



**UNIVERSIDAD
DE GRANADA**

**TRABAJO FIN DE MÁSTER
INGENIERÍA DE TELECOMUNICACIÓN**

**Configuración y evaluación de
rendimiento de redes 4G/5G**

**Departamento de Teoría de la Señal, Telemática y
Comunicaciones**

Autor

Félix Delgado Ferro

Director

Jorge Navarro Ortiz



**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍAS INFORMÁTICA Y DE
TELECOMUNICACIÓN**

—
Granada, mayo de 2021



**UNIVERSIDAD
DE GRANADA**

Configuración y evaluación de rendimiento de redes 4G/5G

Departamento de Teoría de la Señal, Telemática y
Comunicaciones

Autor

Félix Delgado Ferro

Director

Jorge Navarro Ortiz

Configuración y evaluación de rendimiento de redes 4G/5G

Félix Delgado Ferro

Palabras clave: 4G, 5G, configuración, análisis y rendimiento

Resumen

En este proyecto se tiene como objetivo el despliegue de múltiples redes, en concreto, 4G LTE, 5G NR y LTE-M Cat-M1 y la evaluación en términos de rendimiento de las dos primeras citadas. Durante la elaboración del proyecto, se han estudiado alternativas para el despliegue de las redes, eligiendo y analizando las características que nos proveía nuestra elección, *Amarisoft*. Se han configurado tanto las redes en la estación base como los dispositivos externos (móvil y pycom) para realizar pruebas de conectividad, llamadas y envío de mensajes. Posteriormente, se diseña y realiza una experimentación de forma completa en una cámara anecóica. Finalmente, se analizan los resultados e interpretan empleando una aplicación desarrollada para ello. Esta aplicación gestiona distintos tipos de análisis mediante mecanismos de aprendizaje automático.

4G/5G network configuration and performance evaluation

Félix Delgado Ferro

Keywords: 4G, 5G, setup, analysis and performance

Abstract

The project has solved the problems that have been appearing while 4G LTE, 5G NR and LTE-M, and Cat-M1 networks have been deployed and we have achieved 100 % of the implementation, configuration and performance evaluation objectives for the different networks deployed.

Mainly, a study of the technologies and capabilities that we could use for the full deployment of all these networks was carried out. We have chosen the option that we consider most appropriate for experimentation and research. Although this is the most expensive economically, it is also the simplest to implement. The chosen option has been *Amarisoft*, which offers the necessary capabilities to solve our problem. For each of the networks we have studied the capabilities offered by this solution, how they work and the best way to deploy them successfully. Regarding the implementation of each network, these have been consciously configured. For this, it has been necessary to understand the default configuration files. In addition, it has been necessary to configure and/or program the external devices to be connected such as smartphones or internet of things devices such as Pycom Fipy. Furthermore, the networks have been tested by means of connectivity tests. Voice messages and sending of SMS messages have also been carried out.

In the realization of the experimental tests, a specific setup located inside a semi-anechoic chamber was devised. In this setup there are two variations depending on the area of the chamber where it is transmitted. First, we have the anechoic zone that shows the behavior of the base station when we have direct line of sight. The second case is in the reverberant zone that shows the behavior when there are multiple paths in the transmission. In addition, the possible parameters to be measured have been studied. These parameters are throughput, packet loss, retransmitted packets and minimum latency. These have been measured depending on different configurable characteristics. The characteristics are technology, multiplexing, bandwidth, number of antennas, frequency bands and antenna polarization. Then, the experimentation process has been automated in order to optimize the camera usage time and to be able to work in parallel on another topic.

On the other hand, the results were analyzed according to the objective parameters. For each of them, different analysis methods have been employed using the Perfyzer application. This application has been designed and implemented specifically for this task. The application takes care of everything related to the analysis and consists of functions to generate the dataset. In addition, it manages several automatic learning mechanisms such as Exploratory Data Analysis, Feature Importance, Dimensionality Reduction, *clustering* and even *testing* using ANOVA.

Finally, the results obtained from the different analysis techniques allowed by the Perfyzer application have been interpreted. In these results, some obvious ones have been obtained, such as the fact that the *throughput* shows better performance when using the 5G networks. In addition, peaks of approximately 340 Mbps have been obtained. On the other hand, packet loss and retransmitted packets increase as the cell bandwidth increases. In addition to these, some weird results have also been observed. For example, the minimum latency worsens in the change from 4G to 5G when we employ FDD multiplexing. Although in general terms, the minimum latency is better than when using TDD multiplexing.

Yo, **Félix Delgado Ferro**, alumno de la titulación INGENIERÍA DE TELECOMUNICACIÓN de la **Escuela Técnica Superior de Ingenierías Informática y de Telecomunicación de la Universidad de Granada**, con DNI 53913997L, autorizo la ubicación de la siguiente copia de mi Trabajo Fin de Master en la biblioteca del centro para que pueda ser consultada por las personas que lo deseen.

Fdo: Félix Delgado Ferro

Granada a 07 de 07 de 2022

D. **Jorge Navarro Ortiz**, Profesor del Área de Ingeniería Telemática del Departamento Teoría de la Señal, Telemática y Comunicaciones de la Universidad de Granada.

Informa:

Que el presente trabajo, titulado *Configuración y evaluación de rendimiento de redes 4G/5G*, ha sido realizado bajo su supervisión por **Félix Delgado Ferro**, y autorizo la defensa de dicho trabajo ante el tribunal que corresponda.

Y para que conste, expide y firma el presente informe en Granada a día 08 de 07 de 2022

El director:

Jorge Navarro Ortiz

Agradecimientos

¿Hace cuánto que empezó este camino? No lo recuerdo, pero si todos esos momentos tanto buenos como malos que he vivido desde que salí de la pedanía. Por todo lo que se me ha ofrecido tengo que agradecer a todas esas personas que en todo momentos han creído en mí y me han apoyado. Por esto, quiero agradecer a:

A mis padres, Rafael y Noni, por creer siempre en mis posibilidades y ofrecernos todo lo que se necesitábamos en cada momento, tanto a mi como a mi hermana. Por preocuparos por nosotros, aunque últimamente nos veamos poco tiempo. Y gracias por la educación que nos inculcasteis porque la educación comienza en casa.

A mi hermana, Esther, por estar siempre en los momentos oportunos y ayudarme en los difíciles. Por animarme, aconsejarme y sorprenderse con cada pequeño detalle. Y por todos los momentos buenos que hemos pasado juntos y nos quedan por pasar.

A mi profesor y tutor, Jorge, por todo el tiempo empleado a lo largo de este proyecto y todos los anteriores. Por confiar en mí, incluso cuando yo dudo. Por tener un trato cercano desde que nos conocemos y, sobretodo, por la ayuda prestada y la paciencia que tienes conmigo.

A todos los compañeros del grupo de investigación WIMUNET, porque siempre puedo contar con ellos y por la cálida acogida que recibí desde el instante cero.

Y a todos los amigos y amigas por compartir tantos momentos de risas y alegrías. Por la ayuda en los momentos difíciles y el apoyo incondicional que me habéis otorgado. En especial a "las tortugas", que aún estando lejos siguen contando conmigo y porque juntos llegamos a donde queramos.

Muchas gracias a todos.

Índice general

1. Introducción	23
1.1. Contexto y Motivación	23
1.2. Objetivos	25
1.3. Metodología	26
1.4. Contribución	27
1.5. Estructura de la memoria	28
2. Estado del Arte	31
2.1. Tecnologías de Comunicaciones Inalámbricas	31
2.2. Tecnologías de Implementación 4G/5G	33
2.2.1. srsRAN	33
2.2.2. OpenAirInterface	34
2.2.3. Free5gc	35
2.2.4. Amarisoft	36
2.3. Tecnologías de <i>Internet of Things</i> (IoT)	38
2.4. Avances tecnológicos sobre las redes 5G	41
3. Fundamentos Teóricos	43
3.1. Redes 4G	43
3.1.1. Definición	43
3.1.2. Arquitectura de red	43
3.1.3. Capa Física	46
3.2. Redes 5G	48
3.2.1. Definición	48
3.2.2. Arquitectura de red 5G	49
3.2.3. Capa Física	52
3.3. Redes IoT	56
3.3.1. LTE-M	56
3.3.2. NB-IoT	58
4. Planificación y Coste	61
4.1. Planificación Temporal	61
4.2. Recursos	62

4.2.1. Recursos Software	62
4.2.2. Recursos Hardware	63
4.2.3. Recursos Humanos	67
4.3. Presupuesto Estimado del Proyecto	67
5. Diseño e Implementación	69
5.1. Estructura del Software Amarisoft	69
5.2. Despliegue de la red 4G	71
5.2.1. Instalación de LTE 100	72
5.2.2. Configuración de los módulos	74
5.2.3. Puesta en marcha	77
5.2.4. Configuración de los smartphones	79
5.3. Despliegue de la red LTE-M	82
5.3.1. Configuración de la estación base Amarisoft	82
5.3.2. Configuración del dispositivo IoT	83
5.4. Despliegue de la red 5G NSA	85
5.5. Implementación del analizador Perfyzer	87
5.5.1. Interfaz gráfico de usuario (GUI)	87
5.5.2. Implementación interna de Perfyzer	88
6. Pruebas	99
6.1. Pruebas de concepto sobre las redes	99
6.1.1. Conectividad entre Estación Base y UE	99
6.1.2. Envío de SMS	102
6.1.3. Llamada VoLTE	103
6.2. Metodología de experimentación	105
6.2.1. Diseño de experimentos	105
6.2.2. Automatización de experimentos	109
7. Análisis de Resultados	111
7.1. Construcción del dataset	111
7.2. Análisis de los dataset	113
7.2.1. Exploratory Data Analysis (EDA)	113
7.2.2. Feature Importance (FI)	124
7.2.3. ANalysis Of VAriance (ANOVA)	125
7.2.4. Comparativa de las tecnologías	127
8. Conclusiones y Trabajos Futuros	133
8.1. Conclusiones	133
8.2. Trabajos Futuros	134
Glosario	137
A. Código de Automatización de los Experimentos	155

ÍNDICE GENERAL	15
----------------	----

B. Informe del Análisis	169
--------------------------------	------------

Índice de figuras

1.1. Evolución de las Comunicaciones Móviles [1]	23
1.2. Comparativa capacidades 4G/5G[2]	24
1.3. Previsión del desarrollo de las tecnologías 5G [4]	24
1.4. Release 16 y 17 (5G) [4] [5]	25
2.1. Clasificación de redes por alcance [8]	32
2.2. Software srsRAN [12]	34
2.3. Esquema del CN en OAI [15]	35
2.4. Esquema del RAN en OAI [16]	35
2.5. Esquema de la implementación en <i>free5gc</i> [19]	36
2.6. Esquema de la implementación en <i>Amarisoft</i> [20]	37
2.7. Esquema de las alternativas de implementación a <i>Amarisoft</i> [24]	38
3.1. Arquitectura de red 4G [48]	44
3.2. Servicios y requisitos para 5G [53]	49
3.3. Despliegue de la red 5G NSA(izquierda) / SA(derecha) [52]	50
3.4. Red 4G/5G [55]	50
3.5. Red 4G/5G [52]	51
3.6. Funciones de red elementales en una red 5G [57]	53
3.7. Estructura del frame en 5G NR [60]	55
3.8. Arquitectura LTE-M [62]	57
3.9. Limitación del bandwidth para Cat-M1 [46]	57
3.10. Estructura de la trama NB-IoT [63]	59
4.1. Diagrama de Gantt	62
4.2. SDR50 del <i>Pack Amarisoft</i>	64
4.3. Antena del <i>Pack Amarisoft</i>	65
4.4. Cámara semi-aneecóica	65
5.1. Estructura Software de Amarisoft [6]	71
5.2. Conexión SDR50 en el servidor	72
5.3. Distribución de los nodos de la red y conexiones [21]	72
5.4. Instalación LTE 100 de Amarisoft	73

5.5. Configuración MME	74
5.6. Configuración Base de Datos IMS	75
5.7. Configuración eNB	76
5.8. Gestor de red con Screen	78
5.9. Funcionalidades de los módulos MME y eNB	78
5.10. Parámetros del SDR sobre las celdas (LTE & NB-IoT)	79
5.11. Interfaz de logging de Amarisoft	79
5.12. Software Pysim para la programación de las tarjetas USIM	80
5.13. Configuración del APN en One Plus 7t	81
5.14. Configuración del módulo ENB para LTE y CatM1	82
5.15. Configuración del módulo ENB para CatM1	83
5.16. Configuración respecto a bandas de frecuencia en CatM1	83
5.17. Configuración del módulo eNB para 5G NSA	86
5.18. Modelo de la app Perfyzer	88
5.19. Vista de la app Perfyzer	89
5.20. Vista de la app Perfyzer	90
5.21. UML de la aplicación Perfyzer	91
5.22. Flow chart del Parser	92
5.23. Flow chart del Exploratory Data Analysis (EDA)	92
5.24. Flow chart del Feature Importance (FI)	94
5.25. Flow chart del Clustering	95
5.26. Flow chart del Dimensionality Reduction	96
5.27. Flow chart de ANOVA	97
5.28. Navegación por la interfaz gráfica Perfyzer	98
6.1. Conexión y Autenticación del Smartphone	100
6.2. Diagrama de secuencia de la conectividad entre dispositivo y Estación base	101
6.3. Envío SMS	103
6.4. Mensajes y diagrama de secuencia de un SMS	103
6.5. Mensajes en llamada VoLTE (log MME a la izquierda y log IMS a la derecha)	104
6.6. Diagrama de secuencia de la llamada VoLTE	104
6.7. Setup de experimentación en la cámara semi-anecóica	105
6.8. Setup para zona reverberante	106
6.9. Distribución de las antenas	107
6.10. Polarización de las antenas	108
6.11. Flow chart de la automatización de los experimentos	109
6.12. Configuración de parámetros de la estación base (cada experimento es una columna)	109
6.13. Ficheros en bruto de la experimentación	110
7.1. Datos en bruto de las pruebas Iperf y Ping	111
7.2. Aplicación Perfyzer parseando y archivos csv	112

7.3. Matriz de correlación entre características	114
7.4. Análisis OLS Regression para Transf	115
7.5. Análisis OLS Regression para Throughput	116
7.6. PDFs del Throughput	116
7.7. Análisis OLS Regression para PcktRetr	117
7.8. CDFs de transferencia de datos	118
7.9. CDFs de Throughput	119
7.10. CDFs de paquetes retransmitidos	120
7.11. Análisis OLS Regression para Pl	121
7.12. Análisis OLS Regression para la latencia	121
7.13. CDFs de latencia	123
7.14. Importancia de características para el dataset Iperf (Trnasf, Throughput y PcktRetr) mediante SHAP	124
7.15. Importancia de características para el dataset RTT (Pl, RTT- min) mediante SHAP	125
7.16. Comparación Throughput-Tecnología en función de la multi- plexación	127
7.17. Comparación Throughput-Tecnología en función del ancho de banda	128
7.18. Comparación Throughput-Tecnología en función del número de antenas	128
7.19. Comparación Throughput-Tecnología en función de la zona de la cámara semi-anecóica	129
7.20. Comparación Throughput-Tecnología en función de la orien- tación de la antenas	129
7.21. Comparación RTT-Tecnología en función de la multiplexación	130
7.22. Comparación RTT-Tecnología en función del ancho de banda	131
7.23. Comparación RTT-Tecnología en función del número de antenas	131
7.24. Comparación RTT-Tecnología en función de la zona de la cámara semi-anecóica	132
7.25. Comparación RTT-Tecnología en función de la polarización .	132

Índice de tablas

2.1. Comparación NB-IoT y LTE-M [26]	39
3.1. Bandas LTE en España [51]	46
3.2. NR Channel Bandwidth [52]	53
3.3. Bandas NR FR2 en España [58]	53
3.4. Bandas NR FR1 en España [58]	54
3.5. Frecuencias NB-IoT [63]	58
4.1. Presupuesto de Recursos Software	63
4.2. Características de los Recursos Hardware	66
4.3. Presupuesto de Recursos Hardware	66
4.4. Presupuesto de Recursos Humanos	67
4.5. Presupuesto Estimado del Proyecto	67
5.1. Parámetros de configuración MME	75
5.2. Parámetros de configuración del usuario en IMS	76
5.3. Parámetros de configuración eNB	77
5.4. Variables de configuración eNB	77
5.5. Configuración USIM de smartphones	80
5.6. Configuración USIM de dispositivos IoT	85
5.7. Nuevos parámetros de configuración eNB-gNB	85
5.8. Variables de configuración gNB	86
6.1. Parámetros de entrada	107
6.2. Parámetros de rendimiento	108
7.1. Descripción inicial de los dataset	113

Capítulo 1

Introducción

1.1. Contexto y Motivación

El inicio de la comunicación móvil comenzó con los avances y la primera llamada realizada por Martin Cooper con dispositivo móvil Motorola DynaTAC 8000X en 1973. Pero no surge el concepto de las comunicaciones móviles digitales hasta 1990 cuando surge las tecnologías GSM de la conocida Segunda Generación de las comunicaciones móviles (2G). Durante los años venideros, las comunicaciones móviles han continuado desarrollándose en profundidad y mejorando las prestaciones a los usuarios finales de las operadoras mediante los avances conocidos en las generaciones 3G y 4G.

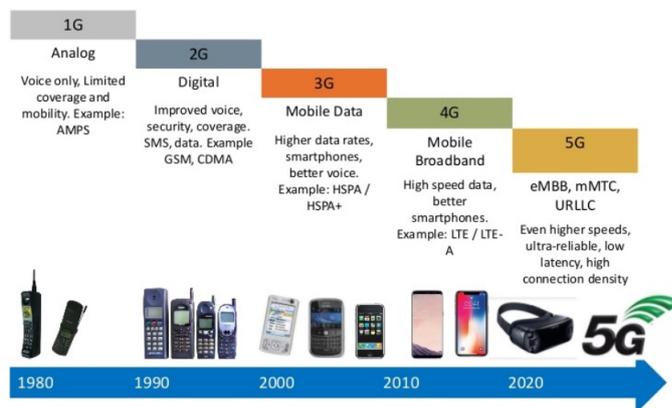


Figura 1.1: Evolución de las Comunicaciones Móviles [1]

En estos momentos, nos encontramos en plena revolución tecnológica. En el ámbito de las telecomunicaciones y, más concretamente en las comunicaciones móviles, nos vemos inmersos en la emergente en la Quinta Generación de las comunicaciones móviles (5G). Esta nueva generación pretende ofrecer nuevas técnicas para mejorar las prestaciones que actualmente tenemos con las redes 4G.

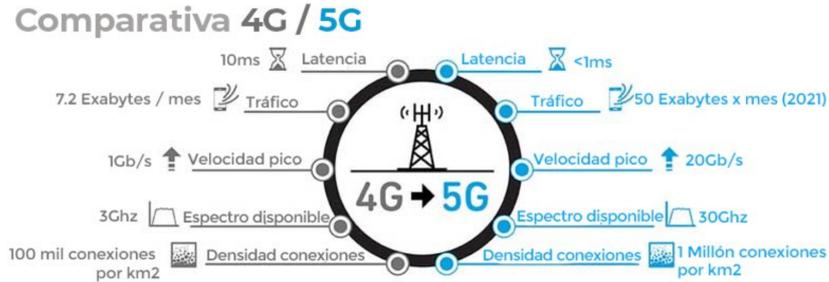


Figura 1.2: Comparativa capacidades 4G/5G[2]

La principal motivación de este trabajo consiste en que las tecnologías 5G están en plena investigación. Además, según la planificación provisional del 3rd Generation Partnership Project (3GPP) [3] estas tecnologías 5G se encontrará en proceso de investigación hasta 2022 como nos muestra la figura 1.3.

