y despliegue.
- Desplegar un equipo transmisor 5G usando la implementación O-RAN de código abierto.

- Validar y analizar el funcionamiento del punto de acceso.
- Estudiar líneas futuras de aplicación para la industria 4.0.

I.6. PRINCIPALES APORTACIONES DEL TRABAJO DE FIN DE MÁSTER

Este trabajo de fin de máster fue enfocado en la RAN de la red 5G, sobre una arquitectura de red NSA, donde se estudiaron las posibles configuraciones, puertos e interfaces de conexión, se estudiaron parámetros sobre la capa física y MAC, tanto de la red 4G como de la 5G, adicional se estudiaron los dispositivos radio a usar, revisando sus características y funcionalidades.

Como resultado de la investigación se logró el despliegue de una estación base de 5G sobre una red 4G, confirmando el correcto funcionamiento de las interfaces de conexión entre las dos estaciones base y el Core, luego de esto, se realizó análisis sobre la estación base 5G generada, midiendo valores de potencia, calidad y relación señal a ruido más interferencia, que se lograron obtener por medio de equipos de medición. En el estudio se evidenciaron las prestaciones de nuestra red 5G respecto a cobertura y calidad, obteniendo valores donde un dispositivo móvil lograría una buena prestación del servicio.

I.7. ORGANIZACIÓN DE LA MEMORIA

El resto del informe está organizado de la siguiente manera: En el segundo capítulo se explica las arquitecturas de red para 5G principalmente en una NSA, donde se revisará el comportamiento de la RAN, se detallará el funcionamiento e interfaces de conexión, también se explicará el funcionamiento de SDN y NFV en las 5G, y por ultimo las características del USRP. En el capítulo III se expondrá todo el desarrollo realizado en el laboratorio, desde su instalación, configuración y puesta en marcha. En el capítulo IV se realizará un estudio de las prestaciones de la red NR, donde se verificarán valores de cobertura y prestaciones. Y por último en la sección V se encontrarán las conclusiones de la investigación y los futuros trabajos a realizar.

II. ARQUITECTURA DE RED

La arquitectura de red para 5G está formada por la red de acceso radio (RAN en sus siglas en inglés) y el núcleo de red 5G NGC (Nueva Generación Core). El RAN se encarga de la gestión de los recursos radio, con el objetivo que los usuarios se puedan conectar a la red. Por otro lado, el 5G NGC realiza funciones de autenticación del usuario, enrutamiento local, direccionamiento del tráfico de red, servicios de localización, procesamiento datos de control y usuario, políticas de acceso y movilidad, etc. Tanto el 5G NGC como el RAN son implementaciones definidas por medio de NFV y SDN, donde una de sus ventajas, es realizar la separación del plano del control y del plano usuario, mejorando así el rendimiento de la red, permitiendo despliegues más flexibles y eficientes.

El 3GPP define varias arquitecturas para la implementación de la red 5G, las cuales se agrupan en dos tipos: *Standalone* (SA) y *Non-Standalone* (NSA). Las redes 5G SA son aquellas que todos sus elementos de red son 5G, es decir, que está conformada por el 5G NCG y 5G gNB, en esta opción

solo se pueden conectar dispositivos 5G. Por otro lado, en las redes NSA se comparte el recurso del Core Network, ya sea de 4G EPC o el de 5G NGC y se compone del 4G eNB y el 5G gNB para el acceso radio, son redes que funcionan de forma conjunta, es decir que ofrecen las dos tecnologías al tiempo permitiendo que el usuario tenga conexión a las dos tecnologías.

Dentro del grupo SA [17], el 3GPP permite la implementación de la siguiente arquitectura:

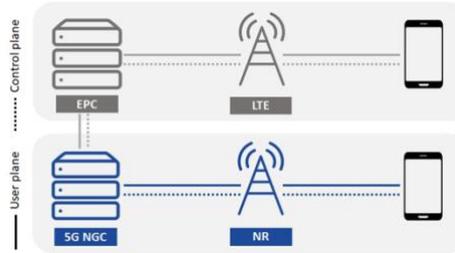


Fig. 7 StanAlone

Para las implementaciones de las redes NSA [18], el 3GPP define las siguientes implementaciones:

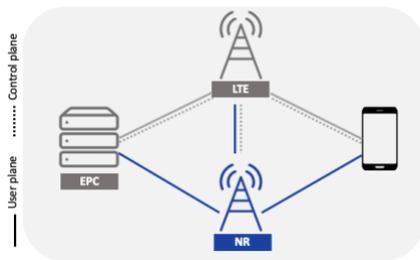


Fig. 8 LTE y NR sobre EPC (Opción 3)

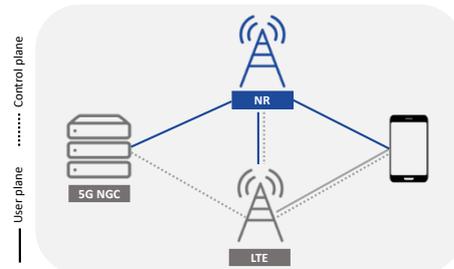


Fig. 9 NR y LTE sobre 5G NGC (Opción 4)

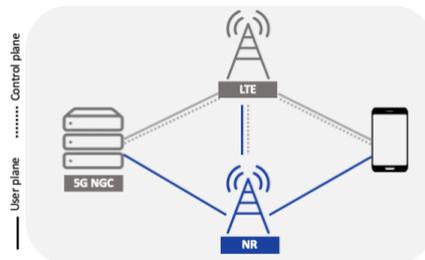


Fig. 10 LTE y NR sobre 5G NGC (Opción 7)

II.1. OPCIÓN 3 NSA

La opción 3 NSA [19] es la arquitectura con más acogida entre los operadores ya que este modo de conexión permite el despliegue de redes 5G con recursos 4G, también definida como conexión EN-DC (*E-UTRAN NR – Dual Connection*), en este modo de conexión el eNB funciona como nodo maestro y el gNB funciona como nodo secundario, donde el UE se conecta al Master eNB y este se encarga de realizar la solicitud de petición de conexión al gNB, en esta arquitectura de red se establecen las siguientes interfaces de conexión (Fig. 11 Interfaces NSA):

- S1-U: es una interfaz usada entre el eNB y el EPC específicamente con el S-GW el cual se encarga de realizar toda la gestión respecto a la conexión a datos (internet), donde enruta todos los paquetes de datos del usuario.

- S1-C: Es una interfaz usada entre el eNB y el EPC específicamente con el MME el cual se encarga de todo el control, es decir, procesos de autenticación, autorización, señalización, movilidad, estados activos e inactivos, etc.
- X2: Es la interfaz que comunica el eNB con el gNB con datos de control y de usuario.

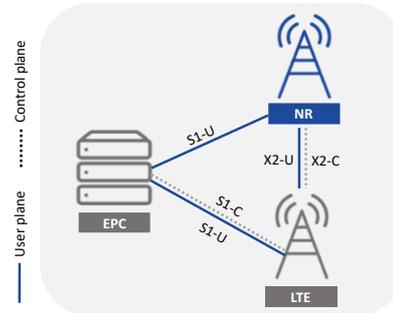


Fig. 11 Interfaces NSA

Existen tres modos de configuración que son la opción 3, opción 3a y opción 3x:

Opción 3 (ver Fig. 12): Esta opción el gNB no tiene comunicación directa con el EPC, lo realiza mediante la interfaz X2, que cumple la función de transporte en el plano de control y el plano de usuario, enviando toda la carga de datos a través del eNB, con esta configuración existen limitaciones en el tráfico de datos ya que el gNB solo utiliza una interfaz de comunicación.

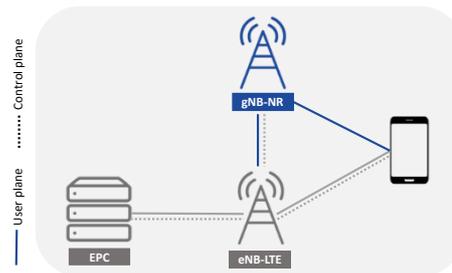


Fig. 12. NSA Opción 3

Opción 3a (ver Fig. 13): En esta opción el gNB tiene conexión con el EPC por medio de la interfaz S1-U para el plano de usuario y se conecta por medio de la interfaz X2 al eNB para el plano de control, permitiendo que sea una red más eficiente ya que separa el plano de control y usuario.

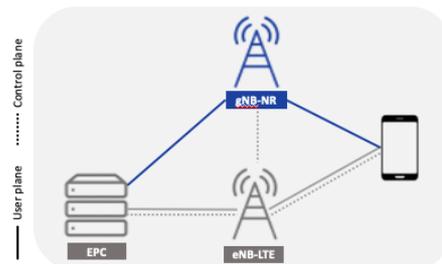


Fig. 13. NSA Opción 3a

Opción 3x (ver Fig. 14): Es la combinación de las opciones 3 y 3a, siendo la opción más eficiente ya que se puede compartir el tráfico de usuario. El gNB tiene conexión con el eNB a través de la interface X2 para el plano de control y el plano de usuario, adicional el gNB crea la interfaz S1-U

con el EPC para el plano de usuario, proporcionando una continuidad constante en el servicio ya que contiene de todas las interfaces de conexión, proporcionando mejor movilidad con tiempos de interrupción casi nulos.

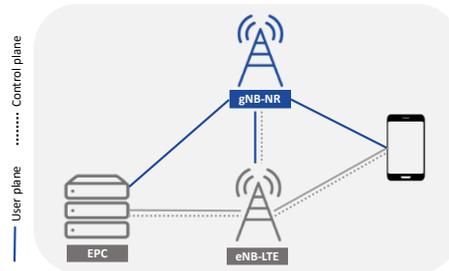


Fig. 14. NSA Opción 3x

II.2. SOFTWARE DEFINED NETWORK Y NETWORK FUNCTION VIRTUALIZATION

Las redes 5G tienen grandes desafíos en la prestación de servicios y el tráfico de datos, ya que tiene que cumplir con los requerimientos de estas tres categorías de servicios: eMBB, eMTC, uRLLC. Para ello tiene que mejorar el proceso de datos, mejorar la asignación de recursos, mejorar velocidades de transmisión, siempre con el objetivo de reducir costos, generar soluciones ágiles y escalables. Es por tal razón que las SDN y NFV son adoptadas en las redes 5G.[20]

SDN es la arquitectura diseñada para permitir redes más ágiles y rentables, su principal objetivo es separar el plano de control con el plano de datos, permitiendo que el control y la gestión de la red sea directamente programable y centralizado, así mismo, posibilita la existencia de inteligencia de red en los controladores. Permite la integración de diferentes equipos de proveedores ya que cuenta con un estándar abierto y es de gran ayuda para entornos celulares en función de escenarios cambiantes. La arquitectura SDN se divide en las siguientes capas: [21]

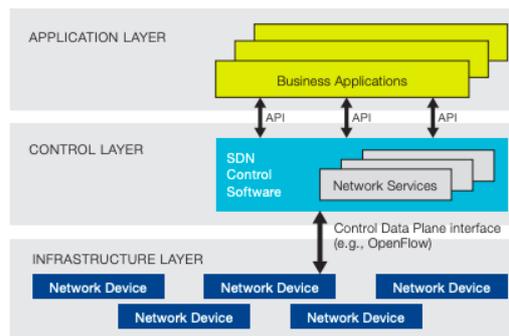


Fig. 15. Arquitectura SDN

- Capa de aplicación: permite enrutamiento adaptativo, itinerancia sin interrupciones, mantenimientos a la red en tiempo real, proporciona seguridad en la red, virtualización de la red, cloud computing, comunicando los requisitos de acceso por medio de una API que conecta con la capa de control.
- Capa de Control: Es el componente más importante de la arquitectura SDN ya que gestiona las capas de infraestructura y aplicación, contiene los servicios de red y control.

- **Capa de Infraestructura:** Es conocida como el hardware de la red donde se encuentran aplicaciones como el core network, switches, routers, estaciones base, etc.

Las NFV están definidas como una transformación de la red, ya que permiten la posibilidad de proveer diferentes servicios por medio del procesamiento del tráfico de red, utilizando funciones de virtualización e interconexión. Con la implementación de NFV se podrían tener servicios en diferentes ubicaciones, hasta en el borde de la red haciendo uso eficiente de sus recursos. Entre sus ventajas para las redes 5G se encuentra el control, aprovisionamiento de la red, alta conectividad, excelente calidad de servicio, escalabilidad, reducción en consumo de energía, mayor eficiencia, cumpliendo funciones de red como enrutadores, equilibradores de carga, contrafuegos, ofreciendo redes de alto rendimiento, alta escalabilidad, baja latencia, todo de forma virtual reduciendo costes de modificaciones y actualizaciones en hardware de red, etc. En la Fig. 16, se pueden observar las principales características de las SDN y NFV para las 5G.

SDN	NFV
CONTROL	
Estandarización de las interfaces de control Medidas para evitar degradación del rendimiento Mantenimiento y control de grandes redes	Control y aprovisionamientos perfectos Aprovisionamiento en tiempo real y dinámico Creación de políticas de red Mantenimiento y virtualización de datos masivos
FIABILIDAD	
Conectividad perfecta y rápida recuperación de conexión Requisitos de seguridad para EPC y RAN Seguridad y confiabilidad en la red de transporte y datos Equilibrio entre rendimiento, seguridad y flexibilidad.	Alta complejidad de 5G (tecnologías, dispositivos, IoT) Conectividad fluida y de alta calidad Virtualización de terminales Preocupaciones de seguridad (iguales que en el medio físico)
Escalabilidad	
Apoyo a la heterogeneidad de la tecnología y los dispositivos Bajos niveles de pérdida de paquetes Optimización de las reglas de flujo	Escalabilidad y robustez Implementación ágil Apertura e interoperabilidad, alcance mundial y administración cruzada.
Eficiencia de coste	
Reemplazo de hardware por aplicaciones de software Despliegue y adquisición de conmutadores de productos básicos Sustitución de hardware heredado Tiempo de comercialización más corto y menos riesgos de despliegue	Reducción de consumo de energía Mejora la eficiencia operativa Mayores costos de capital

Fig. 16. Principales requisitos y desafíos SDN-NFV [20]

II.3. SOFTWARE DEFINED RADIO – SDR

Un nuevo concepto se introduce en la arquitectura de red para 5G, es SDR, radio definido por software, el cual realiza la sustitución de componentes de hardware analógico, por componentes de software programables, los cuales incorporan procesadores de señales digitales (DSP), procesadores de propósito general (GPPs) y arreglos de compuertas de campo programables (FPGA). Los dispositivos SDR son equipos programables y reconfigurables, son dispositivos que reducen tiempo y costos en comparación con los dispositivos radio de generaciones anteriores, ya que estos son de propósito especial. Por medio de las SDR, se podrían realizar diferentes configuraciones y aplicar estándares de comunicación, configurando diferentes portadoras, anchos de banda, variando la potencia de transmisión, configuraciones de la capa Física, tecnologías de comunicación como MIMO, beamforming, etc.

Dentro del desarrollo de esta tesina, se realizó el despliegue usando un SDR de la familia de los USRP, a continuación, una breve descripción de este: USRP es un dispositivo radio definido por

software de propósito general, desarrollado por Ettus Research compañía de National Instruments, es un dispositivo ideal para el estudio, investigación y desarrollo, son equipos versátiles donde se pueden transmitir y recibir diferentes formas de onda en varias frecuencias. Las principales categorías de los USRP son:

- Serie bus (B): Permite conexión a través de USB 3.0.
- Serie Network (N): Permite conexión a través de ethernet.
- Serie de alto rendimiento (X): Permite conexión por ethernet o por PCI-Express x4.
- Serie integrada (E): Diseñada para funcionar de forma independiente.

Para tener control sobre el USRP se debe usar su controlador de hardware UHD, este proporciona todas las herramientas necesarias para el control del USRP desde el ordenador. El UHD está desarrollado en C/C++, y la mayoría de su código fuente es abierta, por lo que el usuario puede interactuar con el y crear sus propias aplicaciones para el control del USRP.

Para el despliegue de nuestra red, se usaron 2 USRP B210 con las siguientes especificaciones:

- Dos canales con FR continua de 70 MHz a 6 GHz.
- Full Duplex.
- SISO, con ancho de banda de 56 MHz en tiempo real.
- MIMO (2 Tx y 2 Rx) con ancho de banda de 30,72 MHz en tiempo real.
- Conectividad USB 3.0 SuperSpeed.
- FPGA Spartan (abierto y reconfigurable).



Fig. 17. USRP B210

III. DESPLIEGUE DE LA RED CON OPEN AIR INTERFACE

Este desarrollo de tesis se enfocó en la arquitectura de red NSA 3X, haciendo uso de la modalidad EN-DC, todo el despliegue fue realizado en un servidor comercial, instalando un Core desarrollado por OpenAirInterface de 4G EPC y dos USRP's B210, uno cumpliendo función de eNB (4G) y el otro para gNB (5G).

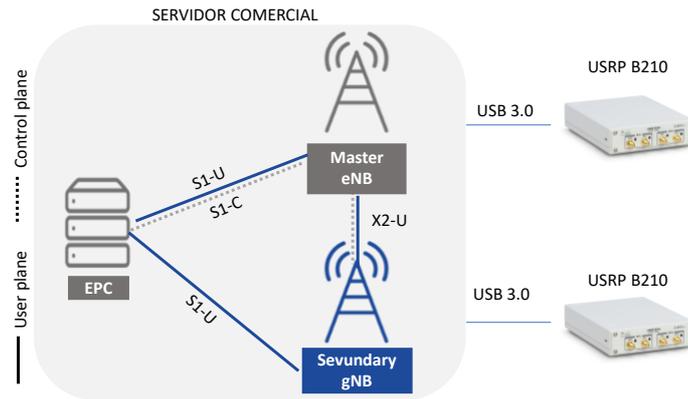


Fig. 18. Diagrama de conexión

III.1. CORE NETWORK-EPC

El Core Network-EPC usado para este laboratorio fue la última versión de EPC de OAI, que se encuentra disponible en el repositorio GIT de OpenAirInterface, este EPC fue desplegado y configurado por el grupo de investigación ITEAM en el laboratorio, equipado con todas las interfaces necesarias para la comunicación y funcionamiento de este.

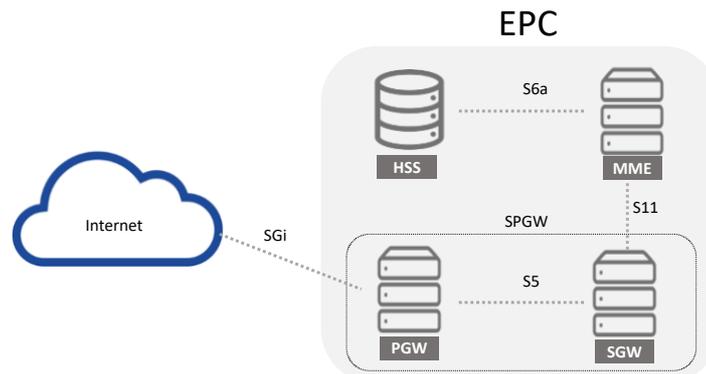


Fig. 19. Estructura del EPC

Este EPC se compone de un MME (*Mobility Management Entity*), encargado de realizar y controlar gestión de movilidad, posición, sesión, autenticación de usuario, control de acceso a la red, etc.

El HSS, es el encargado de almacenar la base de datos de los usuarios o dispositivos a conectar, contiene permisos, datos de servicio, identidad de usuario, etc.

Y por último contiene S/P-GW, encargado de todo el tráfico de datos del usuario, asigna direcciones IP a los dispositivos, contiene tarificación, control de calidad, funciona como puerta de enlace entre internet y el usuario.

III.2. REQUERIMIENTOS DE SOFTWARE Y HARDWARE

OAI exige unos requisitos mínimos de hardware y software para que el sistema funcione de forma adecuada, haciendo énfasis en sistemas y equipos de baja latencia ya que es necesario el uso de herramientas en tiempo real y la latencia debe ser la mínima posible, por lo que define lo siguiente:

Para el Sistema Operativo es necesario:

- Ubuntu 16.04 o 18.04 con opción de kernel de baja latencia.