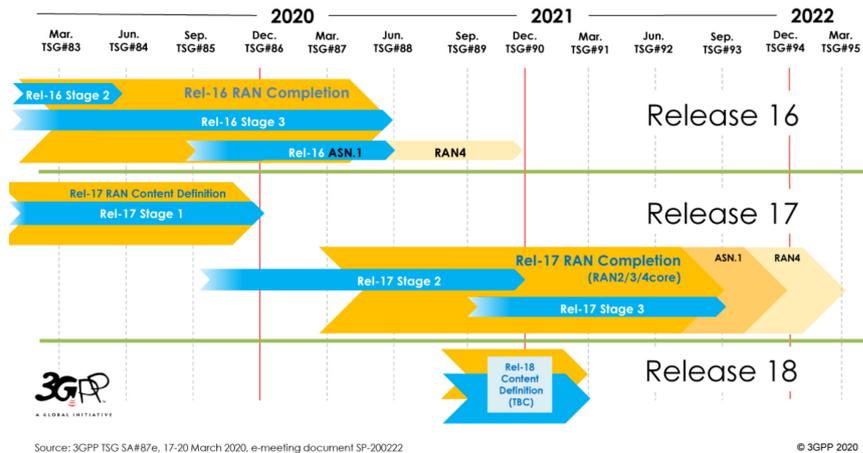


Figura 1.3: Previsión del desarrollo de las tecnologías 5G [4]

El desarrollo de este trabajo se realizará al mismo tiempo que se tiene en previsión del 3GPP para el *Release 16* [4] y *Release 17* [5]. Por este motivo, se presentan en las figuras 1.4 los principales campos y estándares de investigación sobre las tecnologías 5G en este preciso momento. Entre estos, se han destacado los estándares considerados de mayor relevancia para el desarrollo de nuestro proyecto: 5G System, eNB architecture evolution, Industrial IoT, NB-IoT enh. y NR MIMO.

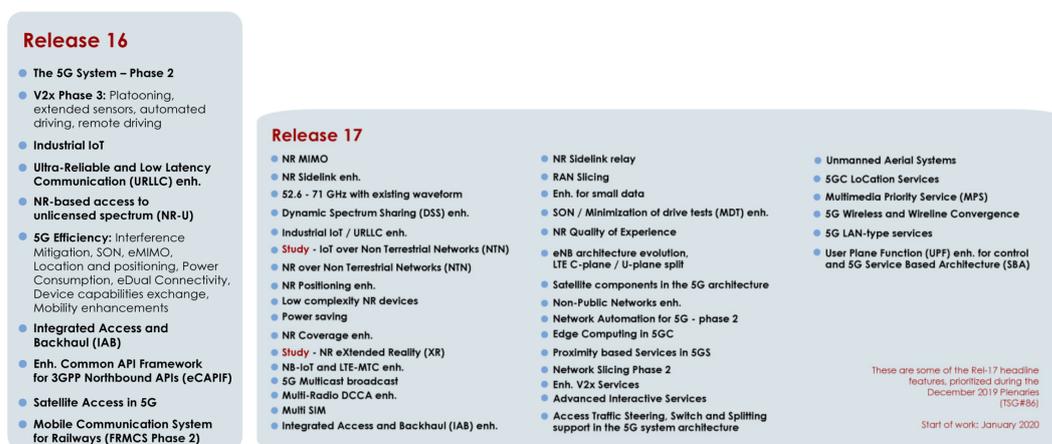


Figura 1.4: Release 16 y 17 (5G) [4] [5]

La motivación personal para el desarrollo de este trabajo viene dada debido a la oportunidad ofrecida por el grupo de investigación Wireless and Multimedia Networking Lab (TIC-235) (WIMUNET) para desarrollar mi ejercicio profesional entorno al ámbito de investigación en comunicaciones inalámbricas 5G. Además, no sería posible sin el aprovisionamiento de el equipamiento y licencias de la estación base ofrecido por WIMUNET. Desde mi punto de vista, este trabajo viene motivado debido a la configuración y evaluación de tecnologías emergentes en un entorno real. De esta forma obtenemos una perspectiva distinta a la habitual que se consigue al realizar simulaciones idílicas en el ámbito de la investigación.

1.2. Objetivos

El trabajo consiste en realizar el estudio de las diferentes alternativas actuales para comunicaciones inalámbricas (4G, 5G, LTE-M y NB-IoT) y realizar un análisis del rendimiento de las comunicaciones móviles 4G/5G. Para ello, se presentan los principales objetivos del trabajo:

1. Integración, configuración, despliegue y evaluación de una red 4G

- 1.1 Analizar y comprender las capacidades de la estación base mediante la documentación que ofrece Amarisoft[6].
- 1.2 Análisis de los principales artículos y contribuciones relacionadas con las redes móviles 4G.
- 1.3 Integración del software LTE 100 y UE 100 de Amarisoft sobre un equipo de propósito general.
- 1.4 Configuración, puesta en marcha y prueba de conectividad de una red 4G.

- 1.5 Obtención de medidas de rendimiento de las redes 4G.
 - 1.6 Análisis de resultados de las redes 4G respecto a latencia y *throughput*.
2. **Configuración, despliegue y prueba de concepto de una red IoT**
 - 2.1 Análisis de los principales artículos y contribuciones relacionadas con las redes IoT como NB-IoT o LTE-M.
 - 2.2 Configuración, puesta en marcha y prueba de conectividad de una red LTE-M.
3. **Configuración, despliegue y evaluación de una red 5G**
 - 3.1 Análisis de los principales artículos y contribuciones relacionadas con las redes móviles 5G.
 - 3.2 Configuración, puesta en marcha y prueba de conectividad de una red 5G.
 - 3.3 Obtención de medidas de rendimiento de las redes 5G.
 - 3.4 Análisis de resultados de las redes 5G respecto a latencia y *throughput*.

1.3. Metodología

En esta sección, se explicarán los procedimientos y tareas que nos permitirán alcanzar nuestro objetivo previamente citados. Se emplea una metodología lineal que nos permite establecer el avance del proyecto de forma clara y concisa, otorgando la capacidad de comprobar si se alcanzan los objetivos propuestos. La metodología se subdivide en bloques de trabajo de forma que sea cómodo de entender cada una de las redes desplegadas.

▪ Bloque de trabajo 1: Red móvil 4G

- Tarea 1.1: Consecución del objetivo 1.1 (2 semanas).
- Tarea 1.2: Consecución del objetivo 1.2 (2 semanas).
- Tarea 1.3: Consecución del objetivo 1.3 (3 semanas).
- Tarea 1.4: Programación de las tarjetas USIM y configuración de los smartphones (1 semana).
- Tarea 1.5: Consecución del objetivo 1.4 (4 semanas).
- Tarea 1.6: Automatización de las pruebas de rendimiento sobre la red 4G (2 semanas).

- Tarea 1.7: Consecución del objetivo 1.5 (4 semanas).
- Tarea 1.8: Programación de una interfaz gráfica para el *parser* de los datos obtenidos en las mediciones sobre la red 4G. (3 semanas).
- Tarea 1.9: Consecución del objetivo 1.6 (3 semanas).
- **Bloque de trabajo 2: Red IoT sobre LTE-M**
 - Tarea 2.1: Consecución del objetivo 2.1 (2 semanas).
 - Tarea 2.2: Consecución del objetivo 2.2 (3 semanas).
- **Bloque de trabajo 3: Red móvil 5G**
 - Tarea 3.1: Consecución del objetivo 3.1 (2 semanas).
 - Tarea 3.2: Consecución del objetivo 3.2 (2 semanas).
 - Tarea 3.3: Automatización de las pruebas de rendimiento sobre la red 5G (2 semanas).
 - Tarea 3.4: Consecución del objetivo 3.3 (3 semanas).
 - Tarea 3.5: Modificación del programa para el *parser* de los datos obtenidos en las mediciones sobre la red 5G. (3 semanas).
 - Tarea 3.6: Consecución del objetivo 3.4 (2 semanas).
- **Bloque de trabajo 4: Redacción y entrega de la memoria**
 - Tarea 4.1: Redacción de la memoria (3 semanas).
 - Tarea 4.1.1: Redacción hasta el apartado de planificación y coste, comprobando las referencias empleadas (1 semana).
 - Tarea 4.1.2: Redacción completa de la memoria y revisión del tutor (2 semanas).
 - Tarea 4.2: Entrega de la memoria (1 semanas).

Nota: Aunque para la revisión del estado del arte se ha establecido un periodo de tiempo inicial, esta será continuada y, por tanto, tendrá la misma duración del proyecto.

1.4. Contribución

Durante el trabajo se ha realizado una contribución que se cita a continuación:

1. 'Rendimiento de Redes 4G/5G usando una estación base real' en JITEL 2021 XV Jornadas de Ingeniería Telemática, Octubre 2021 [7]

1.5. Estructura de la memoria

En esta sección, se exponen las diferentes partes que forman la memoria, explicando brevemente de qué trata cada una:

- **Capítulo 1 - Introducción:** Este primer capítulo trata de dar un enfoque general al trabajo y se compone de las siguientes partes:
 - Contexto y motivación: consiste contextualizar el problema que se pretende resolver en este trabajo, así como destacar las motivaciones personales para el desarrollo del mismo.
 - Objetivos: detalla los objetivos principales que se pretenden resolver a lo largo de dicho proyecto.
 - Metodología: plantea los pasos a seguir mientras se esta desarrollando el trabajo.
 - Contribución: se indica la publicación realizada en congreso relativa al trabajo.
 - Estructura de la memoria: describe el contenido de cada capítulo de la memoria con el fin de ubicar al lector.
- **Capítulo 2 - Estado del Arte:** Este capítulo resume la revisión del estado del arte principal y se subdivide en dos partes:
 - Alternativas de diseño e implementación: expone las alternativas existentes en este momento para el desarrollo del proyecto o, al menos, las metodologías (software/hardware) que se podrían emplear para el despliegue y análisis de cada una de las redes.
 - Revisión bibliográfica: presenta las ideas de trabajos similares recolectadas de la lectura de las contribuciones científicas obtenidas de Scopus, Google scholar y ResearchGate.
- **Capítulo 3 - Fundamentos Teóricos:** Este capítulo contiene los conocimientos teóricos necesarios para la comprensión y realización del proyecto. Se subdivide el capítulo en:
 - Redes 4G: se explican los fundamentos de las redes de la cuarta generación, en especial, su arquitectura y su funcionalidad en la capa física.
 - Redes 5G: se explican los fundamentos de las redes de la quinta generación, en especial, su arquitectura y su funcionalidad en la capa física.
 - Redes IoT: se explican los fundamentos de las redes NarrowBand-Internet of Things (NB-IoT) y LTE Cat-M1, en especial, su arquitectura y su funcionalidad en la capa física.

- **Capítulo 4 - Planificación y Coste Estimado:** Este capítulo contiene una visión detallada de la temporización del proyecto a priori y los costes del mismo. Se subdivide en tres partes:
 - Planificación Temporal: describe las etapas del proyecto a lo largo del tiempo mediante un diagrama de Gantt.
 - Recursos: indica los recursos hardware, software y humanos necesarios y los costes asociados.
 - Presupuesto Estimado del Proyecto: consiste en un presupuesto final del proyecto.

- **Capítulo 5 - Diseño e implementación:** describe los pasos seguidos para el despliegue de cada una de las redes. Considerando los prerequisites, configuración, implementación e integración de cada una de ellas.
 - Estructura del Software Amarisoft: describe los prerequisites y la estructura en módulos del software *Amarisoft*.
 - Despliegue de la red 4G: indica la instalación, configuración y puesta en marcha de la red 4G. Así, como las configuraciones externas sobre los dispositivos móviles.
 - Despliegue de la red LTE-M: explica la configuración específica de la estación base para el despliegue de la red Cat-M1 y la configuración del dispositivo IoT para establecer la conexión entre ambos.
 - Despliegue de la red 5G: explica la configuración específica de la estación base para el despliegue de la red 5G NSA.
 - Implementación del analizador Perfyzer: explica el diseño e implementación de la aplicación de escritorio para el análisis de los datos medidos.

- **Capítulo 6 - Pruebas:** expone la puesta en marcha de las redes y las pruebas de testeo realizadas para comprobar el correcto funcionamiento de cada una de las redes creada.
 - Pruebas de concepto sobre las redes: describe las pruebas de usabilidad de las redes. Estas consisten en conectividad, envío de SMS y llamada VoLTE.
 - Metodología de experimentación: describe el diseño de los experimentos, es decir, *setup* y *dataset* de experimentación. Así como la automatización de la experimentación propiamente dicha.

- **Capítulo 7 - Análisis de Resultados:** registra los datos obtenidos y los resultados de los mismos analizados mediante diferentes mecanismos.
 - Construcción del dataset: se presenta la forma en la que se procesan los datos en bruto para generar el dataset.
 - Análisis del dataset: se describen los procedimientos de análisis realizados sobre los dataset obtenidos en la experimentación.

- **Capítulo 8 - Conclusiones y Trabajos Futuros:** presenta las conclusiones obtenidas tras la elaboración del proyecto y un análisis de las posibles vías de actuación para la futura actualización y mejora de funcionalidades.
 - Conclusiones: se exponen las conclusiones finales del proyecto.
 - Trabajos futuros: se describen las líneas de mejora y los próximos pasos a seguir en relación a este proyecto.

Capítulo 2

Estado del Arte

Este capítulo pondrá en conocimiento los conceptos básicos para la clasificación de las diferentes tecnologías de redes inalámbricas. Posteriormente, se analizarán las posibilidades existentes para el diseño, implementación y análisis de redes 4G/5G, o al menos parte de las funcionalidades de las mismas. A continuación, se investigarán las alternativas actuales para el despliegue de redes para IoT. Por último, se presentará una concisa revisión de las contribuciones científicas que están íntimamente relacionadas con el desarrollo de este proyecto.

2.1. Tecnologías de Comunicaciones Inalámbricas

Antes de comenzar el análisis de alternativas tecnológicas, se pretende dar un contexto viendo como podemos clasificar las tecnologías que nos interesan, es decir, las redes 4G, 5G, LTE-M y NB-IoT. La forma más sencilla para clasificar las tecnologías inalámbricas es dependiendo de su alcance o cobertura.

- **Proximity:** son las tecnologías de onda radio empleadas en logística y gestión de almacenes dado que necesitan un alcance absurdamente pequeño para poder conectarse. Un claro ejemplo es la tecnología es NFC que se emplea comúnmente en los pagos con dispositivos móviles.
- **Wireless Personal Area Network (WPAN):** son las tecnologías que se encuentran bajo la norma IEEE 802.15. Estas redes sirven para interconectar los dispositivos personales cuyo alcance se limita a pocos metros. Algunos ejemplos son: Bluetooth, Z-Wave y ZigBee.
- **Wireless Local Area Network (WLAN):** estas tecnologías quedan bajo la norma IEEE 802.11 y se emplean en redes locales inalámbricas que ofrecen la capacidad de integrar dispositivos en entornos domésticos o empresariales. Los ejemplos más conocidos son: Wi-Fi, Wi-Fi Direct, Wi-Fi HaLow y Li-Fi.

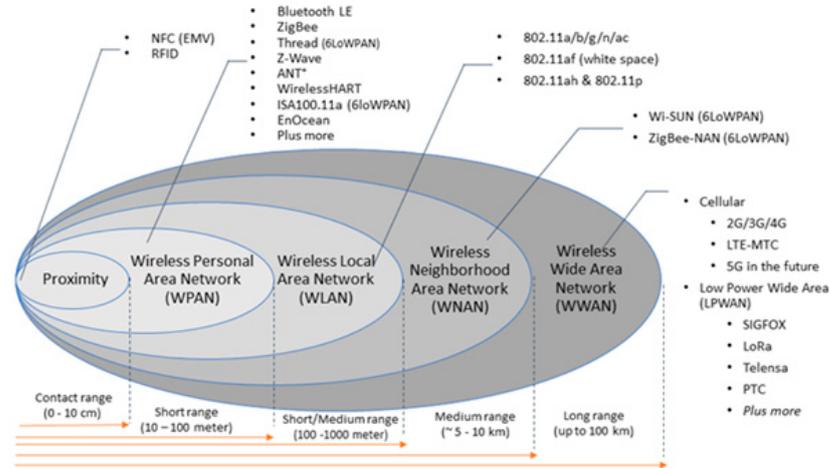


Figura 2.1: Clasificación de redes por alcance [8]

- **Wireless Metropolitan Area Network (WMAN):** son redes inalámbricas de área metropolitana basadas en el estándar IEEE 802.16 (Wi-Max). Normalmente se emplean como comunicaciones punto a multipunto orientada a proporcionar una alta velocidad de transmisión de datos.
- **Wireless Wide Area Network (WWAN):** son las redes inalámbricas de área amplia y se caracterizan por tener un amplio rango de cobertura y, normalmente, emplean frecuencias con licencias. Actualmente, estas tecnologías se subdividen en tres categorías:
 - **Redes de Telefonía Móvil:** son las usadas por nuestros smartphones y por otros muchos dispositivos IoT. Para acceder a ellas, es necesario el uso de una tarjeta USIM en el dispositivo que permite la conexión directa con la red del operador (Mobile Network Operators (MNO)).
 - **Low Power Wide Area Network (LPWAN):** son tecnologías relativamente novedosas. Estas tecnologías tratan de mantener comunicaciones de largo alcance con la premisa de reducir el consumo y el coste de la transmisión. Además, suelen soportar un elevado número elevado de nodos por cada estación.
 - **Redes Satelitales:** son aquellas que emplean ondas electromagnéticas por medio de los satélites artificiales situados en órbita alrededor de la Tierra. Debido a la localización alejada de los satélites, el área de cobertura proporcionada es muy amplia y por eso es muy útil en zonas remotas. Las aplicaciones principales son: realizar *tracking*, telemetría o emitir a zonas sin otro tipo de cobertura.

2.2. Tecnologías de Implementación 4G/5G

En este tipo de proyectos, como se ha comentado previamente, existen diversas tecnologías para solventar el diseño y despliegue de las funcionalidades de las redes 4G/5G para entornos de investigación. A continuación, se expondrán los medios más conocidos y utilizados en el entorno de la investigación para probar las capacidades de estas redes móviles.

2.2.1. srsRAN

El software srsRAN [9] pertenece a Software Radio Systems (SRS) [10] que es una compañía irlandesa especializada en software de alto rendimiento para sistemas inalámbricos. SRS ofrece implementaciones de software modulares y portátiles para las tecnologías inalámbricas. El enfoque objetivo de la empresa es proporcionar productos sencillos e interfaces RF flexibles.