Para los requerimientos de PC son necesarias las siguientes características:

Se requieren sistemas con arquitectura basada en intel para eNB y gNB ya que permite realizar una configuración del SIMD (SSE, SSE2, SSE3, SSE4, y AVX2). SIMD (Single Instruction, multiple data) se refiere a que se pueden realizar modificaciones en el procesador para aumentar su rendimiento cuando se realizan operaciones en varios objetos de datos.

- Intel Core i7 6900K (8 Cores), 16 GB DDR (RAM), 500 GB SSD (Disco duro).
- Intel Core i9 7980X (18 Cores), 16 GB DDR (RAM), 500 GB SSD (Disco duro).
- **Intel Xeon Gold 6154 CPU@3.00 GHZ con 18 Cores.**

Para el acceso radio son compatibles los siguientes SDR

- USRP N310.
- USRP X310.
- **USRP B210.**
- BLADE RF.
- LIMESD.
- EURECOM EXPRES MIMO2 RF.

III.3. *INSTALACIÓN RAN*

Para el desarrollo de esta tesina se realizó la instalación de Ubuntu 18.04, para ello se debe garantizar que la versión de Ubuntu instalada se encuentre actualizada [22].

1. Instalar componentes GIT

Para este paso es necesario instalar la subversión GIT para poder clonar y ejecutar el repositorio de OAI, se debe ingresar a la terminal de Linux y ejecutar las siguientes líneas de comando:

```
- sudo apt-get update  
- sudo apt-get install subversion git
```

2. Descargar repositorio de OAI

Ahora es necesario conseguir una versión estable de OAI en el servidor GIT por lo que se recomienda realizar la descarga directamente desde la página escogiendo la rama de desarrollador, ya que es la rama más actualizada, se recomienda descargar un archivo .tar ingresando al siguiente enlace <https://gitlab.eurecom.fr/oai/openairinterface5g/-/tree/develop> y descargar el código fuente, ver Fig. 20.

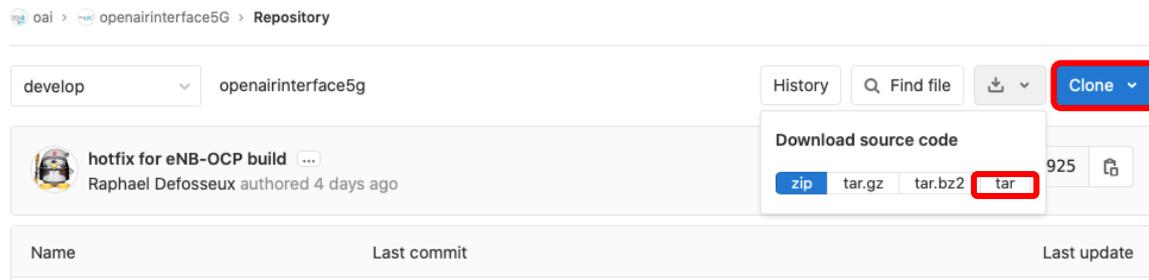


Fig. 20. Descargar Código Fuente OAI

Este archivo de configuración adiciona los siguientes binarios para realizar las respectivas compilaciones y configuraciones para ejecutar un eNB y un gNB, este fichero cuenta con las actualizaciones y recomendaciones de la 3GPP – Reléase 15.

- LTE UE: lte_uesoftmodem
- **5G UE: nr-uesoftmodem**
- LTE eNodeB: lte-softmodem
- **5G gNodeB: nr-softmodem**
- LTE PHY simulators: dlsim y ulsim
- **5G PHY simulators: nr_dlschsim, nr_dlsim, nr_pbchsim, nr_pucchsim, nr_ulschsim, nr_ulsim, polartest, smallblocktest, ulsim, ldpctest**

El código descargado queda almacenado en la carpeta de descargas del Ubuntu con el nombre de “**openairinterface5g-develop.tar**”, para una mejor organización de los archivos se creó una carpeta llamada 5GOAI y se pasó el archivo descargado, ahora por medio de la terminal de Ubuntu se realiza el siguiente procedimiento para descomprimir el archivo:

```

- cd 5GOAI
- sudo tar -zxvf openairinterface5g-develop.tar

```

3. Instalar controladores UHD para USRP B210

Para que nuestro dispositivo USRP funcione correctamente es necesario instalar unas librerías, descargar y clonar, esto se realiza desde el repositorio GIT, con las siguientes instrucciones:

```

- cd apt-get install libboost-all-dev libusb-1.0-0-dev python-mako
doxygen python-docutils python-requests python3-pip cmake build-
essential
- pip3 install mako numpy
- git clone git://github.com/EttusResearch/uhd.git
- cd uhd
- mkdir host/build

```

21 Implementación de un Prototipo de Estación Base 5G mediante la Transmisión con USRPs

```
- mkdir host/build
- cd host/buid
- make -j4
- sudo make install
- sudo ldconfig
- sudo /usr/lib/uhd/uhd_utils/uhd_images_downloader.py
```

4. Construir los ejecutables para eNB y gNB

Se debe ingresar al directorio de OAI y cambiarnos de rama a la de DEVELOP:

```
- cd openairinterface5g-develop
- sudo git checkout develop
```

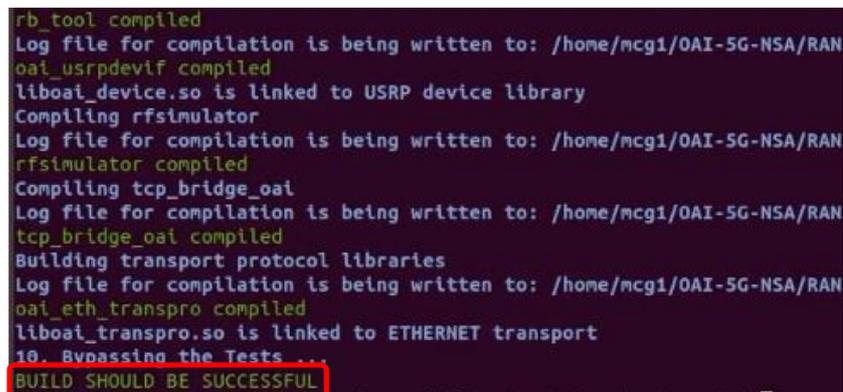
Ahora se construyen los ejecutables

```
- source oaienv
- cd cmake_targets
- sudo ./build_oai -I -w USRP --eNB --gNB
```

Donde:

- **-I:** Instala software adicional requerido y todas las librerías requeridas para su funcionamiento.
- **-w:** Es el preámbulo para escoger la interfaz radio e instala los requisitos de software del dispositivo radio a usar, para nuestro caso toma la configuración del USRP B210.
- **--eNB:** Construye las librerías para todas las funciones del eNB y crea el ejecutable *lte-softmodem*
- **--gNB:** Construye las librerías para todas las funciones del gNB y crea el ejecutable *nr-softmodem*

Luego de ejecutar el comando anterior se instalarán todas las dependencias, parámetros y configuraciones del software, debe salir un mensaje igual que en la Fig. 21, donde se confirma que el procedimiento de instalación fue exitoso.



```
rb_tool compiled
Log file for compilation is being written to: /home/mcg1/OAI-5G-NSA/RAN
oai_usrpdevif compiled
liboai_device.so is linked to USRP device library
Compiling rfsimulator
Log file for compilation is being written to: /home/mcg1/OAI-5G-NSA/RAN
rfsimulator compiled
Compiling tcp_bridge_oai
Log file for compilation is being written to: /home/mcg1/OAI-5G-NSA/RAN
tcp_bridge_oai compiled
Building transport protocol libraries
Log file for compilation is being written to: /home/mcg1/OAI-5G-NSA/RAN
oai_eth_transpro compiled
liboai_transpro.so is linked to ETHERNET transport
10. Bypassing the Tests ...
BUILD SHOULD BE SUCCESSFUL
```

Fig. 21. Construcción Exitosa

III.4. CONFIGURACIÓN

Existen diferentes archivos de configuración dependiendo el equipo de RF a utilizar, en nuestro caso es un USRP B210. En las siguientes carpetas se pueden encontrar diferentes archivos de configuración:

- `openairinterface5g-develop/ci-scripts/conf_files/`
- `openairinterface5g-develop/configuration/bladeRF/`
- `openairinterface5g-develop/targets/PROJECTS/GENERIC-LTE-EPC/`

Los archivos de configuración del eNB y gNB tienen los siguientes parámetros los cuales deben ser modificados según a necesidad y se definen de la siguiente manera:

- MCC (Mobile Country Code), MNC (Mobile Network Code) y TAC (Tracking Area Code).
- Parámetros Físicos: En este es donde se configuran la banda de frecuencias, las frecuencias de los enlaces ascendentes y descendentes, el número de antenas del USRP, ganancia de las antenas, modos de transmisión (FDD/TDD), configuración de los canales y señales físicas, potencia de transmisión, para el gNB tiene configuración respecto a la numerología, bloques de recursos, SCS, interfaz X2, etc.
- MME y SPGW se debe configurar los parámetros y direcciones, para poder tener conexión con el EPC.
- Interfaces de Red: aquí se configuran todas direcciones IP e interfaces a utilizar.