Actualmente, una de las áreas de investigación y desarrollo de la empresa se fundamentan en el software Open-source srsRAN (versión 22.04) para la implementación de las diferentes partes de la comunicación inalámbrica LTE como se muestra en la figura 2.2. A su vez, trabajan en las primeras implementaciones de comunicaciones 5G NR

- **srsUE [11]:** es un software radio para la implementación de UE 4G LTE y 5G NR. Este software funciona como aplicación que se conecta a cualquier red LTE y NR proporcionando una interfaz de red con conectividad móvil de alta velocidad. Entre sus principales características destacan: soporte de las características de la *Release 15* de 3GPP, compatibilidad con 5G NSA y SA y capacidad de hasta 150 Mbps en DL con una configuración Multiple-Input Multiple-Output (MIMO) con ancho de banda de 20 Mhz.
- **srsENB [11]:** es un software radio LTE eNB, es decir, implementa una estación base Evolved Node B (eNB) virtual que consta de módulos y protocolos necesarios para la comunicación entre eNB y el EPC, empleando las tarjetas SDR y los protocolos PHY, MAC, RLC, PDCP, RRC,NAS y S1AP.
- **srsEPC [11]:** es una implementación liviana de una red central LTE completa, también denominada EPC. Esta aplicación se ejecuta como un único archivo binario y proporciona los componentes claves de core de una red 4G como son *Home Subscriber Server (HSS)*, *Mobility Management Entity (MME)*, *Service Gateway (S-GW)* y *Packet Data Network Gateway (P-GW)*. Además, es compatible con las librerías para el eNodeB (eNB) y UE.

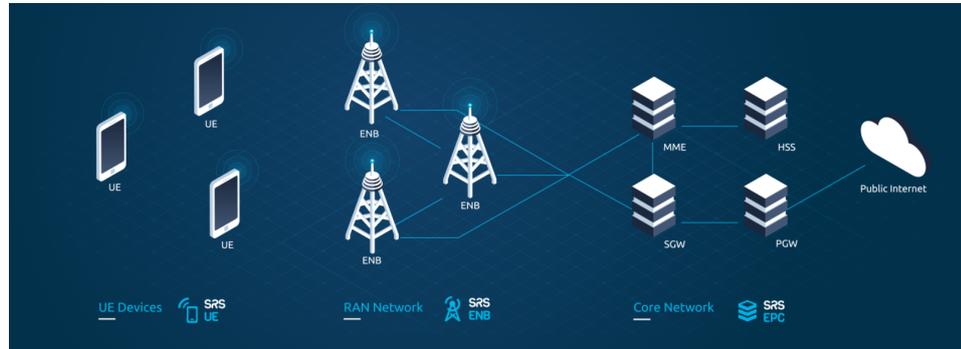


Figura 2.2: Software srsRAN [12]

2.2.2. OpenAirInterface

OpenAirInterface (OAI) [13] es una plataforma de código abierto desarrollada por OpenAirInterface Software Alliance, cuyo objetivo es ofrecer un entorno celular flexible y de bajo coste para experimentación sobre redes 4G y 5G. Esta plataforma está basada en los estándares 3GPP y proporciona software para desplegar la parte troncal (CN) y la parte de Red de Acceso Radio (RAN).

- **CN:** esta parte se implementa sobre *OpenAirCN* [14]. Este software permite implementar los distintos nodos que implementa la red troncal como son en 4G: MME, HSS, S-GW y P-GW.

Comentar que actualmente, trabajan en el desarrollo del core de redes 5G, por tanto, no será obligatorio el uso del nodo EPC para el despliegue de redes 5G próximamente. Aunque, actualmente, solo permite emplear despliegues Non Standalone (NSA) sobre EPC. En la figura 2.3 se muestra la arquitectura del core planteada en el actual proyecto de OAI.

- **RAN:** se implementa sobre el software *Openair5G* que soporta Non Standalone (NSA) gNB, Stand Alone (SA) gNB, 5G NSA/SA UE. Para ello, incorpora los nodos eNB y ofrece la posibilidad de implementar diferentes usuarios (UE). También ofrece soporte a tecnologías MIMO.

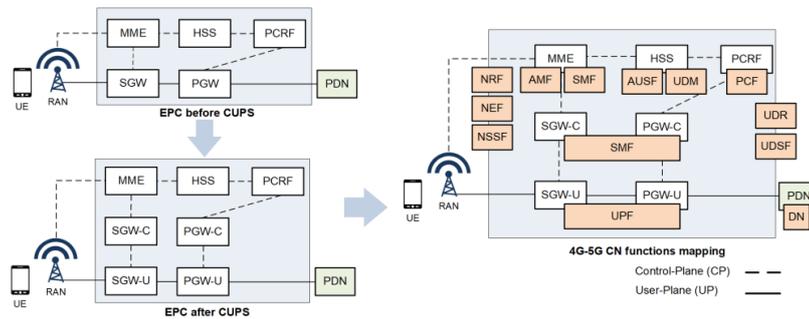


Figura 2.3: Esquema del CN en OAI [15]

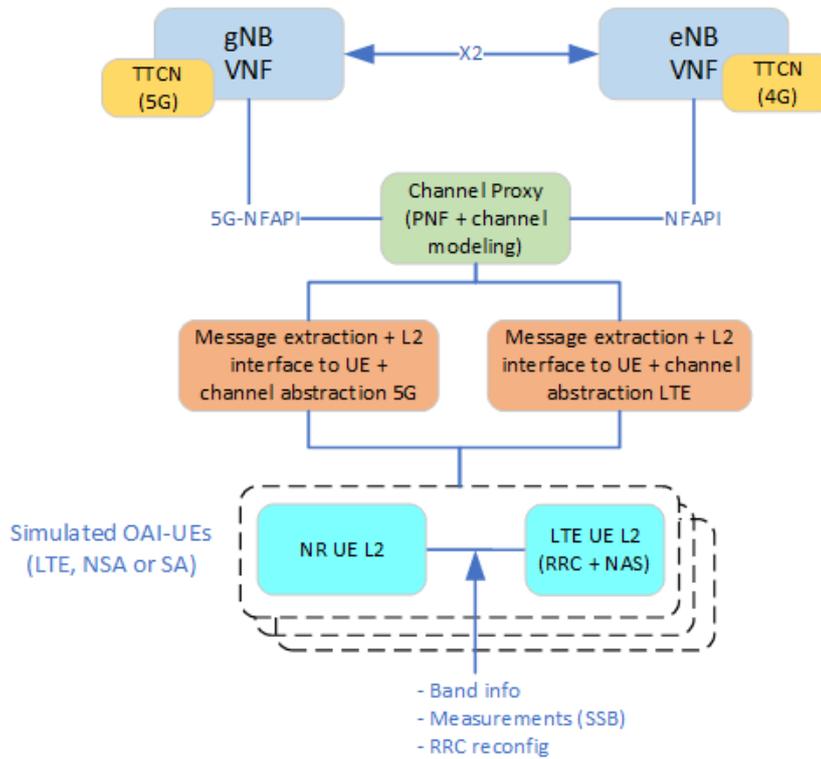


Figura 2.4: Esquema del RAN en OAI [16]

2.2.3. Free5gc

Free5gc [17] es un proyecto de código abierto de redes móviles 5G. El principal objetivo es implementar la red 5G definida en los estándares 3GPP *Release 15* con perspectiva a realizar mejoras sobre eMBB y establecer conec-

xiones de ultra baja latencia confiable (URLLC) e IoT masivo. Actualmente, está siendo desarrollada y empleada principalmente por la Universidad Nacional Chiao Tung (NCTU) [18].

El código fuente *free5gc* se puede descargar libremente desde *github* [19]. Este software implementa la parte del core de la red (CN), con los nodos e interfaces como: AMF, SMF, HSS, PCRF, UPF. En la figura 2.5 se muestra un ejemplo de la configuración básica de *free5gc*.

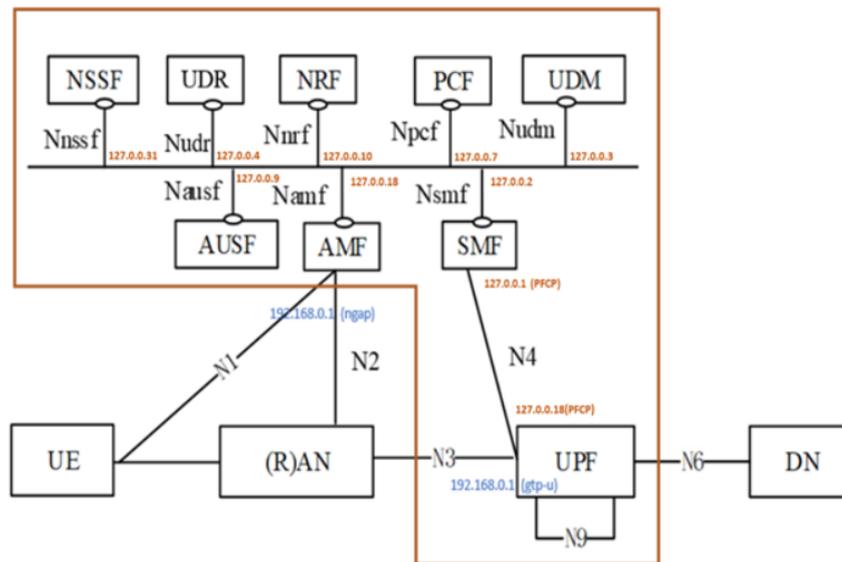


Figura 2.5: Esquema de la implementación en *free5gc* [19]

2.2.4. Amarisoft

Amarisoft [6] es una empresa francesa de software no convencional fundada en 2012 por dos ingenieros (Fabrice Bellard y Frank Spinelli). Esta empresa ha desarrollado una serie de soluciones asequibles y de alta calidad para el desarrollo e investigación en la comunidad 4G/5G. Los desarrollos software que se emplean en múltiples puntos del mundo tratan de reducir el coste de las soluciones LTE, aumentar o trabajar con ganancias reales, además de proporcionar alta flexibilidad, disponibilidad y escalabilidad.

En la figura 2.6, observamos los módulos que implementa la solución propuesta por *Amarisoft*. Los módulos más relevantes son: eNodeB, EPC, gNodeB, 5GC, UE Simulator.

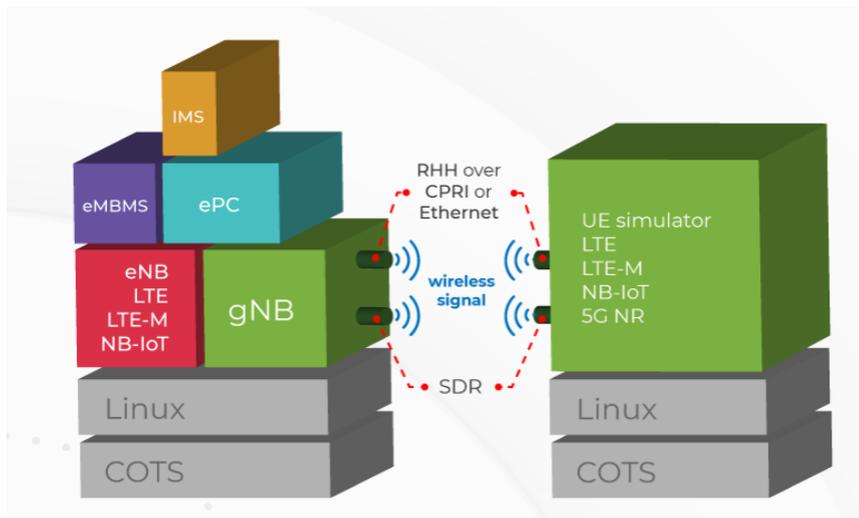


Figura 2.6: Esquema de la implementación en *Amarisoft* [20]

Por otro lado, la compañía ofrece un amplio abanico de posibilidades para el uso de su software. Algunas de estas posibilidades se exponen a continuación:

- **AMARI Callbox Series [21]** son unos equipos hardware especializados para probar dispositivos 5G NSA y SA, LTE, LTE-M y NB-IoT. Estos equipos actúan como un eNB y EPC y son compatibles con los estándares 3GPP, lo que permite realizar pruebas funcionales y de rendimiento. Además, las *Callbox* funcionan con un paquete software de calidad y se ofrecen tres alternativas dependiendo de las necesidades del comprador (Mini, Classic y Ultimate).
- **Serie AMARI NW [22]:** es un software de red *Amarisoft LTE y NR* capaz de ser funcional de forma independiente o como un componente integrado en una implementación personalizada. Este software incluye eNodeB, gNodeB en modo SA o NSA, 5G Core, EPC, puerta de enlace eMBMS y servidor IMS.

Esta alternativa puede complementarse con tarjetas PCIe SDR que admiten todas las bandas LTE FDD y TDD. Normalmente, permiten MIMO 2x2 con un ancho de banda de 56 MHz. Y con múltiples tarjetas puedes lograr MIMO 4x4.

- **AMARI RAN and CORE [23]:** prevee de una infraestructura 5G completa. El software integra los módulos eNodeB, gNodeB en modo SA o NSA, 5G Core, EPC, puerta de enlace eMBMS y servidor IMS que se ejecutan en entornos virtualizados.

Además de estas alternativas, en la figura 2.7 se muestran algunas soluciones extras.

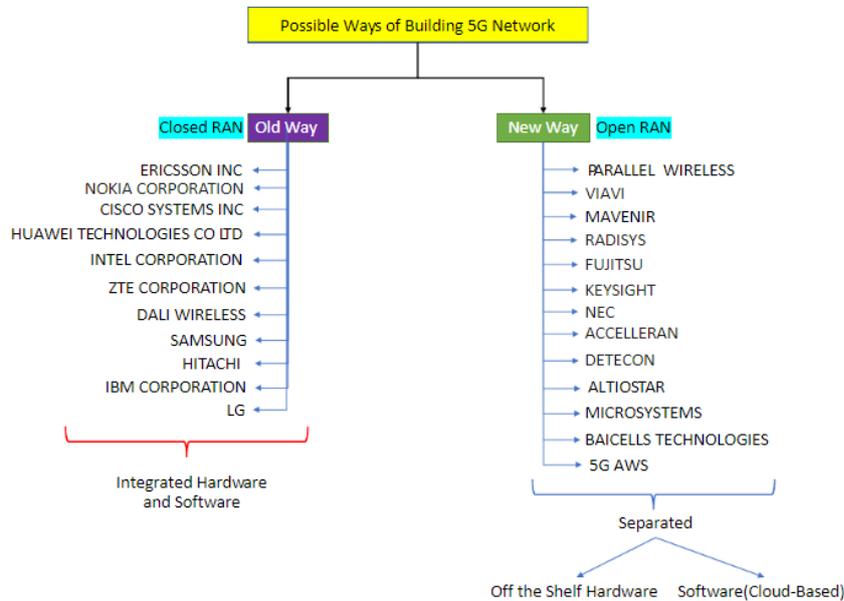


Figura 2.7: Esquema de las alternativas de implementación a *Amarisoft* [24]

Finalmente, al comprender la versatilidad y funcionamiento a *grosso* modo, se ha decidido emplear la alternativa ofrecida por *Amarisoft*. Cabe destacar que no se emplea ninguna de las alternativas propuestas anteriormente. En el desarrollo del proyecto se pretende utilizar las licencias y software de *Amarisoft* sobre un ordenador de propósito general, aunque con capacidades elevadas. Esta solución reducirá el coste y proporciona una solución completa ya que nos ofrece múltiples funcionalidades y configuraciones. De hecho, permite la comunicación de hasta 1000 UE y es compatible con los estándares 3GPP. Aún así, esta solución conlleva un coste económico que el resto, al ser gratuitas de código abierto, no conlleva. Además, es la solución más completa dado que permite el despliegue de múltiples celdas con diferentes tecnologías de comunicación (4G, 5G, LTE-M y NB-IoT).

2.3. Tecnologías de *Internet of Things* (IoT)

En la actualidad las tecnologías IoT esta en plena ebullición y el número de dispositivos se incrementa exponencialmente año a año. Como hemos mencionado previamente, en la clasificación de redes por alcance, existen diversas tecnologías que se pueden emplear, aunque en este apartado nos centramos en NB-IoT y LTE-M que corresponden a las tecnologías WWAN.

Respecto a las redes móviles encontramos que las redes 5G pretenden cambiar la forma de conectividad de las redes IoT tal y como las conocemos hoy en día. Mientras tanto, las redes de los operadores móviles (MNO) ofrecen dos alternativas que se contemplaban en las *release 13 y 14* de 3GPP. Estas tecnologías se diferencian principalmente en la latencia y la velocidad [25]. Para emplear cualquiera de ellas, es necesario el uso de una tarjeta USIM y una suscripción a la MNO. A continuación, se expone una breve descripción de ambas tecnologías y alternativas comerciales disponibles para el despliegue de las mismas.

- **LTE-M:** es conocida también con el nombre Cat-M1. Estas redes emplean las antenas LTE y está optimizado para mejorar el ancho de banda, rango de cobertura, latencia y el número de conexiones móviles. Por este motivo, se suele emplear para aplicaciones en tiempo real y real como redes vehiculares o sistemas de emergencias.
- **NB-IoT:** la cantidad de dispositivos IoT que permite conectarse a una única celda es de 50 mil aproximadamente. Otra peculiaridad de estas redes es que los datos se transmiten de forma agrupada (*batch messaging*) y, por tanto, la latencia aumenta y los dispositivos deben de mantenerse estáticos, es decir, no permite movilidad de los nodos en área.

	NB-IoT	LTE-M
Ancho de Banda	180 KHz 3GPP licensed	1.4 MHz 3GPP licensed
Velocidad Máxima de Datos	100 Kbps	384 Kbps
Velocidad DL/UL	27.2/62.5 Kbps	<1Mbps
Latencia	1.5 - 10 seg.	50 - 100 ms
Frecuencia	Flexible	Banda LTE
Penetración en Interior	Excelente	Buena
Voz	No	Si. VoLTE

Tabla 2.1: Comparación NB-IoT y LTE-M [26]

Algunas alternativas comerciales que podemos encontrar en el ámbito de las tecnologías IoT son:

- **Verizon [27]:** provee de diseños específicos para las tecnologías de Cat-M1 y NB-IoT. Sus soluciones de IoT incluyen bajo rendimiento de datos y alta eficiencia energética. Actualmente, *ThingSpace* [28] ofrece las herramientas para prototipar, testear y gestionar los dispositivos IoT sobre una red segura y fiable.