Las direcciones IP del Core Network y las que se asignaran al eNB y gNB son las siguientes:

- MME: 127.168.1.20/8
- eNB: 127.0.0.10/8
- gNB: 127.0.0.40/8

Para el archivo de configuración del **eNB** se tomó el archivo `enb.band7.master.conf`, se modificaron sus parámetros y se guardó con el nombre de `enb.conf`, para tener mejor acceso a este cuando se realice la ejecución del programa. Los parámetros configurados fueron el `mcc`, `mnc`, `tac`, banda de frecuencia a usar, portadora a utilizar, número de antenas tx y rx, y se activaron las interfaces y configuraciones de red, mostradas a continuación:

```
mcc = 208
mnc = 93
tac = 600
```

```
frame_type           = "FDD";
prefix_type          = "NORMAL";
eutra_band           = 7;
downlink_frequency   = 2680000000L;
```

23 Implementación de un Prototipo de Estación Base 5G mediante la Transmisión con USRPs

```
uplink_frequency_offset = -120000000;

nb_antennas_tx          = 1;
nb_antennas_rx          = 1;
enable_x2 = "yes";
t_reloc_prep            = 1000;          /* unit: millisecond */
tx2_reloc_overall       = 2000;          /* unit: millisecond */

mme_ip_address = 127.168.1.20/8

enb_interface_name_for_s1_mme = "lo";
enb_ipv4_address_for_s1_mme = "127.0.0.10/8";

enb_interface_name_for_s1u = "lo";
enb_ipv4_address_for_s1u = "127.0.0.10/8";

enable_x2 = "yes";
enb_ipv4_address_for_x2c = "127.0.0.10/8"
```

Para el archivo de configuración del gNB se tomó como referencia el siguiente archivo *gnb.band78.106PRB.30kHz.usrb2x0.conf*, se cambió el nombre a *gnbai1.conf*, se modificaron parámetros iguales a los configurados en el eNB, a diferencia de la banda de frecuencia, que para este desarrollo se usó la banda 78 (3500MHz), y en la opción de frecuencia absoluta se debe poner el valor de ARCFN, que para nuestro caso es 640000 equivalente a una portadora en 3619.08 MHz.

A continuación, los datos modificados:

```
mcc = 208
mnc = 93
tac = 600

absoluteFrequencySSB      = 641272;      //Frecuencia de 3619.08 MHz
dl_frequencyBand          = 78;
dl_absoluteFrequencyPointA = 640000;
# subcarrierSpacing
# 0=kHz15, 1=kHz30, 2=kHz60, 3=kHz120
dl_subcarrierSpacing      = 1;

////////// MME parameters:
    mme_ip_address        = ( { ipv4      = "127.168.1.20";
                               ipv6      = "192:168:30::17";
                               active    = "yes";
                               preference = "ipv4";
                               }
    );

enable_x2 = "yes";
t_reloc_prep      = 1000;          /* unit: millisecond */
tx2_reloc_overall = 2000;          /* unit: millisecond */
target_enb_x2_ip_address = (
    { ipv4      = "127.0.0.10/8";
      ipv6      = "192:168:30::17";
      preference = "ipv4";
    }
);

NETWORK_INTERFACES :
{
    GNB_INTERFACE_NAME_FOR_S1_MME          = "lo";
```

```

GNB_IPV4_ADDRESS_FOR_S1_MME           = "127.0.0.40/8";
GNB_INTERFACE_NAME_FOR_S1U            = "lo";
GNB_IPV4_ADDRESS_FOR_S1U              = "127.0.0.40/8";
GNB_PORT_FOR_S1U                      = 2152; # Spec 2152
GNB_IPV4_ADDRESS_FOR_X2C              = "127.0.0.40/8";
GNB_PORT_FOR_X2C                      = 36422; # Spec 36422
};

```

Para el gNB es necesario realizar una configuración en la frecuencia, se debe agregar manualmente en directorio .C del archivo de configuración, el archivo se encuentra en la ruta **openair2/RRC/LTE/rrc_eNB.c** , se debe buscar la siguiente línea de código:

```
MeasObj2->measObject.choice.measObjectNR_r15.carrierFreq_r15 =641272;
```

Modificar la frecuencia que aparece allí, por la portadora a usar, es decir, el mismo valor de frecuencia absoluta puesto en el archivo de configuración (641272). Se guarda la modificación y se construye de nuevo el ejecutable, siguiendo el paso 4 del apartado de instalación.

III.5. EJECUCIÓN

Se debe primero confirmar que los equipos estén conectados correctamente, que el direccionamiento IP esté bien y que exista comunicación entre EPC, eNB y gNB. Cabe resaltar que es necesario que los USRP B210 estén conectados al servidor por medio de un cable USB 3.0, de lo contrario no funcionarán correctamente.

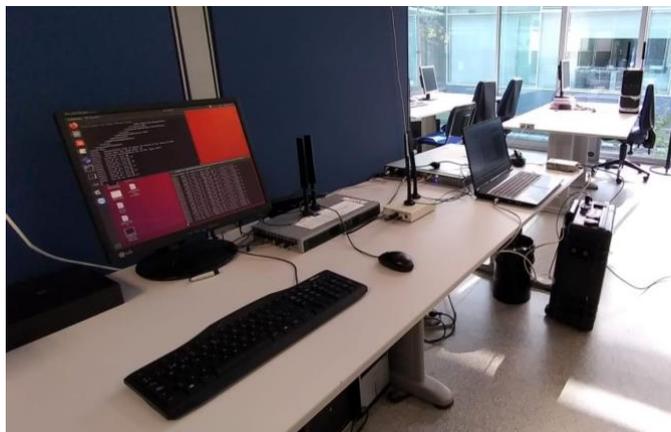


Fig. 22. Escenario de Trabajo

Luego de confirmar la correcta conexión de los dispositivos e interfaces, se procede a ejecutar el programa con el siguiente orden:

1. Ejecutar el EPC

Para el EPC es necesario ejecutar los servicios de HSS, MME, S/P-GW, primero se debe ingresar al directorio donde está instalado el EPC y ejecutar los siguientes comandos en pestañas independientes:

```

- cd openair-cn/scripts
- sudo oai_hss -j usr/local/etc/oai/hss_rel14.json

```

```

Registering s6as6d dictionary
Registering s6c dictionary
Registering s6c command handlers
Registering SERIFSR command handler
[2020-08-25T10:58:59.331] [hss] [s6as6d] [startup] Registering s6as6d command handlers
[2020-08-25T10:58:59.331] [hss] [s6as6d] [startup] Registering UPLR command handler
[2020-08-25T10:58:59.331] [hss] [s6as6d] [startup] Registering AUIR command handler
[2020-08-25T10:58:59.331] [hss] [s6as6d] [startup] Registering PUUR command handler
10:58:59 NOTI Local server address(es): 10.236.31.152{---L-} 172.17.0.1{---L-} 192.168.16.1{---L-}
The freeDiameter engine has been started
[2020-08-25T10:58:59.332] [hss] [system] [startup] Started REST server on port [9081]
[2020-08-25T10:58:59.332] [hss] [system] [startup] Started OSS server on port [9082]
10:58:59 NOTI Unable to resolve address for peer 'mme.localdomain' (Name or service not known), aborting
10:58:59 ERROR mme.localdomain: Going to ZOMBIE state (no more activity)
10:58:59 NOTI 'STATE_CLOSED' -> 'STATE_ZOMBIE' (terminated) 'mme.localdomain'
Accepting mme.openairinterface.org peer
10:59:21 NOTI Connected to 'mme.openairinterface.org' (TCP,soc#27), remote capabilities:
10:59:21 NOTI Capabilities-Exchange-Request(257)[R---], Length=264, Hop-By-Hop-Id=0x37689789, End-to-End=0x2e99
nairinterface.org" }, { Origin-State-Id(278)[-M]=1598345961 (0x5f44d2e9) }, { Host-IP-Address(257)[-M]=10.236.31.152
{ Vendor-Id(266)[-M]=0 (0x0) }, { Product-Name(269)[-M]="freeDiameter" }, { Firmware-Revision(267)[-M]=10201 (0x27d9)
application-Id(260)[-M]={ Auth-Application-Id(258)[-M]=16777251 (0x1000023) }, { Vendor-Id(266)[-M]=10415 (0x28af) }
(0x28af) }, { Supported-Vendor-Id(265)[-M]=13019 (0x32db) }
10:59:21 NOTI No TLS protection negotiated with peer 'mme.openairinterface.org'.
10:59:21 NOTI 'STATE_CLOSED' -> 'STATE_OPEN' 'mme.openairinterface.org'
    
```

Fig. 23. Estado Activo HSS

Cuando se lanza y aparece STATE OPEN (ver Fig. 23)significa que el HSS se ha ejecutado de forma correcta.

Para lanzar el MME se realiza de la siguiente manera y cuando se ejecute debe aparecer algo parecido a la Fig. 24.

```

sudo ./run_mme --config-file /usr/local/etc/oai/mme.conf --set-virt-if
    
```

```

000346 00070:869259 7F4097FFF700 DEBUG MME-AP src/mme_app/mme_app_statistics.c:0045 =====
000347 00070:869305 7F4097FFF700 DEBUG MME-AP src/mme_app/mme_app_statistics.c:0046
000348 00070:869316 7F4097FFF700 DEBUG MME-AP src/mme_app/mme_app_statistics.c:0048
000349 00070:869320 7F4097FFF700 DEBUG MME-AP src/mme_app/mme_app_statistics.c:0050
000350 00070:869339 7F4097FFF700 DEBUG MME-AP src/mme_app/mme_app_statistics.c:0052
000351 00070:869353 7F4097FFF700 DEBUG MME-AP src/mme_app/mme_app_statistics.c:0054
000352 00070:869365 7F4097FFF700 DEBUG MME-AP src/mme_app/mme_app_statistics.c:0056
000353 00070:869380 7F4097FFF700 DEBUG MME-AP src/mme_app/mme_app_statistics.c:0057 =====
Current Status| Added since last display| Removed since last display
connected eNBs| 0| 0| 0
attached UEs| 0| 0| 0
connected UEs| 0| 0| 0
default Bearers| 0| 0| 0
E-U Bearers| 0| 0| 0
===== STATISTICS =====
    
```

Fig. 24. Estado Activo MME

Para lanzar el SPGW se deben hacer dos procesos, el primero lanzando el SPGWC por medio de la siguiente línea de comandos y confirmando que se ejecutó de forma correcta por medio del mensaje de la Fig. 25.

```

sudo spgwc -o -c /usr/local/etc/oai/spgw_c_phy.conf
    
```

```

[2020-08-25T11:11:03.856893] [spgwc] [udp ] [debug] udp_server::udp_server(127.16.1.104:0)
[2020-08-25T11:11:03.856900] [spgwc] [gtpv2_c ] [info] gtpv2c_stack created listening to 127.16.
[2020-08-25T11:11:03.856907] [spgwc] [udp ] [trace] udp_server::start_receive
[2020-08-25T11:11:03.856994] [spgwc] [udp ] [trace] udp_server::start_receive
[2020-08-25T11:11:03.857106] [spgwc] [sgwc_s11 ] [start] Starting...
[2020-08-25T11:11:03.858284] [spgwc] [sgwc_s11 ] [start] Started
    
```

Fig. 25. SPGWC Estado Activo

Por último, se lanza el SPGWU, con la siguiente línea de comandos y se inicia el servicio como se muestra en la Fig.26.

```

sudo spgwu -o -c /usr/local/etc/oai/spgw_u_phy.conf
    
```

```

[2020-08-25T11:00:56.014716] [spgww] [spgww_sx] [start] Starting...
[2020-08-25T11:00:56.016240] [spgww] [pfc] [trace] Sending PFCP_ASSOCIATION_SETUP_REQUEST, seq 14429
[2020-08-25T11:00:56.016437] [spgww] [spgww_sx] [start] Started
[2020-08-25T11:00:56.016509] [spgww] [udp] [debug] Creating new listen socket on address 0.0.0.0 and

[2020-08-25T11:00:56.016543] [spgww] [udp] [debug] udp_server::udp_server(0.0.0.0:2152)
[2020-08-25T11:00:56.016570] [spgww] [gtpv1_u] [info] gtpu_l4_stack created listening to 0.0.0.0:2152
[2020-08-25T11:00:56.016601] [spgww] [udp] [trace] udp_server::start_receive
[2020-08-25T11:00:56.016759] [spgww] [spgww_sx] [info] handle_receive(35 bytes)
[2020-08-25T11:00:56.016783] [spgww] [spgww_s1u] [start] Starting...
[2020-08-25T11:00:56.016874] [spgww] [spgww_sx] [info] Received SX ASSOCIATION SETUP RESPONSE
[2020-08-25T11:00:56.018019] [spgww] [spgww_s1u] [start] Started
net.ipv4.conf.all.forwarding = 1
net.ipv4.conf.all.send_redirects = 0
net.ipv4.conf.default.send_redirects = 0
net.ipv4.conf.all.accept_redirects = 0
net.ipv4.conf.default.accept_redirects = 0
net.ipv4.conf.pdn.send_redirects = 0
net.ipv4.conf.pdn.accept_redirects = 0
[2020-08-25T11:00:57.143157] [spgww] [spgww_app] [start] Started

```

Fig. 26. SPGWU Estado Activo.

2. Lanzar eNB

Para lanzar el eNB es necesario que solo esté conectado un USRP vía USB al servidor, ya que, si se encuentran los dos USRP conectados al tiempo y se lanza el eNB, genera problemas de conexión. Para lanzar el eNB se necesita ingresar a la carpeta donde están los ejecutables y luego lanzar el ejecutable con la configuración de nuestra red, con la siguiente instrucción:

```

- cd openairinterface5g-develop/cmake_targets/ran_build/build
- sudo ./lte-softmodem -O /home/mcg/ranfiles/enb.conf

```

Luego de lanzar el eNB se evidencia como el programa empieza a crear las interfaces de conexión y a habilitar parámetros del USRP según nuestra configuración ver Fig. 27. También crea y configura el protocolo SCTP a la dirección del eNB que se indicó en el archivo de configuración, ver Fig. 28.

```

[RRC] [FRAME 00000][eNB][MOD 00][RNTI 0] Checking release
[RRC] [FRAME 00000][eNB][MOD 00][RNTI 0] Rel14 RRC detected, MBMS flag 0
[RRC] [eNB 0] Node type 0
[RRC] configuration->schedulingInfoSIB1_BR_r13[CC id] 0
[RRC] Configuring MIB (N_RB_DL 25,phich_Resource 0,phich_Duration 0)
[UDP] Inserting new descriptor for task 35, sd 85
[UDP] Initializing UDP for local address 127.0.0.10 with port 2152: DONE
[X2AP] eNB[0] eNB id 3585 acting as a listener (server)
[SCTP] Received SCTP_INIT_MSG_MULTIPLE
[MIB] systembandwidth 4, phich_duration 0, phich_resource 0, stn 0
[SIAP] Registered new eNB[0] and macro eNB id 3585
[RRC] [MIB] schedulingInfoSIB1 0
[SIAP] [eNB 0] check the mme registration state
[RRC] [eNB 0] Configuration SIB2/3, eMBMS = 0
[MAC] Configuring MIB for instance 0, CCid 0 : (band 7,N_RB_DL 25,Nid_cell 0,p 1,DL freq 2680000000,phich_config.resource 0, phich_config.duration 0,
[MAC] [CONFIG]SIB2/3 contents (partial)
[MAC] [CONFIG]pusch_config_common.n_SB = 1
[MAC] [CONFIG]pusch_config_common.hoppingMode = 0
[MAC] [CONFIG]pusch_config_common.pusch_HoppingOffset = 0
[MAC] [CONFIG]pusch_config_common.enable64QAM = 0
[MAC] [CONFIG]pusch_config_common.groupHoppingEnabled = 1
[MAC] [CONFIG]pusch_config_common.groupAssignmentPUSCH = 0
[MAC] [CONFIG]pusch_config_common.sequenceHoppingEnabled = 0
[MAC] [CONFIG]pusch_config_common.cycleShift = 1
[PHY] Configuring MIB for instance 0, CCid 0 : (band 7,N_RB_DL 25, N_RB_UL 25, Nid_cell 0,eNB_tx_antenna_ports 1,Ncp 0,DL freq 3350,phich_config.resource
[PHY] Initializing frame parms for N_RB_DL 25, Ncp 0, osf 1
[PHY] lte_parms.c: Setting N_RB_DL to 25, ofdm_symbol_size 512
[PHY] Creating new listen socket on port 36422 with
[SCTP] IPv4 addresses:
[SCTP] - 127.0.0.10

```

Fig. 27. Activación de Protocolos e Interfaces

```
[SCTP] Creating new listen socket on port 36422 with
[SCTP] type addresses:
[SCTP] - 127.0.0.10
[LIBCONFIG] loader_coding: 2/2 parameters successfully set, (1 to default value)
[SCTP] Converted ipv4 address 127.168.1.20 to network type
[SCTP] connectx assoc_id 505 in progress..., used 1 addresses
[SCTP] Inserted new descriptor for sd 87 in list, nb elements 2, assoc_id 505
[SCTP] Found data for descriptor 87
[SCTP] Received notification for sd 87, type 32769
[SCTP] Client association changed: 0
[SCTP] -----
[SCTP] Peer addresses:
[SCTP] - [127.168.1.20]
[SCTP] -----
[SCTP] SCTP Status:
[SCTP] assoc_id ..... 505
[SCTP] state ..... 4
[SCTP] lstrms ..... 2
[SCTP] outstrms ..... 2
[SCTP] fragmentation : 65484
[SCTP] pending data : 0
[SCTP] unack data ... 0
[SCTP] rwnd ..... 106496
[SCTP] peer info :
[SCTP] state ..... 2
[SCTP] cwnd ..... 131064
[SCTP] srtt ..... 0
[SCTP] rto ..... 3000
[SCTP] mtu ..... 65532
[SCTP] -----
```

Fig. 28. Estatus Protocolo SCTP.

Reconoce, asigna los valores al USRP (Fig. 29) y se pone en marcha el eNB (Fig. 29).

```
[LOAD] Library libuhd-3.0 successfully loaded
[HW] UHD version 3.14.1.HEAD-0-g0347a6d8 (3.14.1)
[INFO] [UHD] linux; GNU C++ version 7.5.0; Boost_106501; UHD_3.14.1.HEAD-0
[HW] Found USRP b200
Found USRP b200
[INFO] [B200] Detected Device: B210
[INFO] [B200] Operating over USB 3.
[INFO] [B200] Initialize CODEC control...
[INFO] [B200] Initialize Radio control...
[INFO] [B200] Performing register loopback test...
[INFO] [B200] Register loopback test passed
[INFO] [B200] Performing register loopback test...
[INFO] [B200] Register loopback test passed
[INFO] [B200] Asking for clock rate 30.720000 MHz...
[INFO] [B200] Actually got clock rate 30.720000 MHz.
[HW] Time source set neither in usrp_args nor on command line, using def
-- Using calibration table: calib_table_b210_38
[INFO] [B200] Asking for clock rate 30.720000 MHz...
[INFO] [B200] OK
```

Fig. 29. Reconocimiento USRP

```
[TMR] Created Posix thread TASK_MME_APP
[LIBCONFIG] MMEs.[0]: 1/1 parameters successfully set, (1 to de
[MCE_APP] Creating MCE_APP eNB Task
[HW] Time in secs now: 22887905
[HW] Time in secs last pps: 17041788
[PHY] RU 0 rf device ready
[TMR] Created Posix thread TASK_MCE_APP
[LIBCONFIG] MCEs.[0]: 1/1 parameters successfully set, (1 to de
[LIBCONFIG] MCEs.[0]: 1/1 parameters successfully set, (1 to de
[ENB_APP] TYPE <CTRL-C> TO TERMINATE
[ENB_APP] [MCE 0] MCE_app_register via M3AP for instance 0
[MAC] SCHED_MODE = 0
[PHY] prach_I0 = 0.0 dB
[PHY] max_I0 24, min_I0 17
[PHY] prach_I0 = 0.0 dB
[PHY] max_I0 24, min_I0 20
[PHY] prach_I0 = 0.0 dB
[PHY] max_I0 24, min_I0 19
```

Fig. 30. Puesta en Marcha eNB

3. Lanzar gNB

Después que el eNB se encuentre lanzado, se debe conectar el otro USRP al servidor por medio de USB, se lanza de la siguiente manera:

```
- cd openairinterface5g-develop/cmake_targets/ran_build/build
- sudo ./nr-softmodem -O /home/mcg/ranfiles/gnbail.conf -E
```