- **Vodafone [29]:** provee de los servicios propios de redes NB-IoT sobre la infraestructura propia de 4G con bandas licenciadas mediante suscripción NB-IoT a la compañía. La principal diferencia es que utiliza una red de baja potencia que requiere banda estrecha proporcionando mejores niveles de cobertura y mayor duración de batería de los sensores. Sus servicios vienen dados por una plataforma de gestión IoT, una red de servicios de *Packet Data*, soporte y seguridad extremo a extremo.
- **Shiratech [30]:** ofrece una plataforma de desarrollo abierta denominada *iCOMOX*. Esta permite Condition Based Monitoring (CBM) de equipos, activos y estructuras industriales. Esta plataforma se subdivide en el software del monitor y el firmware para los dispositivos, incluyendo el paquete necesario para NB-IoT.
- **FreeRTOS + AWS [31]:** FreeRTOS es un sistema operativo en tiempo real de código abierto con licencia MIT para facilitar la programación, implementación, conexión y administración de los dispositivos IoT. En 2020, se incluyó una biblioteca para el despliegue de celdas LTE-M enlazadas a AWS IoT Core. Esta solución es utilizada con módulos de proveedores como Sierra Wireless [32], u-blox [33] y Quectel [34].
- **PureSoftware [35]:** proporciona una solución completa para redes IoT, en especial, NB-IoT. Esta solución consta de sensores específicos para cumplir con el caso de uso, servidores de gestión de datos sobre el protocolo M2M, GUI, análisis, etcétera. Además, proporciona soporte de integración con la plataforma M2M basada en la nube de un tercero.
- **Verkotan [36]:** permite verificar el rendimiento inalámbrico de su dispositivo IoT en un entorno controlado de cámara anecoica y proporcionan resultados fiables y adaptados de medición de los dispositivos IoT empleados.
- **Rohde & Schwarz [37]:** provee de instrumentación para medir la cobertura de redes NB-IoT y LTE-M, así como realizar pruebas de interacción entre dispositivos y redes. Estas herramientas permiten la medición precisa mediante *drive test* con el software *ROMES* y el analizador de espectro *FHS*.

2.4. Avances tecnológicos sobre las redes 5G

En esta sección se presentan contribuciones científicas en el ámbito del despliegue y evaluación de redes de comunicaciones en el avance hacia 5G.

En primera instancia, se ha decidido centrarse en contribuciones relacionadas con las redes 4G debido a que son redes estables y fiables. Las últimas contribuciones relevantes constan de apenas dos años y en estas se realizan mediciones en entornos reales. Entre los seleccionados, encontramos la caracterización del rendimiento de los dispositivos inalámbricos mediante mediciones realistas *over-the-air* (OTA). En el artículo [38], se muestra el rendimiento inalámbrico para redes 2G y 3G en términos de sensibilidad isotrópica total (TIS). Esta medida depende de la antena y partes del receptor del dispositivo. Además, presentan la posible evolución que conllevaría en redes 4G a largo plazo. Ciertamente, este artículo es anterior al despliegue de las redes 4G, pero ha sido el referente a la hora de plantear nuestras pruebas de rendimiento y análisis de forma similar a la empleada por ellos, es decir, realizar mediciones precisas sobre un entorno controlado como es la cámara anecóica. Posterior a este trabajo, encontramos trabajos relacionados con mediciones sobre redes 4G como se muestra en [39]. En este artículo se presenta el análisis de rendimiento mediante KPI en la banda de 1.8 GHz empleando *drive test* con equipos Huawei.

Respecto a las redes 5G encontramos contribuciones muy recientes y con un rango amplio de temáticas. Por este motivo, se ha decidido centrarse en contribuciones que presenten despliegues o la motivación del mismo. Primero, se muestran la arquitectura de RAN abiertas (O-RAN) que permiten la interoperabilidad y el control basado en datos de la celda [40] y el despliegue y funcionamiento de la O-RAN [41]. Además, en [24], se muestra paso a paso cómo debe construirse e implementarse una red 5G utilizando software de código abierto y hardware comercial de propósito general. Por otro lado, podemos encontrar más contribuciones similares. En concreto, se ha mencionado un artículo relacionado con el proyecto 5G-CLARITY [42] en el que participa el grupo de investigación TIC-235 que muestra la integración de la tecnología 5G con otras del tipo Wi-Fi o Li-Fi y presenta la gestión de las múltiples tecnologías mediante redes privadas denominadas *5G-Advanced*. Y, en [43] se presenta el estudio de mercado-financiación de 5G, así como la evaluación de los nuevos modelos de negocio para los servicios 5G.

Finalmente, para completar, se mencionan varias contribuciones relacionadas con el avance tecnológico en el ámbito de IoT. En [44] se considera la adaptación dinámica de las infraestructuras IoT para ser ejecutadas como *fog-computing* para optimizar los recursos. Mientras, por otro lado, se centran en la evolución de IoT junto a la infraestructura 5G. En [45], se presenta

una arquitectura híbrida 5G-IoT enfocada a Industria 4.0 para proporcionar una cobertura de área amplia más rápida, rentable y fiable para los dispositivos finales, realizando mejoras respecto a latencia y accesibilidad en las conocidas arquitecturas de NB-IoT y Cat-M1. O, también es posible centrándose en los servicios mMTC como se hace en [46] que describe la evolución de LTE-M con respecto a los objetivos de rendimiento de 5G y demostrando que los requisitos de mMTC pueden ser satisfechos.

Capítulo 3

Fundamentos Teóricos

En este capítulo nos centramos en comprender los conceptos teóricos necesarios para fundamentar el trabajo y el despliegue de las redes propuestas para el proyecto. Primero, se hará una breve descripción sobre las redes de telefonía móvil 4G y 5G. A continuación, se tratará de explicar la tecnología LTE-M y sus principales características. Por último, se hará un breve inciso en los beneficios y utilidades de MIMO.

3.1. Redes 4G

3.1.1. Definición

Las redes móviles de cuarta generación (4G) han sido desplegadas empleando el estándar Long Term Evolution (LTE) del 3GPP. LTE es un estándar de comunicaciones móviles desarrollado en el *Release 8* y mejorado en las siguientes revisiones hasta la *release 13*. [47]

LTE supuso una evolución de las tecnologías de comunicaciones móviles disponibles hasta ese momento. La motivación de estas redes era buscar una simplificación de la red móvil actual y diferenciar claramente las partes de la misma. Además, el diseño de la arquitectura LTE pretendía optimizar el control del tráfico de datos y de los usuarios. Para ello, se optó por una arquitectura plana o simplificada para reducir al mínimo el número de nodos implicados en el proceso de conmutación de paquetes. Esta nueva arquitectura permitió despliegues más económicos y escalables.

3.1.2. Arquitectura de red

La arquitectura de red LTE, como apreciamos en la figura 3.1, se basa en tres componentes principalmente:

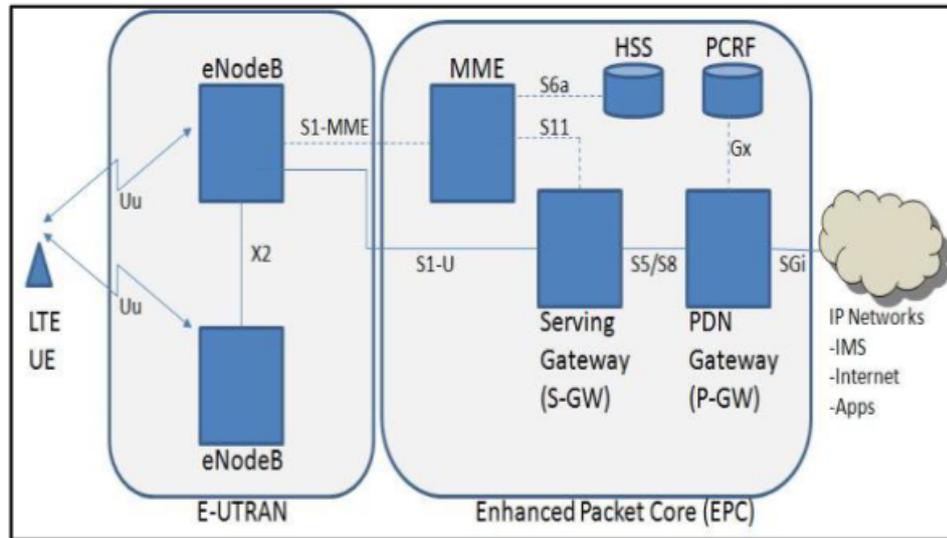


Figura 3.1: Arquitectura de red 4G [48]

- **Evolved Packet Core (EPC) [48][49][50]:** es un elemento fundamental dentro de la red, dado que implementa el core de la misma. La principal innovación respecto al core de las redes 3G es que emplea el protocolo IP para el transporte de todos los servicios, es decir, servicios de datos, voz y mensajería. Otra diferencia muy relevante, frente a las redes 3G, es la separación de los planos de usuario (datos) y control (señalización). Estos planos facilitan el dimensionado de la red de forma más flexible.

El EPC se compone de cinco módulos como vemos en la figura 3.1.

- **Mobility Management Entity (MME):** se encarga de las señales de movilidad y seguridad de la red de acceso. Además, se encarga de el control de ubicación del S-GW y UE, así como la autenticación de los usuarios.
- **Home Subscriber Server (HSS):** es la base de datos de la red y contiene la información relacionada con la suscripción, los servicios para el UE y otros datos de movilidad. Además, almacena la dirección MME del usuario y es responsable de la autenticación.
- **Service Gateway (S-GW):** se encarga de transportar el tráfico de datos IP entre redes. Además, es el encargado de gestionar la movilidad interna como en *handover* y externa de la red.
- **Packet Data Network Gateway (P-GW):** es el nodo de interconexión entre el EPC y las redes IP externas. Se encarga de enrutar los paquetes de datos y se encarga de la información de tarificación.

- **Policy and Charging Rules Function (PCRF):** este nodo gestiona la información relativa a la política de carga de los paquetes de datos y gestiona las sesiones de datos de los equipos. La PCRF también es responsable de la aplicación de la política.
- **Evolved Universal Mobile Telecommunications System Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN):** es la red de acceso radio (RAN) que permite la comunicación entre los UE y la EPC. Esta parte de la red se forma por un conjunto de estaciones base (eNB) que pueden comunicarse directamente entre ellas, es decir, simplifican la parte de señalización y envío de mensajes respecto a las redes previas (3G).

Las principales funcionalidades del E-UTRAN consisten en gestionar los recursos radio, comprimir las cabeceras de los paquetes IP y encriptar la información.

Los **eNB** son las estaciones base e integran todas las funcionalidades necesarias en la RAN. A diferencia de las estaciones base de GSM y UMTS, éstas tienen todas las funcionalidades integradas y no necesitan de la existencia de un nodo de control como BSC o RNC. Las funcionalidades más importantes dentro del eNB son el control de admisión, movilidad e interferencias.

- **User Equipment (UE):** son los equipos de los usuarios y les permiten conectarse a la red. Para ello, el usuario debe tener un contrato previo con la operadora móvil y tener en su poder una USIM.

La **USIM** es una tarjeta programable que contiene cierta información para la autenticación de los usuarios:

- **Integrated Circuit Card ID (ICCID):** es el identificador internacional único con 19 o 20 dígitos.
- **International Mobile Subscriber Identify (IMSI):** es el identificador de las tarjetas móviles sobre la red móvil del operador.
- **Authentication Key (Ki):** es la clave de autenticación única (16 bytes).
- **Location Area Identity (LAI):** es el identificador del área local en la que se sitúa un usuario.

3.1.3. Capa Física

LTE, a diferencia de las redes de telefonía previas, no emplea los canales dedicados a cada usuarios (circuitos de conmutación) sino que comparten el mismo canal físico entre varios usuarios. De esta forma, se proporciona una mayor eficiencia en los recursos y flexibilidad en la asignación del ancho de banda empleado. Además, el estándar permite el duplexado en frecuencia (FDD) y en tiempo (TDD). En LTE se emplean distintas modulaciones dependiendo del enlace, es decir, para los enlaces descendentes se aplica la modulación OFDMA y para los enlaces ascendentes se emplea SC-FDMA.

Espectro y Frecuencias

Las bandas de frecuencias empleadas para las redes 4G que se muestran en la tabla 3.1 representan las principales bandas que se permitirían utilizar en España debido al área geográfica (Global, EMEA o UE) [51].

Bandas LTE	Modo	DL [MHz] (EARFCN)	UL [MHz]	Bandwidth DL/UL	Channel BW [MHz]
1	FDD	2110-2170 (300)	1920-1980	60	5/10/15/20
3	FDD	1805-1880 (1575)	1710-1785	75	1.4/3/5/10/15/20
7	FDD	2620-2690 (3100)	2500-2570	70	5/10/15/20
8	FDD	925-960 (3625)	880-915	35	1.4/3/5/10
20	FDD	791-821 (6300)	832-862	30	5/10/15/20
22	FDD	3510-3590 (7000)	3410-3490	80	5/10/15/20
28	FDD	758-803 (7000)	703-748	45	3/5/10/15/20
31	TDD	462.5-467.5 (9895)	452.5-457.5	5	1.4/3/5
32	TDD	1452-1496 (10140)	-	44	5/10/15/20
38	TDD	2570-2620 (38000)	-	50	5/10/15/20
41	TDD	2496-2690 (40620)	-	194	5/10/15/20

Tabla 3.1: Bandas LTE en España [51]

Canales

En LTE, se distinguen los canales dependiendo del tipo de información que transporten. Existen los siguientes tipos de canales:

- **Canales lógicos:** se encargan de conectar la capa RLC con la capa MAC. En estos canales, se definen los parámetros de codificación, entrelazado, etcétera. Entre estos tipos de canales podemos distinguir:
 - **Canales lógicos de control**
 - *Broadcast Control Channel (BCCH)*: transmite información general de la red y de la celda en el enlace descendente (DL).
 - *Paging Control Channel (PCCH)*: transmite información de advertencia a los UE en DL.
 - *Common Control Channel (CCCH)*: transmite el intercambio de información de control con los UE que acceden por primera vez a la celda.
 - *Multicast Control Channel (MCCH)*
 - **Canales lógicos de tráfico**
 - *Dedicated Traffic Channel (DTCH)*: es un canal dedicado a la transmisión con un único UE.
 - *Multicast Traffic Channel (MTCH)*: transmite la información multicast en el enlace DL.
- **Canales físicos:** son los canales encargados de transmitir las señales de control y datos al UE. Además, se encargan de proporcionar recursos físicos a los canales de transporte que conectan la capa física con la capa MAC.

Las principales funcionalidad de cada uno de los canales físicos se exponen a continuación:

- **Physical Broadcast Channel (PBCH):** transmite información de la red como el canal indicado por cada celda, la estructura del canal PHICH y el identificador de las tramas.
- **Physical Hybrid ARQ Indicator Channel (PHICH):** transmite los mensajes ACK y NACK para implementar el mecanismo HARQ en UL.
- **Physical Downlink Shared Channel (PDSCH):** transmite información de usuario y de aviso. No es un canal dedicado y suele asignarse de forma temporal.
- **Physical Multicast Channel (PMCH):** transmite información de los servicios de difusión y multidifusión MBMS.

- **Physical Control Format Indicator Channel (PCFICH):** transmite información al usuario sobre el número de símbolos empleados en el canal PDCCH.
- **Physical Downlink Control Channel (PDCCH):** transmite información de control en DL como la asignación de recursos en los canales PCH y DL-SCH. Además, transmite los mensajes ACK y NACK para implementar el mecanismo HARQ en DL.
- **Physical Uplink Shared Channel (PUSCH):** transmite información de usuario en el enlace de subida UL.
- **Physical Uplink Control Channel (PUCCH):** transmite información de control en UL como las peticiones de asignación de recursos, mensajes (ACK/NACK), información de calidad del canal, etcétera.
- **Physical Random Access Channel (PRACH):** Transmite información de control en DL para el acceso de los UE al eNB, los *handover*, etcétera.

3.2. Redes 5G

3.2.1. Definición

Las redes 5G se encuentran en pleno despliegue. Las especificaciones del núcleo de estas redes 5G han sido desarrolladas por 3GPP a partir de la *Release 15* [52]. Considerando los requisitos previstos para 5G se han definido una serie de servicios que describen específicamente los requisitos para cada uno de ellos. A continuación se describen los servicios principales[53]:

- **enhanced Mobile Broadband (eMBB):** se considera la evolución de tradicional de conexión a Internet a través del móvil, donde los requisitos de tasa de transferencia han aumentado hasta 20 Gbps con unas latencias reducidas (4 ms). Además, considera a su vez varios escenarios de despliegue y cobertura de servicio (por ejemplo, interior/exterior, zonas urbanas y rurales, oficinas y hogares, conectividad local, etcétera).
- **Ultra Reliable Low Latency Communications (URLLC):** alberga todos aquellos escenarios que requieren de una muy baja latencia y una disponibilidad de servicio muy elevada. Estos normalmente vienen propiciados por servicios dentro de la automatización industrial. A modo de ejemplo, el control remoto para la automatización industrial espera una fiabilidad de 5 nueves, es decir, del 99,999 %, con una velocidad de datos por el usuario de hasta 100 Mbps y una latencia de extremo a extremo de 50 ms. Esto se consigue, en particular, gracias a la capacidades de *Edge Computing* o *Fog Computing*.

- **massive Machine-Type Communications (mMTC):** supone los escenarios que necesiten del soporte para altas densidades de dispositivos interconectados generando tráfico. Normalmente, está íntimamente relacionado con *Internet of Things* masivo dado que incluye una amplia gama de dispositivos y servicios previstos en el marco temporal del 5G, requiriendo una alta escalabilidad (hasta 10^6 dispositivos/Km²).

En la figura 3.2, se muestran los casos de uso para cada uno de estos servicios y los requisitos que se necesitan.

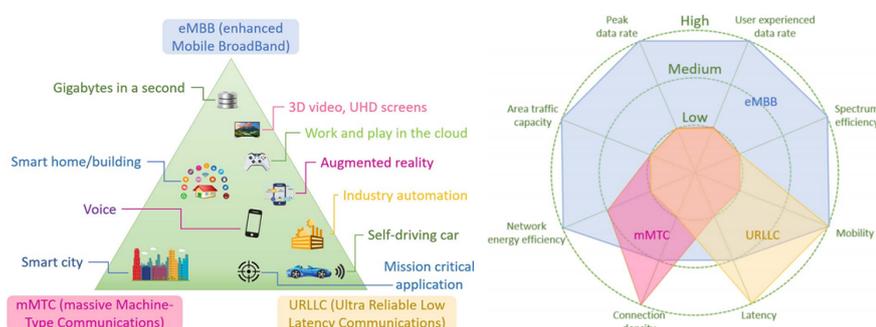


Figura 3.2: Servicios y requisitos para 5G [53]

3.2.2. Arquitectura de red 5G

En esta subsección, se pretende establecer la idea de cómo es posible desplegar una red 5G y comentar las partes de la arquitectura y sus funcionalidades.

Despliegue NSA/SA

El despliegue de la red 5G *Non Standalone (NSA)* es aquella en la cual la red de acceso radio 5G (5G-RAN) y su interfaz New Radio (NR) se utilizan en conjunto a la red central de 4G, es decir, junto al EPC existente. De esta forma, la tecnología NR está disponible sin necesidad de sustituir la red completamente. En este despliegue, ambos nodos comparten la gestión de tráfico de los usuarios, pero la gestión de comunicación interna con el EPC lo realiza únicamente en el nodo eNB o en el nodo gNB. En la figura 3.3, se muestra el despliegue 5G NSA.

Por otro lado, el despliegue de la red 5G *Stand Alone (SA)* se consideran a aquellos donde la NR está conectada con el *core* 5G. Sólo en esta configuración se puede considerar que el conjunto completo dará cabida a todos los servicios mencionados anteriormente. En la figura 3.3, se muestra

el despliegue 5G SA.

Aunque se ha hablado de los despliegues NSA y SA, existen diferentes alternativas de implementación y estas se muestran en [54].