En la Fig. 31 se puede evidenciar como se lanzan los parámetros de configuración de diferentes capas y se crean las interfaces necesarias para la comunicación. Y en la Fig. 32 se evidencia la inicialización de la interfaz X2.

```
[PHY] [nr-softmodem.c] gNB structure allocated
wait_gNBs()
[PHY] [nr-softmodem.c] Waiting for gNB LI instances to all get configured ... sleeping 50ms (nb_nr_sl1_inst 1)
[PDCP] PDCP layer has been initialized
[PHY] Installing callbacks for RF Module - UL_Indication
[PHY] gNB_app_task() RC.nb_nr_LI_inst:1
[PHY] l1_north_init_gNB() RC.nb_nr_LI_inst:1
[PHY] Installing callbacks for RF Module - UL_Indication
[PHY] l1_north_init_gNB() RC.gNB[0] installing callbacks
[GNB_APP] Allocating gNB_RRC_INST for 1 instances
[PHY] gNB_app_task() RC.nb_nr_inst:1 RC.nrrrc:0x7f7c34002e00
[PHY] gNB_app_task() Creating RRC instance RC.nrrrc[0]:0x7f7c34002e00 (1 of 1)
[LIBCONFIG] (root): 2/2 parameters successfully set, (0 to default value)
[LIBCONFIG] gNBs.[0].servingCellConfigCommon.[0]: 155/155 parameters successfully set, (83 to default value)
[PHY] Read in ServingCellConfigCommon (PhysCellId 0, ABSFREQSSB 641272, DLBand 78, ABSFREQPOINTA 640000, DLBW 106,RACH_TargetReceivedPower -118
```

Fig. 31. Activación de Capas gNB

```
[LIBCONFIG] gNBs.[0].plmn_list.[0]: 3/3 parameters successfully set, (0 to
SSB_SCO 31
pdsch_AntennaPorts 1
[GNB_APP] Sending configuration message to NR_RRC task
[X2AP] X2AP enabled
[NR_RRC] Received message NRRRC_CONFIGURATION_REQ
[NR_RRC] [gNB 0] Received NRRRC_CONFIGURATION_REQ : 0x7f7c34004430
[NR_RRC] [FRAME 00000][eNB][MOD 00][RNTI 0] Init...
[X2AP] GNB_ID: 0
```

Fig. 32. Interfaz X2 Activa.

Se confirma la creación de la interfaz S1-U, mediante el protocolo SCTP.

```
[SCTP] -----
[SCTP] Peer addresses:
[SCTP]   - [127.0.0.10]
[SCTP] -----
[SCTP] Sctp Status:
[SCTP] assoc id .....: 507
[SCTP] state .....: 4
[SCTP] instrms .....: 32
[SCTP] outstrms .....: 32
[SCTP] fragmentation : 65484
[SCTP] pending data .: 0
[SCTP] unack data ...: 0
[SCTP] rwnd .....: 106496
[SCTP] peer info   :
[SCTP] state ....: 2
[SCTP] cwnd .....: 131064
[SCTP] srtt .....: 0
[SCTP] rto .....: 3000
[SCTP] mtu .....: 65532
[SCTP] -----
[SCTP] Comm up notified for sd 87, assigned assoc_id 507
[SCTP] Found data for descriptor 87
here comes the tree (instance 0):
-----
```

Fig. 33. Interfaz S1-U Activa gNB.

En la figura 34 se evidencia que se ha realizado la correcta conexión entre el eNB y el gNB por medio de la interfaz X2, el paso de mensajes para establecer esta interfaz fue exitoso y queda activa.

eNB	gNB
-----	-----

```
[SCTP] Found data for descriptor 95
[X2AP] X2AP_ProcedureCode_id_endcX2Setup message!
[X2AP] TAC: 007410
[X2AP] PLMN: 02F839
<X2AP-PDU>
<successfulOutcome>
</successfulOutcome>
</X2AP-PDU>

[SCTP] Received notification for sd 87, type 32776
[X2AP] 3584 -> 00000e
[X2AP] TAC: 29712 -> 007410
<X2AP-PDU>
<InitiatingMessage>
</InitiatingMessage>

[X2AP] Successfully sent 66 bytes on stream 0 for assoc_id 507
[SCTP] Found data for descriptor 87
[SCTP] Received notification for sd 87, type 32777
[SCTP] Found data for descriptor 87
[X2AP] [507][87] Msg of length 53 received from port 36422, on
[X2AP] x2ap_eNB_decode_successfulOutcome_message!
NB L1 are configured
```

Fig. 34. Paso de Mensajes Interfaz X2, Estado Activo.

Posteriormente el programa realiza el reconocimiento del dispositivo USRP por medio de su UHD. En la figura Fig. 35 se puede observar que fue reconocido y aceptado, y se evidencia como se asignaron los valores de frecuencia establecidos en el archivo de configuración, ahora nuestra red 5G NSA se encuentra irradiando.

```
[HW] UHD version 3.14.1.HEAD-0-g0347a6d8 (3.14.1)
[INFO] [UHD] linux; GNU C++ version 7.5.0; Boost_106501; UHD_3.14.1.HEAD-0-g0347a6d8
[HW] Found USRP b200
Found USRP b200
[INFO] [B200] Detected Device: B210
[INFO] [B200] Operating over USB 3.
[INFO] [B200] Initialize CODEC control...
[INFO] [B200] Initialize Radio control...
[INFO] [B200] Performing register loopback test...
[INFO] [B200] Register loopback test passed
[INFO] [B200] Performing register loopback test...
[INFO] [B200] Register loopback test passed
[INFO] [B200] Asking for clock rate 30.720000 MHz...
[INFO] [B200] Actually got clock rate 30.720000 MHz...
[PHY] ru_thread_prach() RACH waiting for RU to be configured
[HW] Time source set neither in usrp_args nor on command line, using default!
-- Using calibration table: calib_table_b210_38
[INFO] [B200] Asking for clock rate 46.080000 MHz...
[INFO] [B200] Actually got clock rate 46.080000 MHz...
[HW] cal 0: freq 3500000000.000000, offset 44.000000, diff 119080000.000000
[HW] cal 1: freq 2600000000.000000, offset 49.800000, diff 959080000.000000
[HW] cal 2: freq 2300000000.000000, offset 51.000000, diff 1319080000.000000
[HW] cal 3: freq 1880000000.000000, offset 53.000000, diff 1739080000.000000
[HW] cal 4: freq 810000000.000000, offset 57.000000, diff 2803080000.000000
[HW] RX Gain @ 114.000000 (44.000000) => 70.000000 (max 76.000000)
[HW] USRP TX_GAIN:89.75 gain_range:89.75 tx_gain:0.00
[HW] Actual master clock: 46.080000MHz...
[HW] Actual clock source internal...
[HW] Actual time source internal...
[PHY] ru_thread_prach() RACH waiting for RU to be configured
[HW] RF board max packet size 1916, size for 100µs jitter 4608
[HW] rx_max_num_samps 1916
[HW] RX Channel 0
[HW] Actual RX sample rate: 46.080000MSps...
[HW] Actual RX frequency: 3.619080GHZ...
[HW] Actual RX gain: 70.000000...
[HW] Actual RX bandwidth: 40.000000M...
[HW] Actual RX antenna: RX2...
[HW] TX Channel 0
[HW] Actual TX sample rate: 46.080000MSps...
[HW] Actual TX frequency: 3.619080GHZ...
[HW] Actual TX gain: 89.750000...
[HW] Actual TX bandwidth: 40.000000M...
[HW] Actual TX antenna: TX/RX...
[HW] Actual TX packet size: 1916
[HW] Device timestamp: 2.172743...
[HW] [RAU] has loaded USRP B200 device.
```

Fig. 35. Reconocimiento USRP.

IV. ANÁLISIS DE PRESTACIONES DE LA RED NR

Para realizar el análisis de las prestaciones de la red privada 5G NSA desarrollada en esta tesis, en el laboratorio ITEAM, se utilizó el software comercial R&S ROMES DRIVER TEST de la compañía ROHDE & SCHWARZ el cual es un analizador de redes 5G NR, proporcionando todas las herramientas para la medición de cobertura, interferencias, rendimiento de la señal y análisis de calidad en la red 5G NR, junto con el R&S@TSME6, el cual es hardware que realiza la función de scanner de la red, tiene la capacidad de escanear frecuencias entre 350MHz hasta 6GHz, lo que hace posible medir todas las bandas actuales y futuras de cualquier tecnología compatible en este rango.



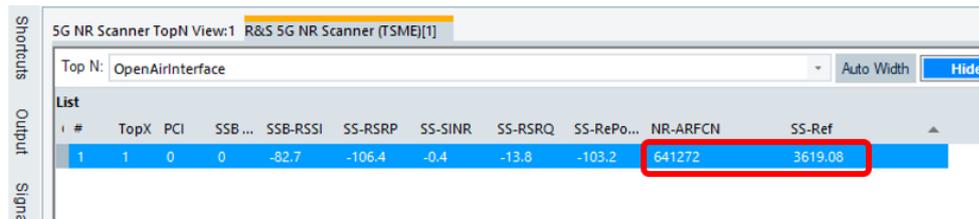
Fig. 36. ROMES TEST DRIVE

Con este software se realizaron las siguientes mediciones [23]:

- SS-RSRP (*Synchronization Signal - Reference Signal Received Power*): Es la medición de la potencia promedio de las señales de referencia recibidas en el móvil.

- **SS-RSRQ** (*Synchronization Signal - Reference Signal Received Quality*): Esta hace referencia a la calidad de la señal de referencia recibida por el móvil.
- **SS-SINR** (*Synchronization Signal – Signal to noise and Interference Radio*): Es la contribución de relación señal ruido e interferencia de la señal de referencia recibida por el móvil.

Ahora bien, para comprobar que el despliegue realizado de la red 5G NSA, esté emitiendo señal, se lanza el software ROMES DRIVE TEST con el analizador R&S@TSME6, para detectar las redes 5G NR presentes en el entorno.



#	TopX	PCI	SSB...	SSB-RSSI	SS-RSRP	SS-SINR	SS-RSRQ	SS-RePo...	NR-ARFCN	SS-Ref
1	1	0	0	-82.7	-106.4	-0.4	-13.8	-103.2	641272	3619.08

Fig. 37. Detección de Portador 5G NSA

En la Fig. 37 se puede evidenciar como el analizador detecta nuestra red, ya que los valores de ARFCN coinciden con nuestra configuración del gNB, por lo que podemos decir que ya se encuentra activa y lista para realizar pruebas de medición.

Para el análisis de nuestra red 5G NSA, se escogen dos escenarios de medición, el primero es el laboratorio de trabajo en el ITEAM y el segundo es el corredor del ITEAM (Ver Fig. 38), se ubica la antena del gNB en un punto central de cada escenario y se toman las mismas mediciones de SS-RSRP, SS-RSRQ Y SS-SINR. Además, se descargaron los archivos de medición con el propósito de tener información con más detalle respecto a la cantidad de mediciones realizadas a lo largo del test y los valores respectivos en cada punto.

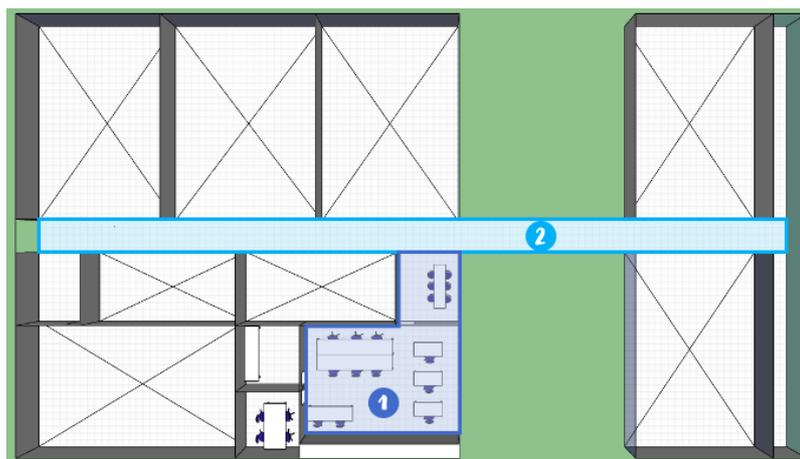


Fig. 38. Escenarios de medida

IV.1. PRIMERA ESCENARIO DE MEDIDA

En la Fig. 39, se puede observar la medición de la SS-RSRP, donde se pueden evidenciar buenos valores de potencia en la mayoría del recorrido, con valores entre -10 dBm y -108 dBm, solo se

evidencian caídas en la parte más lejana de la antena, con valores menores a los -108 dBm, que corresponden al 4,78 % de los puntos de medición totales. Como se muestra en la Fig. 40 los valores de la SS-RSRQ también son buenos, el 96% de los datos medidos registraron valores entre -13 dB y -10 dB, donde un dispositivo móvil podría conectarse a nuestra red sin interrupción.

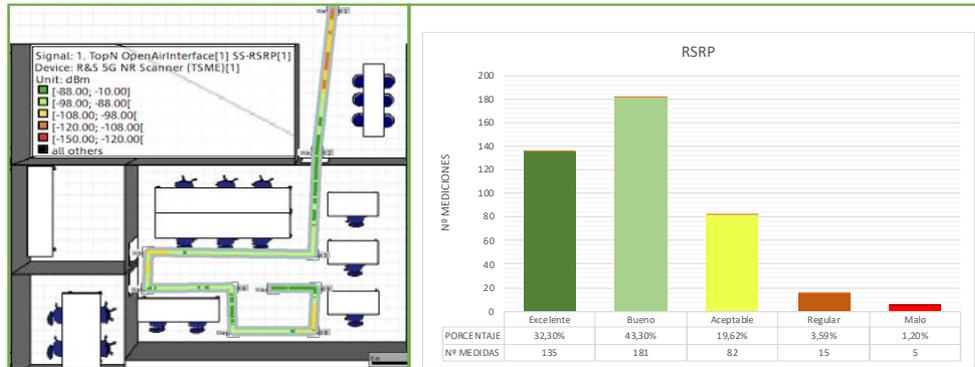


Fig. 39. Medición SS-RSRP

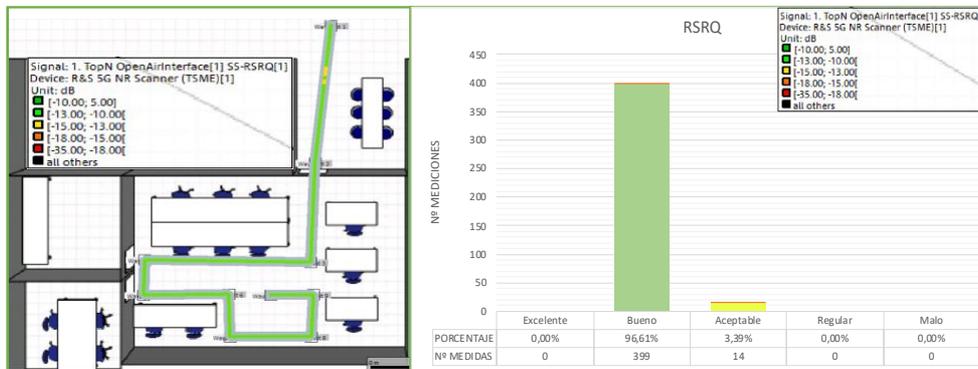


Fig. 40. Medición SS-RSRQ

Con los datos de medición obtenidos, se comprueba la relación que existe entre SS-RSRP y SS-RINR, en la Fig. 41 se pueden observar que a valores más altos de la SS-RSRP la SS-SINR se estabiliza y llega a su valor más alto de la medición, Mientras que a valores menores de -106 dBm la SS-SINR empieza a tener fluctuaciones, dando como resultado que el dispositivo móvil en este punto, tenga fallas en la conexión, ya que a valores de SS-SINR menores de 0 dBm el rendimiento caerá drásticamente.

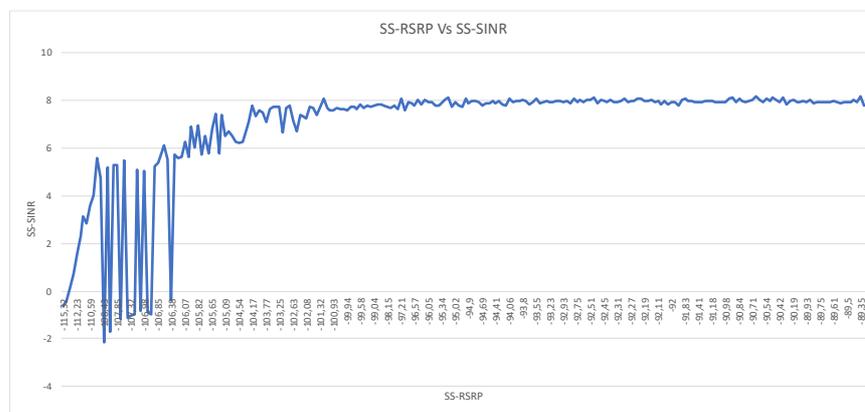


Fig. 41. SS-RSRQ VS SS-SINR Escenario 1

IV.2. SEGUNDO ESCENARIO DE MEDIDA

En la Fig. 42 correspondiente al segundo escenario, se puede observar que la SS-RSRP tiene más atenuaciones a lo largo del recorrido, algo que es coherente ya que la distancia de medida es más extensa, se evidencia que dentro de un radio aproximado de 10m desde el punto de radiación, se obtiene una buena señal SS-RSRP, sin embargo, después de esta distancia este valor empieza a disminuir, con valores entre -98 dBm a -108 dBm, los cuales son valores aceptables para la conexión de un dispositivo, solo al final del corredor decae la señal a valores donde no se establecería conexión con el móvil. Con respecto a la SS-RSRQ, se puede observar en Fig. 43, que al igual que el primer escenario, son valores muy buenos, permitiendo que el dispositivo móvil se conecte a nuestra red y tenga buenas prestaciones a lo largo del recorrido, exceptuando a los extremos del corredor ya que se experimentan las peores condiciones.

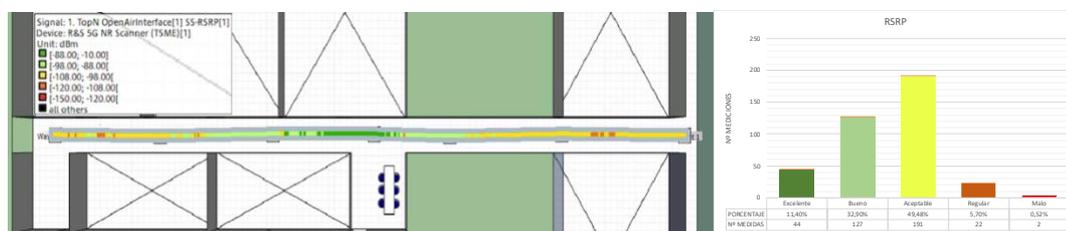


Fig. 42. Medida SS-RSRP Escenario 2

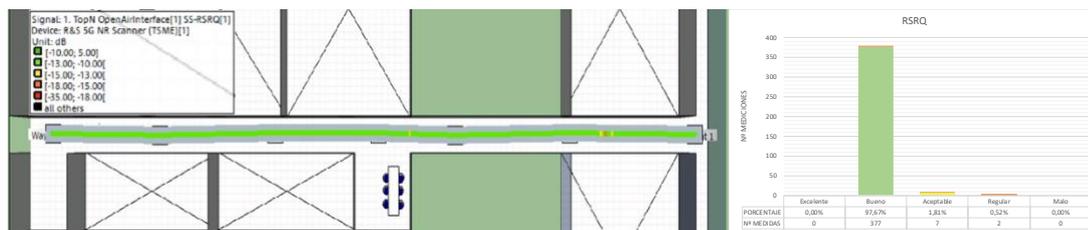


Fig. 43. Medida SS-RSRQ Escenario 2

Con respecto a la relación entre SS-RSRP y SS-SINR, en la Fig. 44 se confirma que a mejores valores de relación de potencia, la SS-SINR se estabiliza, aunque en este escenario los valores de SS-SINR tienen varias fluctuaciones, es decir que en el pasillo tenemos más interferencias en el entorno, aunque el 90,67% de los valores de SS-SINR son mayores a 5 dB, validando así estabilidad en calidad de la señal y ofreciendo velocidades de datos confiables, cuando el valor de SS-SINR tiende a 0 dB el rendimiento el cae y a valores menores de 0 dB no se tendría conexión con el dispositivo.