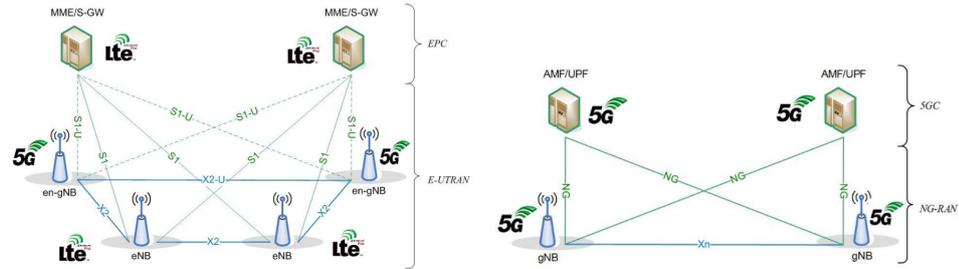


Figura 3.3: Despliegue de la red 5G NSA(izquierda) / SA(derecha) [52]

Arquitectura de red 5G

La arquitectura de la red 5G se subdivide en principalmente en RAN y 5GC. En la figura 3.4 se muestra en detalle la arquitectura compuesta de las redes 4G y 5G.

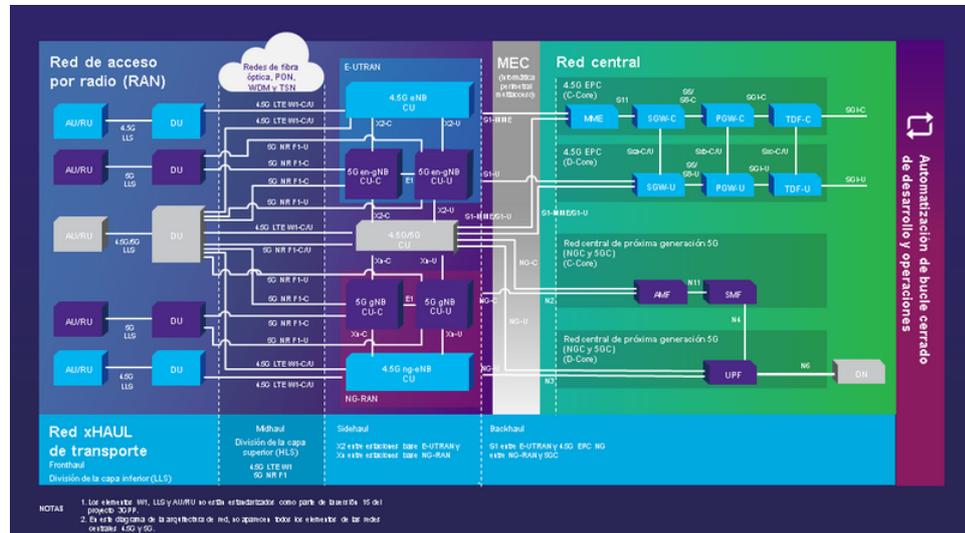


Figura 3.4: Red 4G/5G [55]

- **Red de Acceso Radio (RAN):** la RAN, denominadas redes xHAUL, se ve ampliada con el concepto NFV. Un ejemplo sería la descomposición de la red propuesta por O-RAN [56], lo que ofrece una mayor

flexibilidad para la implementación de nuevas características y tecnologías *a posteriori*.

Viéndolo desde la perspectiva más sencilla, la RAN en 5G consiste en una única entidad (gNB) que se conecta al *core* 5G a través de la interfaz NG, que se conecta al CN 5G a través de la interfaz NG. A su vez, puede conectarse a otro gNB a través de la interfaz Xn y/o al eNB a través de la interfaz X2. Esto se muestra en la figura 3.5.

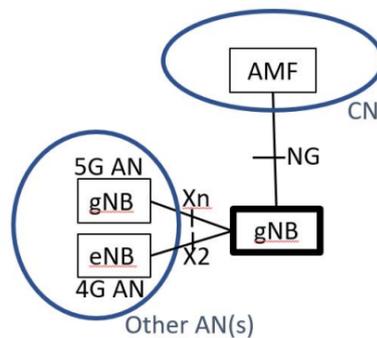


Figura 3.5: Red 4G/5G [52]

- **5G Core Network (5GC):** El núcleo de las redes 5G pretenden ofrecer el procesamiento de datos de usuarios y la integración con la RAN al igual que realizaba el núcleo de de red 4G. Además, se encarga de la señalización en la red que se ha definido de forma completamente distinta a la vista en EPC para redes 4G.

El 5GC es un modelo de red integrada en nodos conectados a través de interfaces punto a punto a una arquitectura Service Based Architecture (SBA). El núcleo de la red pretende establecerse por medio de funciones de red. En la figura 3.6, visualizamos la composición del 5GC, junto a su integración con la RAN y PDN externas.

- **Access and Mobility Management Function (AMF):** se encarga del control general de la red, interactúa con la RAN y con los UEs, es decir, permite el registro, autenticación y movilidad entre las celdas de la red. Aunque algunas de estas tareas las realice con ayuda de otras funciones. Además, se encarga del soporte de *Network Slicing* y la selección del SMF correspondiente.
- **Session Management Function (SMF):** se encarga de la administración de las sesiones de los usuarios, es decir, se encarga

del establecimiento, modificación y liberación de las sesiones, así como la asignación de las IP de los UE. Además, gestiona el tráfico enviado al UPF y controla la aplicación de políticas y QoS.

- **User Plane Function (UPF):** se encarga de procesar y reenviar el tráfico del plano de usuario y se encuentra controlado por la SMF. El UPF es el encargado de la redirección y comunicación con el núcleo de la red y la red de datos. Además, realiza procedimientos de los datos reenviados como generar informes de tráfico, analizar el contenido de los paquetes de datos y ejecutar políticas de red o de usuario.
- **Authentication Server Function (AUSF):** es el proveedor del servicio de autenticación de los dispositivos, solicitando el procesamiento y depósito de las credenciales a la función ARPF.
- **Unified Data Management (UDM):** representa la base de datos de los subscriptores móviles. Es el encargado de generar las credenciales de autenticación empleadas para conectarse a la red y autorizar el acceso a la información disponible en dicha base de datos.
- **NF Repository Function (NRF):** proporciona la gestión de los servicios *Network Functions*, incluyendo el registro, la cancelación del registro, la autorización y el descubrimiento.
- **Network Exposure Function (NEF):** proporciona la capacidad de supervisión, aprovisionamiento de forma externa. Además, tiene cierta relevancia en el enrutamiento y políticas del tráfico.
- **Network Slice Selection Function (NSSF):** permite la selección de las *slices* adecuadas. Así, los UE pueden utilizar varias *Network Slices* simultáneamente, vinculando las políticas de selección a cada segmento de la red.
- **AF:** hace las funciones del servidor de aplicación, es decir, interactuar con los otros NF del plano del control dependiendo de los diferentes servicios y propiedades de la red.

3.2.3. Capa Física

La capa física describe todos los procedimientos y mecanismos de acceso múltiple, canales físicos, modulación, codificación de canal, etcétera. Todos ellos vienen especificados en la norma expuesto en la norma de 3GPP [52].

Actualmente, la capa física es similar a la empleada en LTE, pero se ha obtado por una solución más sofisticada respecto a la modulación. En NR se emplea DFT-S-OFDM que es OFDM con precodificación mediante DFT en el enlace ascendente y OFDMA con prefijo cíclico en el enlace descendente.

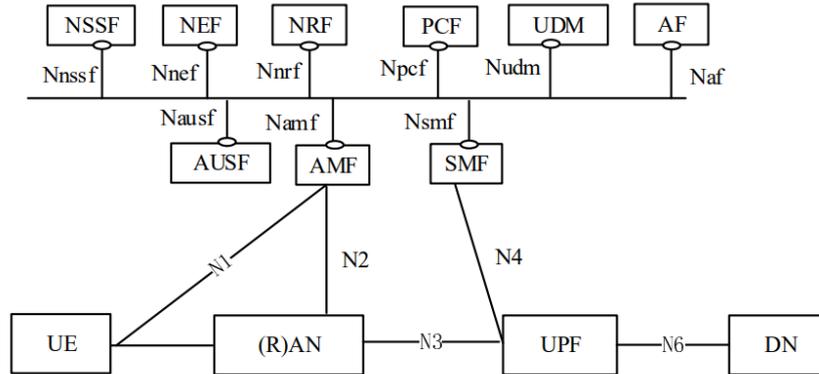


Figura 3.6: Funciones de red elementales en una red 5G [57]

Espectro y Frecuencias

En la capa física de las redes 5G se han especificado dos gamas de frecuencias: *FR1 (sub-6-GHZ)* y *FR2 (bandas milimétricas)*. La anchura de banda de cada banda y la separación entre subportadoras depende de cada rango de frecuencias se muestra en la 3.2.

Nombre	Rango frecuencias [MHz]	Channel BW [MHz]
FR1	410 - 7125	5/10/15/20/25/30/40/50/60/80/90/100
FR2	24250 - 52600	50/100/200/400

Tabla 3.2: NR Channel Bandwidth [52]

En las tablas 3.4 y 3.3, se muestran las principales bandas para el despliegue de redes 5G que se pueden emplear en España, dependiendo del área geográfica.

Bandas NR	Modo	DL [MHz] (NR-ARFCN)	UL [MHz]	Bandwidth DL/UL	SCS [KHz]
n257 (28 GHz)	TDD	26500-29500 (2079166)	-	3000	60/120
n258 (26 GHz)	TDD	24350-27500 (2043750)	-	3250	60/120
n259 (41 GHz)	TDD	39500-43500 (2304166)	-	4000	60/120
n260 (39 GHz)	TDD	37000-40000 (2254166)	-	3000	60/120

Tabla 3.3: Bandas NR FR2 en España [58]

Bandas NR	Modo	DL [MHz] (NR-ARFCN)	UL [MHz]	Bandwidth DL/UL	SCS [KHz]
n1	FDD	2110-2170 (428000)	1920-1980	60	15/30/60
n3	FDD	1805-1880 (368500)	1710-1785	75	15/30/60
n5	FDD	869-894 (176300)	824-849	25	15/30
n7	FDD	2620-2690 (531000)	2500-2570	70	15/30/60
n8	FDD	925-960 (188500)	880-915	35	15/30
n20	FDD	791-821 (161200)	832-862	30	15/30
n34	TDD	2010-2025 (403500)	-	15	15/30/60
n38	TDD	2570-2620 (519000)	-	50	15/30/60
n41	TDD	2496-2690 (518601)	-	194	15/30/60

Tabla 3.4: Bandas NR FR1 en España [58]

Canales y frame

Respecto a los canales, se mantienen los canales físicos descritos previamente para las redes 4G. Por este motivo, se ha decidido realizar una breve explicación de los canales principales y clasificarlos en función del tipo de enlace en el que se emplean [59].

▪ Enlace Descendente

- **Physical Downlink Shared Channel (PDSCH):** se emplea para la transmisión de datos descendentes.
- **Physical Downlink Control Channel (PDCCH):** se emplea para la transmisión de la información de control que incluye las decisiones de *scheduling* entre los datos del PDSCH y del UE a través del PUSCH.
- **Physical Broadcast Channel (PBCH):** se emplea en los sistemas de información *broadcast* requeridos por los UE para acceder a la red.

■ Enlace Ascendente

- **Physical Random Access Channel (PRACH):** se emplea para solicitar la petición de conexión mediante *random access* por parte del UE.
- **Physical Uplink Shared Channel (PUSCH):** se emplea para la transmisión de datos de información por parte del UE.
- **Physical Uplink Control Channel (PUCCH):** se emplea para la información de control ascendente que incluye HARQ, *scheduling request* e información del estado del canal descendente.

Por otro lado, para permitir mayor flexibilidad, NR utiliza una estructura de trama flexible, con diferentes Subcarrier Spacings (SCS). El SCS es la distancia entre los centros de dos subportadoras consecutivas y una serie de 12 subportadoras forma un bloque de recursos (RB). El ancho de banda de un canal NR se compone de varios RB. En cuanto al dominio del tiempo, se divide en tramas de radio de 10 ms, cada una de las cuales consta de 10 subtramas de 1 ms cada una. Este reparto se muestra en la figura 3.7.

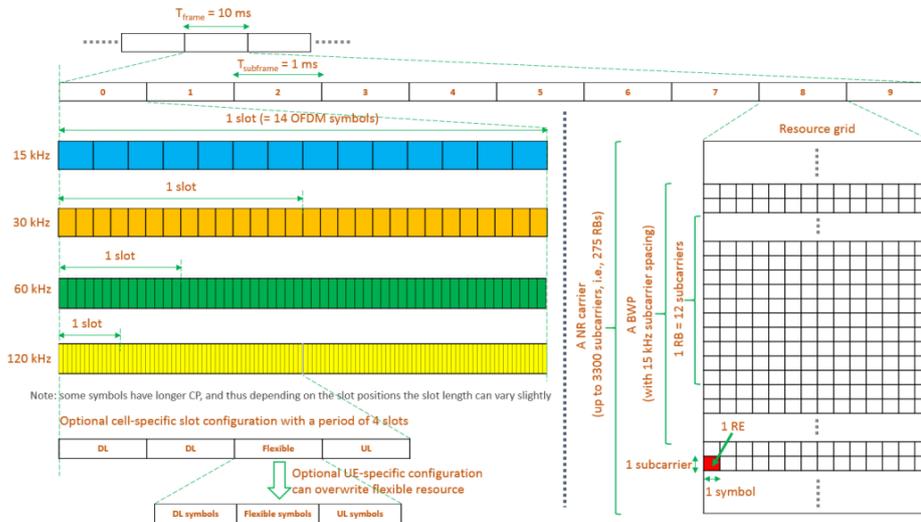


Figura 3.7: Estructura del frame en 5G NR [60]

3.3. Redes IoT

3GPP especificó dos tecnologías LPWAN para IoT alrededor de las comunicaciones 4G: LTE CatM1 (LTE-M) y NarrowBand-Internet of Things (NB-IoT) [46]. LTE-M está pensada para aplicaciones de IoT que puedan admitir servicios de voz y vídeo, mientras que NB-IoT puede proporcionar una amplia cobertura y admitir dispositivos de muy bajo coste. Ambas tecnologías se ven especificadas por 3GPP en las *Release 14* y *Release 15* principalmente. Obviamente, estas tecnologías han seguido evolucionando con las posteriores *releases*.

Respecto a 5G IoT, se identifican los siguientes objetivos de rendimiento de mMTC [46].

- **Cobertura:** el requisito para mMTC es conseguir una ganancia de 21 dB y soportar una velocidad de datos de 160 bps en la capa de aplicación.
- **Densidad de conexión:** el requisito para el mMTC es soportar 1 millón de dispositivos por km^2 en un entorno urbano, empleando una tasa de tráfico aproximado a 200 Bytes en UL y 50 Bytes en DL.
- **Vida de batería:** el requisito para mMTC consiste en una duración de la batería del usuario de al menos 10 años.
- **Latencia:** el requisito de latencia para mMTC es la consideración del tiempo que tarda el UE en pasar de un estado de reposo a la entrega un paquete de capa de aplicación. Este tiempo debe ser menos a 10 segundos.

3.3.1. LTE-M

LTE-M es la versión mejorada de LTE para las comunicaciones mMTC. Por este motivo, la arquitectura (véase la figura 3.8) y la capa física empleada en LTE-M parte de la mencionada en el apartado correspondiente a las redes 4G. Debido a que LTE no es capaz de soportar los requisitos para mMTC, se creó la categoría M1 (Cat-M1) que permite una mayor duración de la batería (más de 10 años) mediante el uso del modo de ahorro de energía (PSM), permite al equipo de usuario establecer el estado de reposo o *stand by* durante horas o incluso días cuando no hay datos que enviar. Por otro lado, permite la Extended Discontinuous Reception (eDRX) que evita que los dispositivos finales monitoricen el canal de control durante mucho tiempo para ahorrar energía [61].

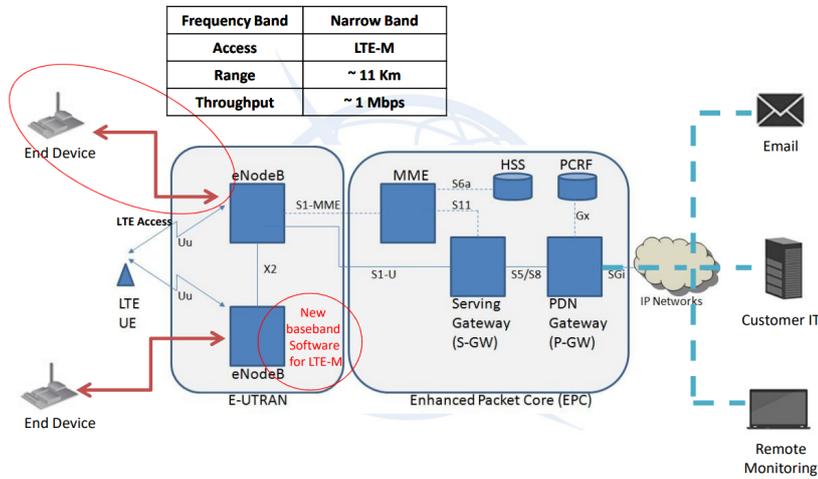


Figura 3.8: Arquitectura LTE-M [62]

Cat-M1 presenta más diferencias respecto a LTE. El UE Cat-M1 emplean un ancho de banda de 1.4 MHz frente a los 20 MHz propuestos en 4G. Además, emplea un máximo de los bloques de transporte de 1000 bits funcionando en modo semidúplex. Aunque está limitado, Cat-M1 opera en las bandas LTE 3.1, y se consigue definiendo procedimientos y canales especiales e las celdas para limitar, como se muestra en la figura 3.9. Aparte, Cat-M1 permite movilidad, control de recursos radio (RRC), establecimiento flexible de la conexión y transmisión de datos en el plano de control.

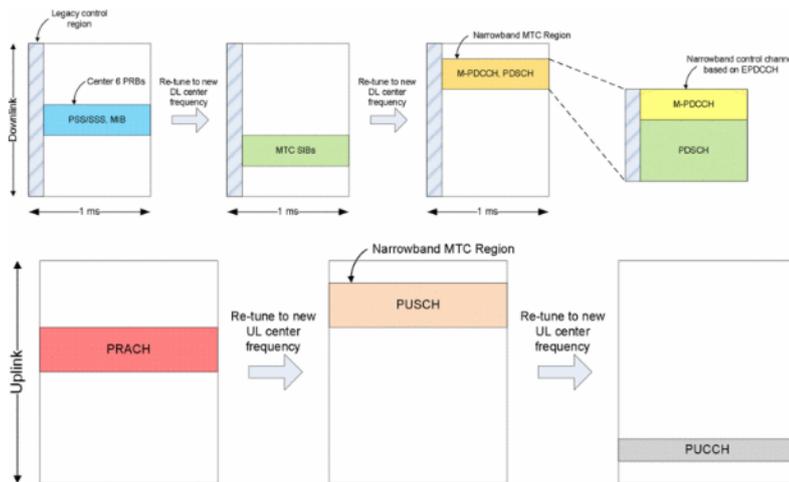


Figura 3.9: Limitación del bandwidth para Cat-M1 [46]

3.3.2. NB-IoT

NB-IoT [61] [63] es otra alternativa empleando bandas licenciadas que emplea PSM y eDRX para mejorar la eficiencia energética. Principalmente, la arquitectura de las redes desplegadas con NB-IoT se basan en las mencionadas para LTE por lo que tiene una estructura similar a la vista en la figura 3.8. Respecto a las características fundamentales de NB-IoT, estas consisten en un elevado rendimiento de bajo consumo con alta durabilidad de la vida de los dispositivos, mejora de la cobertura en exteriores e interiores entorno a 20 dB, etcétera.

La capa física en NB-IoT está optimizada para emplearse con el menor consumo energético posible. En NB-IoT se definen hasta 25 bandas posibles, algunas de ellas se muestran en la tabla 3.5. En todas ellas, se emplea HD-FDD como esquema de duplexión y multiplexación.

NB Band	UL (MHz)	DL (MHz)
B1	1920-1980	2110-2170
B2	1850-1910	1930-1990
B3	1710-1785	1805-1880
B4	1710-1755	2110-2155
B5	824-849	869-894
B8	880-915	925-960
B12	699-716	729-746
B13	777-787	746-756
B14	788-798	758-768
B17	704-716	734-746
B18	815-830	860-875
B19	830-845	875-890
B20	832-862	791-821
B26	814-849	859-894
B28	703-748	758-803
B31	452.5-457.5	462.5-467.5
B70	1695-1710	1995-2020
B71	663-698	617-783
B72	451-456	461-466
B73	450-455	461-465
B85	698-716	728-746

Tabla 3.5: Frecuencias NB-IoT [63]

Al igual que en LTE y Cat-M1, el canal descendente es exactamente igual. El dominio temporal se divide en 1024 tramas RF de 10 ms compuestas de 10 subtramas de 1 ms; y cada subtrama se compone de dos slots de 0.5 ms

que contienen 7 símbolos OFDM. Mientras, en el dominio espectral, cada recurso se compone de 12 subportadoras (*carriers*). En la figura 3.10 se muestra la estructura de las tramas en NB-IoT.

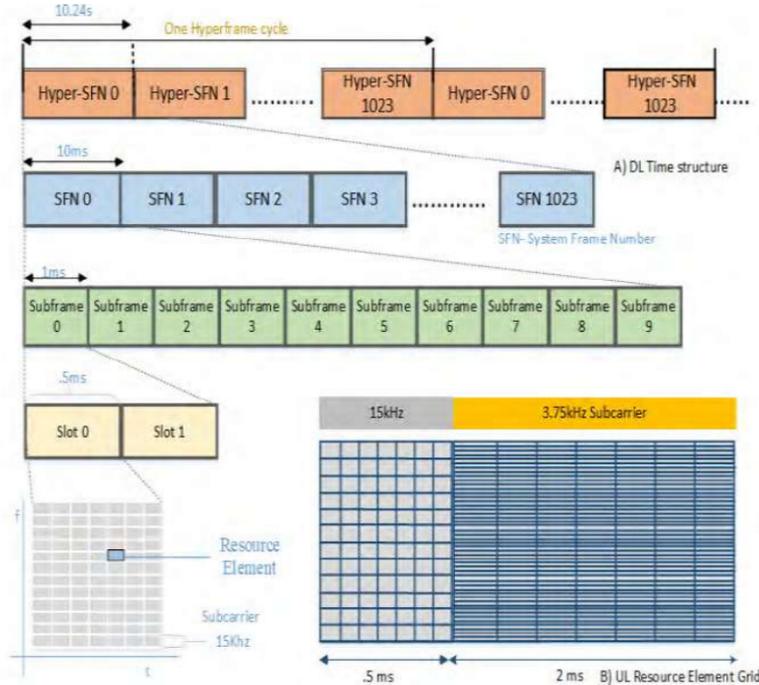


Figura 3.10: Estructura de la trama NB-IoT [63]

La diferencia que podemos encontrar entre los canales descendentes consiste en la adición de tres tipos de canales físicos y de acceso que se ajustan a los 180 KHz y pretenden mejorar la cobertura.

- *Narrow-Band Physical Broadcast Channel (NBPBCH)*: se localiza en la subtrama 0 de cada trama RF y lleva la información maestra (MIB), es decir, información del ancho de banda del sistema, el System Frame Number (SFN), el número de antenas, etcétera.
- *Narrow-Band Physical Downlink Control Channel (NPDCCH)*: se emplea para ofrecer información de control del enlace de bajada (DCI) y ofrecer al UE información relativa al enlace de UL y al canal NPDSCH.
- *Narrow-Band Physical Downlink Shared Channel (NPDSCH)*: es el canal principal de transporte de datos y transmite los datos *unicast* por PCH, la información del sistema (SIB) mediante broadcast o el mensaje Random Access Process (RAP).

Capítulo 4

Planificación y Coste

En este capítulo se expondrá la planificación temporal para la realización del proyecto, los recursos hardware, software y humanos empleados en el desarrollo del mismo. Se concluirá con un presupuesto estimado del proyecto.

4.1. Planificación Temporal

El proyecto total ha tenido una duración de 46 semanas. Esto equivale a 322 días (contando laborables y no laborables). Al comienzo del proyecto se definieron claramente los pasos a seguir a lo largo del mismo y estos se pueden visualizar en la sección 1.3. La planificación temporal se recoge gráficamente en un diagrama de Gantt mostrado en la figura 4.1.

En dicha figura se muestran claramente los bloques de trabajo y las tareas, así como la duración prevista para cada una de ellas. Cabe destacar que la planificación inicial es estricta y se ha planteado a consciencia para que el trabajo conlleve el suficiente tiempo para ser evaluado con la carga académica de 30 créditos.

- **PySIM [64]:** es un programa de software libre de Osmocom [65] que permite la modificación de parámetros internos de las USIM programables por medio de ciertos códigos Python en líneas de comandos.
- **Visual Studio Code [66]:** es un editor de texto de los más conocidos y utilizados por la comunidad. Al ser un editor de texto, nos permite escribir y compilar diversos lenguajes de programación como son Java, Python, etc. En este proyecto se ha empleado la versión 1.46.
- **Librerías *Open Source* de Python:** son librerías empleadas para el desarrollo de la aplicación de análisis denominada "Perfyzer". Algunas de estas librerías son scikit-learn [67], seaborn [68], matplotlib [69], PyQt5 [70], etcétera.
- **Iperf3 [71]:** es el software empleado para la medición del ancho de banda (*Throughput*) entre dos equipos o más. Esta herramienta permite ajustar parámetros como protocolos de transporte y de red.
- **Wireshark [72]:** es el analizador de protocolos de red que permite ver lo que sucede en la red. Esta herramienta contiene un conjunto de características como: inspección de protocolos en tiempo real, captura en vivo y análisis outline. En este proyecto se ha empleado la versión 3.4.5

En la tabla 4.1 se presenta el presupuesto del software empleado en el proyecto.

Software	Coste
Licencia Amari LTE & UE*	20000 €
Licencia PySIM	0 €
Licencia Visual Studio Code	0 €
Librerías Python	0 €
Licencia Iperf3	0 €
Licencia Wireshark	0 €
Total	20.000 €

Tabla 4.1: Presupuesto de Recursos Software

* El coste está asociado a las licencias y software de *Amarisoft*. Pero también incluye las SDR y antenas empleadas.

4.2.2. Recursos Hardware

Los recursos hardware representan los componentes tecnológicos empleados en el proyecto. Estos elementos se definen a continuación:

- **Ordenador Personal [73]:** es la herramienta principal, tanto en el ámbito tecnológico como en el administrativo. En el proyecto se ha utilizado un HUAWEI MateBook X Pro 2020. Se ha empleado para las etapas de investigación, diseño, implementación, pruebas y documentación principalmente.
- **Servidor [74]:** es un ordenador de torre que alberga el servidor LTE de *Amarisoft*. Las capacidades de este ordenador deben superar las capacidades de los equipos convencionales, dado que debe sostener la ejecución de toda la red desplegada. En el proyecto se ha empleado un Supermicro SYS-7049P-TRT con *Ubuntu 18.04 Server*
- **Smartphones:** estos dispositivos se emplea para probar la conexión y las funcionalidades de las redes móviles. Se han empleado diferentes modelos de smartphones que se citan a continuación: One Plus 7t (Personal), Xiaomi Mi A1, Huawei P40 5G.
- **Motas:** son los dispositivos que se encargan de la conexión mediante NB-IoT con la estación base. En el proyecto, se han empleado las motas Pycom Fipy [75].
- **SDR Amarisoft:** son las tarjetas RF obtenidas de la compañía Amarisoft. Con dichas tarjetas, podemos desplegar y utilizar el software *Amari LTE y UE* desde cualquier servidor con una cierta potencia para albergar la red. Esta SDR50 podemos verla en la figura 4.2.
- **Antenas Amarisoft:** son las antenas recomendadas por la compañía *Amarisoft*. Las prestaciones de estas antenas, modelo *5A2-0264-S01SP4-050*, podemos encontrarlas en su *datasheet*. En la figura 4.3 se muestra las prestaciones en términos de frecuencia empleada.



Figura 4.2: SDR50 del *Pack Amarisoft*

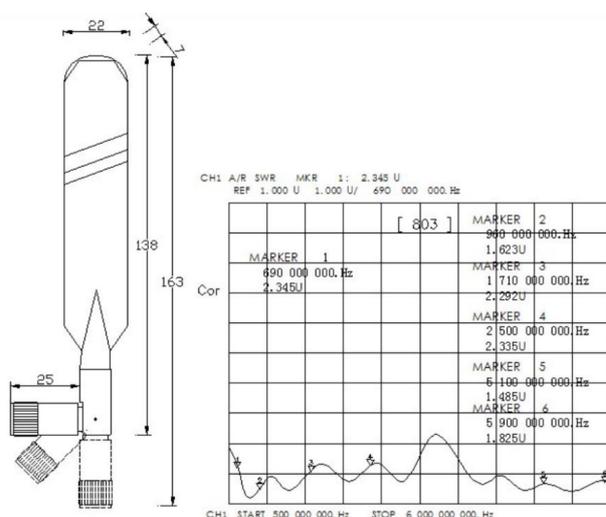


Figura 4.3: Antena del *Pack Amarisoft*

- Cámara semi-aneecóica y equipamiento:** constituye el lugar de medición para tener un entorno controlado y no contaminar el entorno radioeléctrico con nuestra radiación. La cámara se constituye por un sistema plano (ejes X y Z) y una mesa rotatoria que haría de sistema esférico (ejes azimuth y roll), colocada sobre unos raíles con movimiento manual (teniendo así movimiento en el eje Y), lo cual se muestra en la figura 4.4.

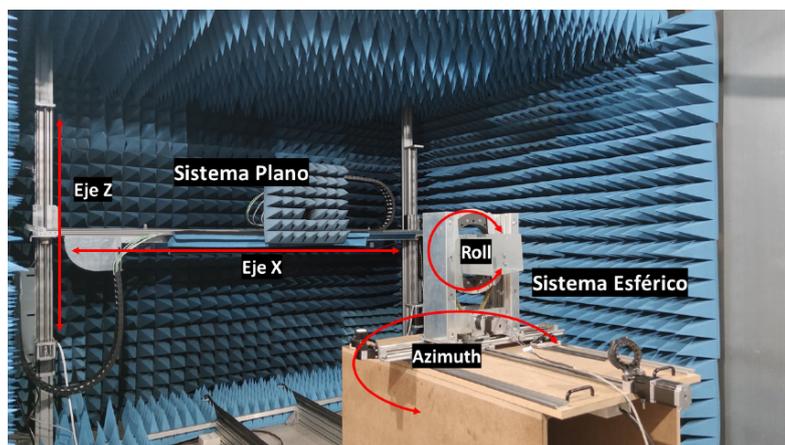


Figura 4.4: Cámara semi-aneecóica

Nota: el coste del alquiler de la cámara semi-aneecóica se mostrará como una estimación del coste real del mismo. En nuestro caso, el permiso de uso de la misma viene dada por una colaboración entre el grupo WiMuNet y SWAT del Dpto. TSTC.

En la tabla 4.2 se representa las características principales de los componentes hardware empleados en el trabajo.

Componente	S.O	Procesador	RAM	Almacenamiento
HUAWEI MateBook X Pro 2020	Windows 10	Intel Core i710510U	16 GB	1 TB
Supermicro SYS-7049P-TRT	Ubuntu 18.04	Intel Xeon 2 ^a GEN	32 GB	4TB
One Plus 7t	Android 10	Qualcomm Snapdragon 855	8 GB	128 GB
Xiaomi Mi A1	Android 9	Qualcomm Snapdragon 625	4 GB	64 GB
Huawei P40 5G	EMUI 10.1 Android 10	Kirin 820	6 GB	128 GB
Pycom Fipy	-	Espressif ESP32 SoC	4 MB	8 MB

Tabla 4.2: Características de los Recursos Hardware

En la tabla 4.3 se muestra el presupuesto de los componentes hardware electrónicos utilizados. Considerando que el coste por unidad de los componentes de larga duración (ordenadores y smartphones) se han calculado considerando una amortización en 3 años y un tiempo de uso de 8 meses. El alquiler de la cámara considera únicamente el tiempo de uso para las mediciones.

Componente	Cantidad	Coste por Unidad	Coste
HUAWEI MateBook X Pro 2020	1	310.89 €	310.89 €
Supermicro SYS-7049P-TRT	1	396.44 €	396.44 €
One Plus 7t	1	88.67 €	88.67 €
Xiaomi Mi A1	1	34.22€	34.22€
Huawei P40 5G	1	66.44 €	66.44€
USIM SYSMOCOM	10	10 €	100 €
Pycom Fipy	1	73.33 €	73.33 €
Pack <i>Amarisoft</i> *	1	0 €	0 €
Cámara semi-anecóica	74 horas	100 €/hora	7400 €
Total			8469.99 €

Tabla 4.3: Presupuesto de Recursos Hardware

* El pack *Amarisoft* incluye SDR50 y antenas. El coste es 0 € dado que el coste ya viene incorporado en el apartado de recursos softwares.

4.2.3. Recursos Humanos

En los recursos humanos se tendrá en cuenta a las personas que trabajaron en el proyecto:

- **Félix Delgado Ferro:** Estudiante del Master en Ingeniería de Telecomunicaciones de la Universidad de Granada.
- **Jorge Navarro Ortiz:** Profesor Titular de Universidad del Departamento de Señal Teoría, Telemática y Comunicaciones de la Universidad de Granada. Tutor del proyecto.

En la tabla 4.4 se muestra el presupuesto referente a los recursos humanos.

Persona	Horas Trabajadas	Precio por Hora	Salario
Félix Delgado Ferro	920	20 €	18400 €
Jorge Navarro Ortiz	40	50 €	2000 €
Total			20200 €

Tabla 4.4: Presupuesto de Recursos Humanos

4.3. Presupuesto Estimado del Proyecto

Por último, se muestra el presupuesto estimado contando todos los costes de los recursos empleados y descritos anteriormente. Estos se recogen en la tabla 4.5.

Concepto	Presupuesto
Recursos Software	20000 €
Recursos Hardware	8469.99 €
Recursos Humanos	20200 €
Total	48669.99 €

Tabla 4.5: Presupuesto Estimado del Proyecto

El presupuesto final del proyecto es de 48669.99 €, CUARENTA Y OCHO MIL SEISCIENTOS SESENTA Y NUEVE EUROS Y NOVENTA Y NUEVE CÉNTIMOS.

Capítulo 5

Diseño e Implementación

En este capítulo se describen los pasos seguidos para la implementación de las tres redes propuestas en el trabajo, es decir, las redes 4G LTE, 4G LTE-M y 5G NR en modo NSA. Por último, se explicará el diseño de una aplicación de escritorio realizada para el análisis de los datos de rendimiento de las redes.

5.1. Estructura del Software Amarisoft

La idea principal del proyecto es analizar el rendimiento de una serie de redes previstas. Por tanto, se ha decidido emplear un software comercial (*Amarisoft*) para conseguir el despliegue previo al análisis del rendimiento.

Entre las opciones vistas en el Estado del Arte (2), se ha optado por la opción de *Amarisoft* por el amplio abanico de posibilidades de despliegue y funcionamientos que ofrece. Por este motivo, vamos a analizar cómo se conforma este software para tener una idea clara a la hora de la implementación.

Amarisoft provee de una estructura totalmente software que permite la comunicación *end-to-end* para diferentes tipos de redes como LTE, NB-IoT y 5G NSA. Este software se subdivide en componentes dependiendo de las características y funcionalidades de los mismos como se muestra en la figura 5.1.

A continuación, se especifican las características de los componentes más relevantes para nuestro despliegue.

- **Evolved Node B (eNB):** este componente hace referencia a la estación base de las redes LTE optimizada hasta las especificaciones del estándar *Release 14*.

- **Capa física:** soporta las configuraciones FDD y TDD, soporta diferentes anchos de banda (1.4, 3, 5, 10, 15 y 20 MHz), soporta configuraciones en los modelos de transmisión como SISO o MIMO 4x4, así como otras configuraciones relevantes [6].
 - **Capa de Protocolo:** implementa diferentes protocolos de capa 2/3 como MAC, RLC, PDCP y RRC. Además, soporta QoS en la cola MAC, DRX y eDRX, etcétera.
 - **LTE-M:** soporta los UE Cat-M1 solo con FDD. Además, soporta mensajes de repetición, localización; pero no soporta *frequency hopping* y el ancho de banda debe ser superior a 5MHz.
 - **NB-IoT:** soporta que se empleen celdas LTE y NB-IoT, soporta UE con categorías NB1 y NB2, además de todos los modos de operación (*in-band*, *guard band* y *standalone*), etcétera.
- **Next Generation NodeB (gNB):** este componente hace referencia a la estación base de las redes NR optimizada hasta las especificaciones del estándar *Release 15*.

Algunas de las características consisten en que soporta FDD y TDD en FR1 y FR2, permite configurar el espaciado entre subportadoras y emplea 256 QAM ancho de banda, soporta la configuración dinámica del DRB, etcétera.

- **EPC:** es el núcleo de la red 4G o 5G NSA. Este componente se subdivide en varios componentes:
 - **MME/S-GW/P-GW/HSS/EIR:** estos nodos son implementados de forma conjunta y tienen características como soportar muchos eNBs con la interfaz S1, soporta conectividad con tarjetas USIM con autenticación XOR y Milenage. Permite procedimientos como conexión, autenticación, configuración de la seguridad, desconexión y *tracking*, etcétera.
 - **IMS Server:** soporta el protocolo SIP, protocolos de autenticación XOR, Milenage y TUAK, soporta IPSEC y llamadas de voz y vídeo, etcétera.
 - **MBMS Gateway:** usa una lista de servicios configurables, soporta el protocolo M2AP, etcétera.
- **5GC:** implementa el núcleo de la red 5G con las funciones AMF, AUSF, SMF y UPF. Soporta múltiples gNBs, tarjetas USIM con algoritmos de autenticación XOR, Milenage o TUAK 5G-AKA. Además, entre otras características, soporta *network slicing*.

- **UE LTE Simulator:** permite simular múltiples UEs compartiendo el mismo espectro, soportando FDD/TDD, MIMO y múltiples configuraciones del ancho de banda.