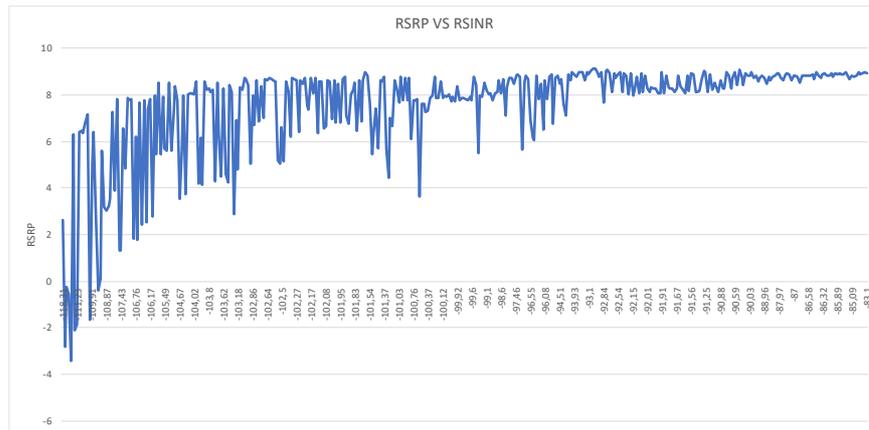


Fig. 44. SS-RSRP VS SS-SINR Escenario 2.

V. CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

En el desarrollo de esta tesina de máster se realizó un despliegue de una RAN de 5G privada con arquitectura de red NSA, con herramientas de código abierto (*open source*) como la ofrecida por OpenAirInterface y con dispositivos radio multipropósito, como los USRP. Para el despliegue fue necesario el comprender el funcionamiento de las redes 4G, ya que esta arquitectura de red se integra con el EPC y eNB de 4G. Además, se investigó sobre las nuevas características y funcionalidades de la red de acceso radio de 5G y se estudió al detalle el funcionamiento, estructura de carpetas y aplicaciones ofrecidas por OpenAirInterface.

Se pudo evidenciar en esta tesis que la interfaz X2 entre el eNB y el gNB se establece de forma correcta con el envío de mensajes iniciales de conexión. Además, se observó que se crean y se configuran todas las interfaces de conexión por medio de protocolos SCPT, confirmando así que tanto el eNB como el gNB están radiando.

Con el despliegue de esta red se logró realizar un estudio de cobertura en el laboratorio y su pasillo, donde se pudo establecer escenarios donde nuestra red 5G privada podría ofrecer ciertos servicios. Si definimos que la SS-RSRQ es recoge el nivel de la señal de referencia en todo el ancho de banda del sistema, se puede afirmar que con los equipos usados en el laboratorio se logra dar buen servicio a lo largo de los dos escenarios de medida, permitiendo así conectar diferentes equipos a nuestra red como, dispositivos para IoT, routers 5G, robots, ya que se tendrá una buena experiencia de usuario.

Al usar una herramienta de código abierto nos encontramos con diferentes dificultades de compatibilidad, como por ejemplo, el uso de USRP actuales, ya que las versiones cargadas y desarrolladas por OAI están desactualizadas y no permite el correcto funcionamiento. Además, en OAI aún falta la actualización para el paso de mensajes entre eNB y gNB para la conexión de un UE, por lo que actualmente un UE puede conectarse a la red 4G pero no a la 5G en cuanto a la transmisión de datos a través de una portadora radio. OAI ha informado que al finalizar el verano de este 2020 lanzará una actualización que solucione el paso de mensajes entre eNB y gNB para conectar un UE en modo EN-DC.

Las líneas futuras a partir de esta tesina de máster son las siguientes:

- Actualizar el código de OAI y verificar los pasos de mensajes entre eNB, gNB y UE, adicional, establecer la conexión de un EU a nuestra red 5G.
- Validar junto con el estudio de cobertura de red realizado, el comportamiento del *throughput* de la red 5G en el laboratorio.
- Estudiar el comportamiento de las diferentes configuraciones y numerologías en nuestra red.
- Implementar una red 5G con arquitectura SA.
- Generar un espacio para la experimentación de prototipos y soluciones basadas en la red 5G.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quiero agradecer a mi director de tesis el Dr. Jose F. Monserrat, por la oportunidad de poder colaborar dentro de su grupo de investigación, donde he podido aprender y fortalecer mis conocimientos en este tema de gran relevancia e interés para el avance tecnológico en el mundo. A mi director experimental Sergio, por siempre estar dispuesto a solucionar mis dudas y compartir su conocimiento.

A mi esposa por todo su amor, por ser mi compañera de aventuras y por apoyarme en toda decisión, a mi familia, por su apoyo incondicional y motivarme para seguir adelante y a Dios por hacer posible todas las cosas.

REFERENCIAS

- [1] A. Osseiran, J. F. Monserrat, and P. Marsch, *5G mobile and wireless communications technology*. 2016.
- [2] Cisco, “Cisco Annual Internet Report (2018–2023),” *Cisco*, pp. 1–41, 2020, [Online]. Available: http://grs.cisco.com/grsx/cust/grsCustomerSurvey.html?SurveyCode=4153&ad_id=US-BN-SEC-M-CISCOSECURITYRPT-ENT&KeyCode=000112137.
- [3] European 5G Observatory, “MAJOR INTERNATIONAL 5G TRIALS AND PILOTS,” [Online]. Available: <https://5gobservatory.eu/5g-trial/major-international-5g-trials-and-pilots/#1535642860743-279857b2-8e18>.
- [4] E. O. E. y C. de E. en P. Gómez Pérez-Cuadrado, “Plan Made in China 2025,” *ICEX España Export. e Inversiones*, p. 13, 2016.
- [5] 5G PPP, “5G Pan-European Trials Roadmap Version 4.0,” p. 19, 2018, [Online]. Available: https://5g-ppp.eu/wp-content/uploads/2018/11/5GInfraPPP_TrialsWG_Roadmap_Version4.0.pdf.
- [6] Telefonica - ZTE, “First Pre5G Massive MIMO trial in Europe,” 2016, [Online]. Available: <https://www.zte.com.cn/global/about/news/1207>.
- [7] O. . ZTE, “Orange y ZTE realizan la primera llamada de voz y datos con una red móvil 5G en España,” 2019, [Online]. Available: <http://blog.orange.es/innovacion/orange-y-zte-realizan-primera-llamada-voz-y-datos-con-red-5g-en-espana/>.
- [8] “TV 4K en movilidad de España,” p. 2, 2018.
- [9] ITUNews MAGAZINE, “Abrir sendas,” *22 Anual Spectrum Summit*, Ginebra, p. 36, 2017.
- [10] ITU, “Concepción de las IMT – Marco y objetivos generales del futuro desarrollo de las IMT para 2020,” *Recom. UIT-R M.2083-0*, p. 22, 2015, [Online]. Available: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/m/R-REC-M.2083-0-201509-I!!PDF-S.pdf.
- [11] Sassan Ahmadi, “5G NR, Architecture, Technology, Implementation, and Operation of 3GPP New Radio Standards,” in *5G NR*, 2019, p. 960.
- [12] 3rd Generation Partnership Project (3GPP), “NR; User Equipment (UE) radio transmission and reception; Part 3: Range 1 and Range 2 Interworking operation with other radios,” *3GPP TS 38.101-3 version 15.3.0 Release 15*, vol. 0, pp. 0–244, 2018, [Online]. Available: <https://portal.etsi.org/TB/ETSIDeliverableStatus.aspx>.
- [13] Unión Internacional de Telecomunicaciones, *Sentando las bases para la 5G: Oportunidades y desafíos*. 2018.
- [14] W. Diego, “Evolution Toward the Next Generation Radio Access Network,” vol. 21, p. 2019, 2020.
- [15] OpenAirInterface, “Online.” https://www.openairinterface.org/?page_id=864http://www.openairinterface.org/?page_id=864.
- [16] F. Knopp and R. Kaltenberger, “OpenAirInterface 5G: Overview, Installation, Usage - Dec 2019,” p. 75, 2019.
- [17] Ethem Alpaydın, “View on 5G Architecture,” *Version 3.0, June 2019*, no. June, pp. 21–470, 2019, [Online]. Available: https://5g-ppp.eu/wp-content/uploads/2019/07/5G-PPP-5G-Architecture-White-Paper_v3.0_PublicConsultation.pdf.
- [18] GSMA, “Road to 5G : Introduction and Migration,” *Gsma*, no. April, p. 54, 2018, [Online]. Available: https://www.gsma.com/futurenetworks/wp-content/uploads/2018/04/Road-to-5G-Introduction-and-Migration_FINAL.pdf.

- [19] GSMA, “5G Implementation Guidelines,” *Futur. Networks Program.*, vol. 1, no. July, p. 30, 2019, [Online]. Available: <https://www.gsma.com/futurenetworks/wp-content/uploads/2019/03/5G-Implementation-Guideline-v2.0-July-2019.pdf>.
- [20] C. Bouras, A. Kollia, and A. Papazois, “SDN & NFV in 5G: Advancements and challenges,” *Proc. 2017 20th Conf. Innov. Clouds, Internet Networks, ICIN 2017*, pp. 107–111, 2017, doi: 10.1109/ICIN.2017.7899398.
- [21] Open Networking Foundation, “Software-Defined Networking: The New Norm for Networks [white paper],” *ONF White Pap.*, pp. 1–12, 2012.
- [22] GIT LAB EURECOM, “GIT lab.” <https://gitlab.eurecom.fr/oai/openairinterface5g/>.
- [23] 3GPP, “TS 138 215 - V16.2.0 - 5G; NR; Physical layer measurements (3GPP TS 38.215 version 16.2.0 Release 16),” vol. 0, pp. 0–17, 2020, [Online]. Available: <https://portal.etsi.org/TB/ETSIDeliverableStatus.aspx>.