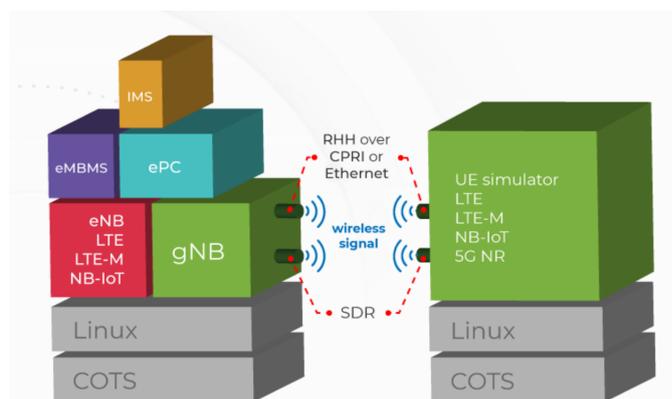


Figura 5.1: Estructura Software de Amarisoft [6]

5.2. Despliegue de la red 4G

En este apartado, vamos a proceder a explicar los pasos seguidos para el despliegue de la red 4G LTE. Considerando que tenemos a disposición en nuestras instalaciones las licencias de *Amarisoft* hasta la versión *17-06-2021*, podemos comenzar la instalación. Para ello, previamente debemos de preparar nuestro servidor *Ubuntu 18.04* tanto en hardware como en software siguiendo los requerimientos expuestos por la compañía. Este sistema operativo que hace de servidor se ha instalado sobre un ordenador de propósito general con amplias características de rendimiento.

- **Hardware:** consiste en realizar la conexión de todas las interfaces radio SDR al PC. Su configuración se forma de varias tarjetas PCIe SDR que deben conectarse también entre ellas para que estén sincronizadas temporalmente y en frecuencia. La conexión se realiza desde el conector *OUT* de SDR#0 (*master*) al conector *IN* del SDR#1 y así las sucesivas conexiones. En nuestro caso, solo tenemos dos SDR50 y se conectarían como se muestra en la figura 5.2.
- **Software:** consiste en instalar los paquetes necesarios para la correcta instalación y funcionamiento posterior del software *LTE 100* de *Amarisoft*.



Figura 5.2: Conexión SDR50 en el servidor

5.2.1. Instalación de LTE 100

La instalación del software es automática siguiendo la guía de instalación de *Amarisoft* y habiendo comprobado que todos los requerimientos previos se cumplan. Posteriormente, se deben instalar los nodos, esto podemos realizarlo de uno en uno de forma manual, para lo que *Amarisoft* nos da una serie de guías de instalaciones por cada uno de los nodos. O, se puede realizar de forma sencilla lanzando el instalador *install.sh* con la opción *default* para forzar que se acepten todas las preguntas incluidas en la instalación. En la figura 5.3 se muestran los diferentes nodos, las conexiones entre ellos y los principales archivos de configuración de la red.

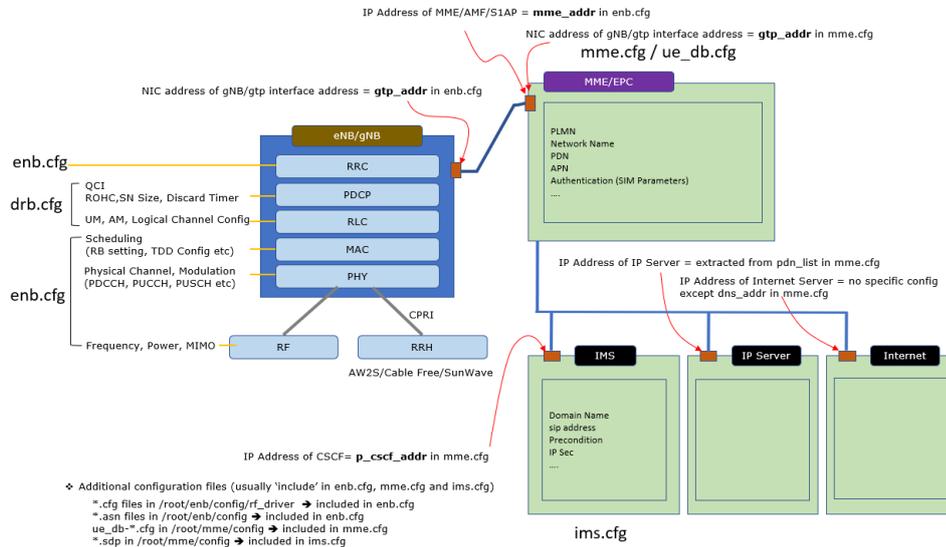


Figura 5.3: Distribución de los nodos de la red y conexiones [21]

Si no ocurre ningún error, se debería ver una salida por terminal similar a la figura 5.4. En nuestro caso, se ha instalado sobre la carpeta *opt*.

```
1) Configuration
You can exit install script during this step, nothing will be changed
until next step
* Do you want to install LTE automatic service ? y
  - Do you want to enable LTE automatic service ? y
* Do you want to install UE simulator ? y
  - Select TRX radio frontend:
    1) sdr (default)
    > sdr
* Do you want to install Web interface ? y
2) Configure Automatic Service
3) Install Web interface
4) Install TRX sdr
5) Install UE simulator
   Use TRX sdr
   [TRX] Fedora 23 found
   [TRX] === Device /dev/sdr0 ===
   [TRX] Hardware ID=0x4b02
   [TRX] FPGA revision=0.9.51
   [TRX] Software version=2017-03-28
   [TRX] === Device /dev/sdr1 ===
   [TRX] Hardware ID=0x4b01
   [TRX] FPGA revision=0.9.51
   [TRX] Software version=2017-03-28
   [TRX] === Device /dev/sdr0 ===
   [TRX] The FPGA firmware is already up to date
   [TRX] === Device /dev/sdr1 ===
   [TRX] The FPGA firmware is already up to date
6) Start service

#####
# Installation successful #
#####
```

Figura 5.4: Instalación LTE 100 de Amarisoft

Obviamente, como se ve en la imagen la instalación se completo exitosamente. En caso de no aparecer este mensaje al final, debemos de realizar los siguiente pasos:

- Comprobar los requerimientos iniciales.
- Actualizar el firmware de las tarjetas SDR. Esto podemos hacerlo ejecutando el script *'sdr_util upgrade'* que se encuentra en la carpeta */opt/trx_sdr*.

Posteriormente, ya teniendo el software instalado, debemos incluirle las claves o licencias para que funcione. Y, además, debemos de configurar los *drivers* para las múltiples tarjetas SDR. Este proceso consiste en comprobar el número único asignado a cada una de las tarjetas SDR y mapear cuál es la tarjeta maestro y cuál la esclavo empleando el comando *sdr mapping*. Una vez tengamos correctamente identificadas nuestras tarjetas maestro-esclavo, debemos de posicionarlas en un orden concreto y cargar los drivers RF.

5.2.2. Configuración de los módulos

Una vez el software *Amarisoft LTE 100* está correctamente instalado en nuestro servidor, debemos de comprobar cada uno de los módulos y las configuraciones que queremos establecer. A continuación, se muestran las tablas con las variables configurables dentro de los módulos de la red 4G.

Configuración EPC

El Evolved Packet Core (EPC) está compuesto principalmente por dos módulos: MME y IMS.

- **Mobility Management Entity (MME):** este módulo alberga las propiedades y funcionalidades de los nodos S-GW, P-GW y HSS. El archivo de configuración dentro del software *Amarisoft* es *mme.cfg* que se encuentra en */opt/mme/config*.

```
/* Enable remote API and Web interface */
com_addr: "0.0.0.0:9000",

/* bind address for GTP-U. Normally = address of the PC, here bound
on local interface to be able to run ltemme on the same PC as
lteenb. By default, the S1AP SCTP connection is bound on the same
address. */
gtp_addr: "127.0.1.100",

// plmn: "00101",
plmn: "29328",
mme_group_id: 32769,
mme_code: 1,

ims_vops: true, /* IMS supported */
//emc_bs: true, /* emergency calls supported */
//emc: 1, /* NR connected to 5GCN emergency calls supported */
emergency_number_list: [
  /* Category bits: (Table 10.5.135d/3GPP TS 24.008)
  Bit 1 Police
  Bit 2 Ambulance
  Bit 3 Fire Brigade
  Bit 4 Marine Guard
  Bit 5 Mountain Rescue
  */
  { category: 0x1f, digits: "911" },
  { category: 0x1f, digits: "112" },
],

rx: {
  qci: {audio: 1, video: 2},
},

/* network name and network short name sent in the EMM information
message to the UE */
network_name: "Amarisoft Network",
network_short_name: "Amarisoft",
```

Figura 5.5: Configuración MME

Los parámetros y las propiedades configurables sobre este módulo se encuentran descritas en la tabla 5.1.

Parámetro	Descripción	Valor
log_filename	Ubicación de los archivos log	/tmp/mme.log
gtp_addr	Dirrección IP para la interfaz GTP-U	127.0.1.100
plmn	Identifica al operador de la red	29328 (ó 00101)
network_name	Identifica la red mediante un nombre	Amarisoft Network
network_short_name	Identifica la red mediante un nombre corto	Amarisoft
pdn_type	Especifica el tipo de protocolo	ipv4 / ipv6
access_point_name	Identifica al AP	default
first_ip_addr	Primera dirección IP	192.168.2.2
last_ip_addr	Última dirección IP	192.168.2.254
dns_addr	Identifica la IP del DNS (Google)	8.8.8.8

Tabla 5.1: Parámetros de configuración MME

- IP Multimedia Subsystem (IMS):** este módulo alberga las propiedades y funcionalidades necesarias para los servicios multimedia sobre IP. Normalmente, se requiere para los parámetros que hacen referencia a los UEs. El archivo de configuración dentro del software *Amarisoft* son *ims.cfg* y *ue-db-ims.cfg* que se encuentran en */opt/mme/config*.

```

sim_algo: "milnagen",
//   imsi: "001010000000001",
   imsi: "293280000000001",
   opc: "000102030405060708090A0B0C0D0E0F",
   amf: 0x9001,
   sqn: "000000000000",
   K: "00112233445566778899AABBCCDDEEFF",
   impi: "293280000000001@ims.mnc028.mcc293.3gppnetwork.org",
   impu: ["293280000000001", "tel:0600000004"],
   domain: "ims.mnc293.mcc028.3gppnetwork.org",

```

Figura 5.6: Configuración Base de Datos IMS

Asímismo, esta configuración deberá imponerse en las tarjetas USIM para que la autenticación-registro sea adecuado. Los parámetros más relevantes en la base de datos se exponen en la tabla 5.2.

Configuración eNB

El módulo eNB corresponde al despliegue de la estación base y se encarga de generar/recibir la señal que se envía a las tarjetas SDR. En la tarjeta se realizará las correspondientes conversiones digital-analógico y analógico-digital.

En la tabla 5.3, se muestran los parámetros generales de configuración del archivo *enb.cfg* que se encuentra en el directorio */opt/enb/config*.

Aparte de estos parámetros, se deben destacar ciertas variables que están predefinidas para la modificación sencilla de la estación base 4G. Estos parámetros se describen en la tabla 5.4.

```

/* Enable remote API and Web interface */
com_addr: "0.0.0.0:9001",

/* RF driver configuration */
include "rf_driver/config.cfg",

#if CHANNEL_SIM == 1
rf_ports: [
{
channel_dl: {
type: "awgn",
noise_level: -30,
},
},
],
#endif

mme_list: [
{
/* address of MME for SIAP connection. Must be modified if the MME
runs on a different host. */
mme_addr: "127.0.1.100",
},
],
/* GTP bind address (=address of the ethernet interface connected to
the MME). Must be modified if the MME runs on a different host. */
gtp_addr: "127.0.1.1",

/* high 20 bits of SIB1.cellIdentifier */
enb_id: 0x1A2D0,

```

Figura 5.7: Configuración eNB

Parámetro	Descripción	Valor
sim_algo	Algoritmo de Autenticación	Milenage
imsi	Código IMSI de la tarjeta USIM	293280000000001
amf	Campo del gestor de autenticación	0x9001
K	Código de acceso de la USIM	0011223344...CCDDFF
sqn	Secuencia de información	000000000000
impi	Identificador del IMSI en la red	[imsi]@[domain]
impu	Identificador entre usuarios de servicio	293280000000001
tel	Número de teléfono	060000001
domain	Dominio de la red	ims.mnc293.mcc028. 3gppnetwork.org
multi_sim	Permitir diferentes UEs en la misma IMSI	True
authent_type	Algoritmo de cifrado para SIP	MD5

Tabla 5.2: Parámetros de configuración del usuario en IMS

Parámetro	Descripción	Valor
mme_addr	Dirección IP de conexión al MME	127.0.1.100
gtp_addr	Dirección IP de conexión GTP-U	127.0.1.1
nb_cell_list	Lista de celdas que se desean crear	-
plmn_list	Lista de PLMN emitidos por eNB	00101 29328
dl_earfcn	Selecciona la frecuencia de portadora central para DL	3350 (2680 MHz - B7)
cell_id	Identificador de celda	0x01
tac	Código de área de celda	0x0001

Tabla 5.3: Parámetros de configuración eNB

Variable	Descripción	Valor
TDD	Modo de División Duplexación	0 (FDD) 1 (TDD)
N_RB_DL	Ancho de Banda de transmisión	6 (1.4 MHz) 50 (10 MHz) 15 (3 MHz) 75 (15 MHz) 25 (5 MHz) 100 (20 MHz)
N_ANTENNA_DL	Número de antenas en Downlink	1 (SISO) 2 (MIMO 2x2)
N_ANTENNA_UL	Número de antenas en Uplink	1 (SISO) 2 (MIMO 2x2)
CHANNEL_SIM	Simulador de canal	0 (Disabled) 1 (Enabled)

Tabla 5.4: Variables de configuración eNB

5.2.3. Puesta en marcha

Un vez se han realizado las configuraciones pertinentes en los respectivos archivos de configuración, podemos proceder a lanzar la red completa empleando el comando *service lte start* y debería iniciarse sin problemas. Podemos comprobar que todo funciona como debería desde el terminal empleando el comando *screen -X lte* que nos muestra pestañas de configuración y log de cada uno de los módulos implementados como se muestra en la figura 5.8.

Además, esta herramienta permite funcionalidades muy interesantes a la hora de gestionar y probar la red, estas funciones podemos encontrarlas haciendo uso del comando *help* que nos muestra el menú y permite la consulta de la configuración. En la figura 5.9 se ven las funcionalidades que permiten los módulos eNB y MME.

```

root@wimUNET:/opt/mme#
root@wimUNET:/opt/mme# cd /opt/mme
root@wimUNET:/opt/mme# ./lteots-linux-2021-03-17/ltelaunch.sh MME
LTE MME version 2021-03-17, Copyright (C) 2012-2021 Amarisoft
This software is licensed to University of Granada .
Support and software update available until 2021-07-29.

(mme)
(mme) log file.rotate=100M,file.path=/var/log/lte/
(mme)
(mme) imconnect
(mme) █

[wimUNET:root ][ [0 MME] 1 ENB 3 IMS 4 MBMSGW ][ 01/06/21 10:12 ]

```

Figura 5.8: Gestor de red con Screen

<pre> (mme) help help show available commands log change the log options enb list connected eNodeBs gnb list connected gNodeBs ue list all MME/AMF UE contexts uectx list active eNB/gNB UE contexts ims list all IMS connections imconnect Force connection to IMS server(s) cx list all MME Cx contexts rx list all MME Rx contexts s6 list all MME S6 contexts s6connect force connection to HSS server s6disconnect disconnect from HSS server s13 list the MME S13 context s13connect force connection to EIR server s13disconnect disconnect from EIR server sgs list the MME Sgs context sgsconnect force connection to HSG/VLR sgsdisconnect disconnect from the HSG/VLR sbc list the CBC Sbc contexts ue_del Remove UE from DR n8 list all AMF N8 contexts n8connect force connection to UDM server n8disconnect disconnect from UDM server n12 list all AMF N12 contexts n12connect force connection to AUSF server n12disconnect disconnect from AUSF server n17 list all AMF N17 contexts n17connect force connection to EIR server n17disconnect disconnect from EIR server pws_write send ETWS/CMAS message to MME/AMF pws_kill kill ETWS/CMAS message event display event counters com Com connection status quit stop the Core Network and exit </pre>	<pre> (enb) help help show available commands t activate status display log change the log options cell list available cells cell_gain set the cell DL gain cell_ul_disable disable uplink for a given cell noise_level Set the noise level snr Set the SNR event display event counters ue show connected UEs handover start a handover pcap start recording pcap data to a file pcap_stop stop recording pcap data rf_info Get RF driver informations tx_gain get/set the analog TX gain rx_gain get/set the analog RX gain s1 show the S1 connection status s1connect (re)connect to the MME s1disconnect disconnect from the MME x2 list X2 connections x2connect start an X2 connection x2disconnect stop an X2 connection m2 show the M2 connection status m2connect start a M2 connection m2disconnect stop a M2 connection hwcaps show host CPU capabilities mme show the MME status erab show the EPS radio bearers rrc_ue_info_req send RRC UE Information Request rrc_cnx_release force RRC connection release rlc_drop_rate define a rate percentage of uplink RLC PDUs dropped ps_flow show the SPS QoS flows erab_cg_change When the UE is able to operate in EN-DC, switch the ERAB between MCG->SCG radio bearer ng show the NG connection status ngconnect (re)connect to the AMF ngdisconnect disconnect from the AMF xn list Xn connections xnconnect start an Xn connection xndisconnect stop an Xn connection time get UTC and eNB/gNB internal time com Com connection status </pre>
--	---

Figura 5.9: Funcionalidades de los módulos MME y eNB

A modo de ejemplo, se han obtenido alguna información desde terminal sobre las celdas, la potencia de transmisión/recepción e información de las tarjetas RF desde el nodo eNB como se muestra en la figura 5.10.

Por otro lado, este software también incluye una interfaz web para la visualización de los logs que se producen en la red. Para acceder desde un navegador, podemos hacerlo empleando `http://[IPserver]/lte` y se mostrará la interfaz similar a la mostrada en la figura 5.11.

```
(enb) cell
(enbla2d1) PLMN=29328 eNB_ID=0x1a2d1
Cell RAT BAND TAC dL_arfcn pci prach_seq dL_gain uL_dis plmn
0x001 LTE 7 0x0001 3350 1 204 0,0 N 29328
0x002 NBIoT 7 0x0002 3350 1 - 0,0 N 29328
(enb) rf_info
(enb) TRX API version 15
Chan Port Gain(dB) Freq(MHz)
TX0 0 90.0 2680.000000
RX0 0 60.0 2560.000000
TX underflows=0 RX overflows=0
TRX SDR driver 2021-03-17, API v15
PCIe RFIC /dev/sdr0:
Hardware ID: 0x4b01
DNA: [0x6849012965099604]
FPGA revision: 2021-01-19
FPGA vccint: 1.00 V
FPGA vccaux: 1.80 V
FPGA vccbram: 1.00 V
FPGA temperature: 48.8 °C
AD9361 temperature: 37 °C
Clock tune: 0.0 ppm

(enb) tx_gain
Chan Port Gain(dB)
TX0 0 89.8
(enb) rx_gain
Chan Port Gain(dB)
RX0 0 60.0
```

Figura 5.10: Parámetros del SDR sobre las celdas (LTE & NB-IoT)

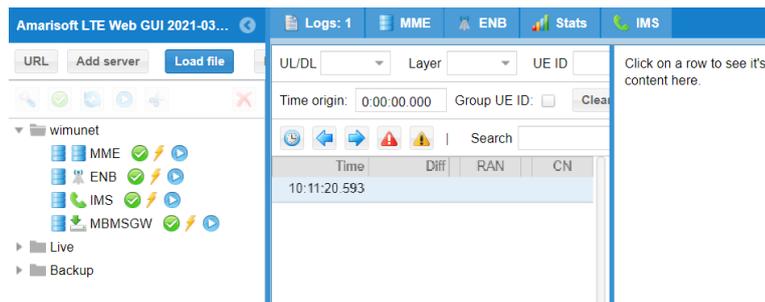


Figura 5.11: Interfaz de logging de Amarisoft

En este punto, podemos comprobar que la red 4G es completamente funcional y tenemos varias alternativas para trabajar con ella.

5.2.4. Configuración de los smartphones

Los *smartphones* deben estar configurados para trabajar con la estación base. La primera parte consiste en la configuración de la tarjeta USIM que incorpora el dispositivo, mientras la segunda parte consiste en la configuración del propio dispositivo para trabajar con los APNs que integra nuestra red.

Tarjetas USIM

Las tarjetas USIM en LTE contienen información relevante para la propia conexión a la red y para los mecanismos de autenticación y seguridad.

Considerando que estamos trabajando con una estación base que no corresponde con ningún operador, debemos de programar nuestras propias tarjetas USIM. Estas tarjetas las podemos programar empleando el software *pysim* y configurándolo para cada usuario. En la figura 5.12, se muestra el código generado para usar las funcionalidades de *pysim*. Esta configuración debe de ser exactamente la misma que tenemos en la base de datos IMS.

```

[[ICCID= ./pysim-read.py -p 0 | grep ICCID | cut -b 8-26"
echo "ICCID: ${ICCID}"
MCC="293"
MNC="28"
OPc="000102030405060708090A0B0C0D0E0F"
key="00112233445566778899AABBCCDDEEFF"
ADM1=""

if [[ "${ICCID}" == "898821100000142102" ]]; then
  ADM1="85601364"
  IMSI="293280000000004"
elif [[ "${ICCID}" == "898821100000142110" ]]; then
  ADM1="10022674"
  IMSI="293280000000005"
elif [[ "${ICCID}" == "898821100000142128" ]]; then
  ADM1="00415661"
  IMSI="293280000000001"
elif [[ "${ICCID}" == "898821100000142136" ]]; then
  ADM1="53650514"
  IMSI="208920000000004"
elif [[ "${ICCID}" == "898821100000142144" ]]; then
  ADM1="04521585"
  IMSI="001010000000002"
else
  echo "ICCID not known!"
fi

if [[ "${ADM1}" != "" ]]; then
# echo "./pysim-prog.py -p 0 -t sysmoUSIM-SJS1 -a ${ADM1} -x ${MCC} -y ${MNC} -i ${IMSI} -s ${ICCID} --op=${OPc} -k ${key}"
./pysim-prog.py -p 0 -t sysmoUSIM-SJS1 -a ${ADM1} -x ${MCC} -y ${MNC} -i ${IMSI} -s ${ICCID} -o ${OPc} -k ${key}
fi

```

Figura 5.12: Software Pysim para la programación de las tarjetas USIM

La configuración de las tarjetas USIM se realiza con un lector especial y el procedimiento consiste en dos pasos:

1. **Localizar el ICCID de la tarjeta:** se necesita conocer el ICCID para la posterior programación de la misma. Este parámetro lo encontramos ejecutando el comando: `./pySim-read.py -p0`
2. **Programar la tarjeta:** es simplemente configurar el fichero de la figura 5.12 sobre el correspondiente ICCID y lanzar el *script*.

En la tabla 5.5 se muestra la configuración de cada uno de los dispositivos móviles empleados para las pruebas posteriormente, tanto de las redes móviles como las IoT.

ICCID	IMSI	Smartphone	Teléfono
~128	293280000000001	One Plus 7t	0600000001
~110	293280000000005	Xiaomi Mi A1	0600000005
~178	293280000000006	Huawei P40 5G	0600000004

Tabla 5.5: Configuración USIM de smartphones

Configuración APNs en Smartphone

Básicamente debemos introducir uno o varios APNs para la tarjeta USIM que acabamos de configurar. Esta configuración se ubica en directorios dependiendo de la marca, modelo y sistema operativo del smartphone, pero normalmente lo podemos encontrar en *Ajustes/Wi-Fi y redes móviles/ SIM y red*. Cuando encontremos la configuración de los APNs debemos de crear una nueva con los siguientes valores:

- **Nombre:** Internet
- **APN:** internet
- **Tipo de APN:** default, internet, ims

El resto de los parámetros se deben configurar automáticamente al conectarse por primera vez a la red u obteniendo información de la tarjeta USIM.

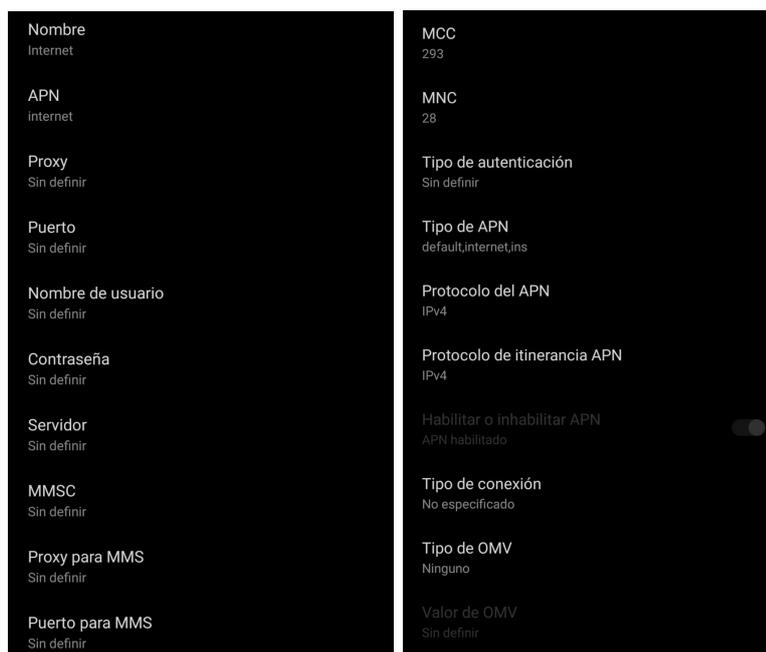


Figura 5.13: Configuración del APN en One Plus 7t

Nota: mencionar que tanto para el despliegue de la red LTE-M como para la red 5G no se dará una descripción tan en profundidad de cada uno de los módulos como en la red 4G. En esos casos, se ofrecerá únicamente la explicación de los cambios realizados sobre la estación base.

5.3. Despliegue de la red LTE-M

En esta sección se explican los procedimientos para la configuración de la estación base y los dispositivos de IoT de forma que estos puedan conectarse mediante la red LTE-M.

5.3.1. Configuración de la estación base Amarisoft

En este punto no es necesario la instalación del software de *Amarisoft* ni la configuración de cada uno de los módulos que conforman la estación base.

El primer paso a la hora de configuración, y el más importante, es la modificación del fichero *enb.cfg*. En la configuración se ha empleado el fichero *enb-catm1.cfg* modificando algunos parámetros como el PLMN para que coincida con la red establecida con 4G dado que LTE-M trabaja sobre esta red. En este fichero se configuran tanto una red LTE como una Cat-M1. Para el correcto funcionamiento de ambas, debemos indicar la misma banda de frecuencias, pero separando ambas celdas en cuanto a frecuencia central se trata. En la figura 5.14 se muestra la configuración de la celda LTE.

```

/* list of cells */
cell_list: [
{
  /* Broadcasted PLMN identities */
  plmn_list: [
    //"00101",
    "29328",
  ],
  #if TDD == 1
  //dl_earfcn: 38050, /* 2600 MHz (band 38) */
  dl_earfcn: 40620, /* 2593 MHz (band 41) */
  //dl_earfcn: 42590, /* 3500 MHz (band 42) */
  #else
  //dl_earfcn: 300, /* DL center frequency: 2132 MHz (Band 1) */
  //dl_earfcn: 900, /* DL center frequency: 1960 MHz (Band 2) */
  //dl_earfcn: 1575, /* DL center frequency: 1842.5 MHz (Band 3) */
  //dl_earfcn: 2150, /* DL center frequency: 2130 MHz (Band 4) */
  //dl_earfcn: 2525, /* DL center frequency: 881.5 MHz (Band 5) */
  dl_earfcn: 3350, /* DL center frequency: 2680 MHz (Band 7) */
  //dl_earfcn: 6300, /* 806 MHz (Band 20) */
  //dl_earfcn: 38050, /* 2600 MHz (band 38) */
  //dl_earfcn: 40620, /* 2593 MHz (band 41) */
  //dl_earfcn: 42590, /* 3500 MHz (band 42) */
  #endif
}

```

Figura 5.14: Configuración del módulo ENB para LTE y CatM1

Para especificar que se trata de un dispositivo conectado con Cat-M1 y no con LTE, debemos de crear un grupo e indicarle la banda que emplea como se muestra en la figura 5.15

```

cell_groups:[
  {
    multi_ue: true,
    group_type: "cat_m1",
    cell: [{
      bandwidth: CELL_BANDWIDTH,
    #if TDD == 1
      dl_earfcn: 40620, /* 2593 MHz (band 41) */
    #else
      dl_earfcn: 3290, /* 2674 MHz (band 7) */
    #endif
  }
]

```

Figura 5.15: Configuración del módulo ENB para CatM1

De esta forma, como pretendemos y se muestra en la figura 5.16, ambas celdas se localizan dentro de la banda 7, pero separadas correctamente en frecuencia.

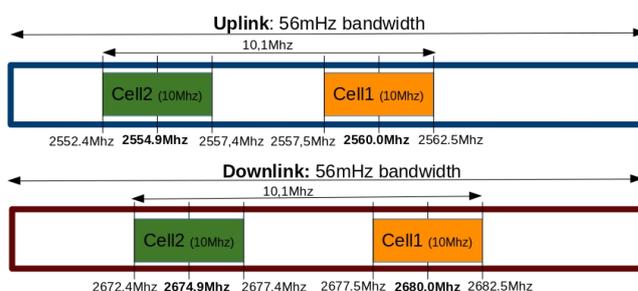


Figura 5.16: Configuración respecto a bandas de frecuencia en CatM1

Por otro lado, la última configuración de la estación base se debe a la importancia de la correspondencia entre el UE USIM con la configuración preestablecida en la base de datos de los usuarios en el fichero *ue_db-ims.cfg* del módulo IMS (véase la figura 5.6).

5.3.2. Configuración del dispositivo IoT

Obviamente, al igual que hicimos con los dispositivos móviles en la red 4G, debemos de configurar adecuadamente nuestro dispositivo IoT para que sea capaz de establecer la conexión con la estación base a través de Cat-M1.

Actualización del firmware

A priori, no sabemos que firmware puede tener instalada la pycom, para curarnos en salud se ha decidido actualizar el firmware tanto del dispositivo como para el modem a uno específico que soporte Cat-M1. Para ello, podemos seguir los pasos indicados en [76].

1. Comprobamos la versión actual del firmware del modem LTE, usando:

```
>>> import sqnsupgrade
>>> sqnsupgrade.info()
```

Los firmware pueden ser LR5.xx (Cat-M1) o LR6.xx (NB-IoT) y no son intercambiables.

2. Si no es el firmware adecuado, debemos de actualizarlo. Para ello, en nuestro caso, se emplea la actualización mediante USB. Esta consiste en descargar el fichero *CATM1-5.2-48829-1.dup* y lanzando el comando:

```
>>> sqnsupgrade.run('/sd/CATM1-5.2-48829-1.dup', load_fff=False)
ò
>>> sqnsupgrade.run('/sd/CATM1-5.2-48829-1.dup')
```

3. Resetea la placa y ya estará listo.

Programación de la Pycom Fipy

Para que este tipo de dispositivos puedan conectarse a la red Cat-M1, es necesario programarlo. Para ello, podemos emplear las siguientes líneas de código:

Listing 5.1: main.py

```
1 from network import LTE
2 import time
3 import socket
4
5 lte = LTE()
6 print(lte.send_at_cmd("AT+SQNCTM=?"))
7
8 lte.attach(band=20, apn="default")
9 print("attaching..",end='')
10 while not lte.isattached():
11     time.sleep(0.25)
12
13     print('.',end='')
14     print(lte.send_at_cmd('AT!="fsm"'))           # get the System FSM
15 print("attached!")
16
17 lte.connect()
18 print("connecting [##",end='')
19 while not lte.isconnected():
20     time.sleep(0.25)
21     print('#',end='')
22     print(lte.send_at_cmd('AT!="showphy"'))
```

```

23     print(lte.send_at_cmd('AT!="fsm"'))
24 print("] connected!")
25
26 print(socket.getaddrinfo('pybytes.pycom.io', 80))
27 socket.dnsserver(0, '8.8.8.8')
28 print(socket.dnsserver())
29 lte.deinit()

```

Configuración USIM

La configuración de la tarjeta USIM para la pycom Fipy es exactamente igual a la configuración empleada para los smartphones de las redes móviles 4G y 5G. En la tabla 5.6 se muestra la configuración realizada para esta USIM.

ICCID	IMSI	Smartphone
~102	293280000000003	PyCom Fipy

Tabla 5.6: Configuración USIM de dispositivos IoT

5.4. Despliegue de la red 5G NSA

El despliegue de la red 5G se ha realizado en modo *Non Standalone (NSA)*. Esto quiere decir que los cambios en la configuración de la estación base en la parte de acceso radio RAN, es decir, las modificaciones en este caso se deben realizar sobre el módulo eNB.

En este despliegue se ha empleado el archivo base de configuración *gnb-nsa.cfg*. Este archivo contempla la posibilidad del despliegue simultáneo de una celda LTE y otra NR. La configuración para la primera es exactamente igual a la realizada en el despliegue de la red 4G. Para la celda NR, se introducen una serie de parámetros que se muestran en la tabla 5.7. Además, en la figura 5.17 se destaca la configuración de las bandas empleadas en la red 5G.

Parámetro	Descripción	Valor
en_dc_sgc_cell_list	Lista de celdas NR	-
nr_band	Banda de frecuencias para NR	-
dl_nr_arfcn	Número del canal de DL para NR	176300 (Banda 5)
subcarrier_spacing	<i>Subcarrier Spacing</i>	15/30/60/120
ssb_pos_bitmap	<i>SSB Position Bitmap</i>	010..0
ssb_period	Periodicidad del SSB en ms	5/10/20/40/80/160

Tabla 5.7: Nuevos parámetros de configuración eNB-gNB

5.5. Implementación del analizador Perfyzer

En esta sección, se expone tanto la interfaz de usuario diseñada y la implementación del mismo empleando el lenguaje de programación Python para la aplicación de análisis del rendimiento.

5.5.1. Interfaz gráfico de usuario (GUI)

La interfaz gráfica se ha diseñado de forma que sea intuitiva y autoexplicativa. En esta subsección solamente se va a explicar las pantallas visuales. El desarrollo de la interfaz gráfica se ha realizado con el *designer* de PyQt5.

La aplicación Perfyzer contiene un total de seis pantallas que permiten diversas funcionalidades, como se muestra en la figura 5.21.

1. **Parser:** permite el parseo de los datos de mediciones brutos y su conversión a un archivo ".csv" para su posterior análisis. Además, permite listar los archivos parseados de forma que siempre tengas consciencia de que archivos se pueden cargar en la aplicación. Por último, incluye la funcionalidad para cargar los archivos a la aplicación.
2. **Exploratory Data Analysis (EDA):** permite el análisis inicial sobre los datos que componen el dataset, es decir, facilita información de la estructura del dataset, dimensiones y resultados estadísticos. Además, genera una serie de gráficas simples comparativas para descubrir patrones, detectar anomalías, etcétera.
3. **Feature Importance (FI):** permite el análisis de la relevancia de las características de entrada para la obtención de un determinado objetivo. En esta pantalla se permite la selección de tres tipos de algoritmos: FI básico o general, Local Interpretable Model-agnostic Explanations (LIME) [77] y SHapley Additive exPlanations (SHAP)[78].
4. **Clustering:** permite el uso de mecanismos de *clustering*, es decir, mecanismos cuyo objetivo es formar grupos cerrados y homogéneos a partir de un conjunto de observaciones que tienen diferentes propiedades, pero comparten que comparten ciertas similitudes. En esta pantalla se permite seleccionar entre tres tipos de *clustering*: *kmeans*, Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise (DBSCAN) y *spectral clustering*.
5. **Dimensionality Reduction (DR):** permite emplear mecanismos de reducción de variables de entrada del dataset, dado que un mayor número de características de entrada hace que las predicciones sean más complejas de modelar. En esta pantalla se permite seleccionar

entre dos tipos de algoritmos: Principal Components Analysis (PCA) y T-distributed Stochastic Neighbor Embedding (t-SNE).

6. **ANalysis Of VAriance (ANOVA):** permite emplear el método estadístico ANOVA para descubrir si los resultados del dataset son significativos, es decir, permiten determinar si es necesario rechazar la hipótesis nula o aceptar la hipótesis alternativa.

5.5.2. Implementación interna de Perfyzer

La implementación interna de la aplicación Perfyzer consiste en la explicación del código python desarrollado para el correcto funcionamiento de la app, así como, la explicación teórica y de implementación de cada uno de los algoritmos de *machine learning*.

Código de Perfyzer

La implementación se ha realizado completamente empleando python con la versión 3.9.2 y librerías *open-source*. La aplicación se ha desarrollado utilizando el paradigma Model - View - Controller (MVC).

- **Modelo:** se encarga de definir el tipo de datos que contiene la aplicación, en este caso, se especifican a través de la clase *Pyzer* que está en el archivo *pyzer.py*, el cuadro resumen al estilo UML se muestra en la figura 5.18.

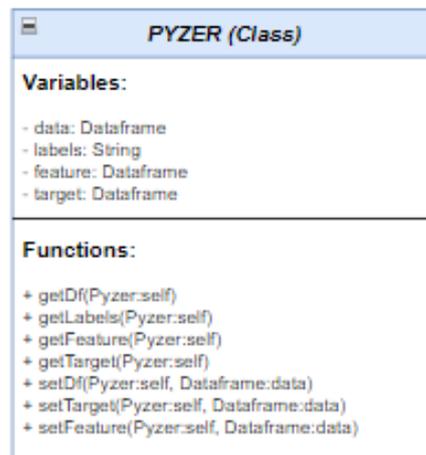


Figura 5.18: Modelo de la app Perfyzer

- **Vista:** se encarga de definir cómo se muestran los datos o informes en la aplicación y la generación de los gráficos fuera del *Wizard* de PyQt5

principal. Para ello, la interfaz gráfica al uso se encuentra en el archivo *gui.py* y las funciones relacionadas en el archivo *pyzer_graphics.py*. Los cuadros resúmenes al estilo UML se muestran en la figura 5.19.

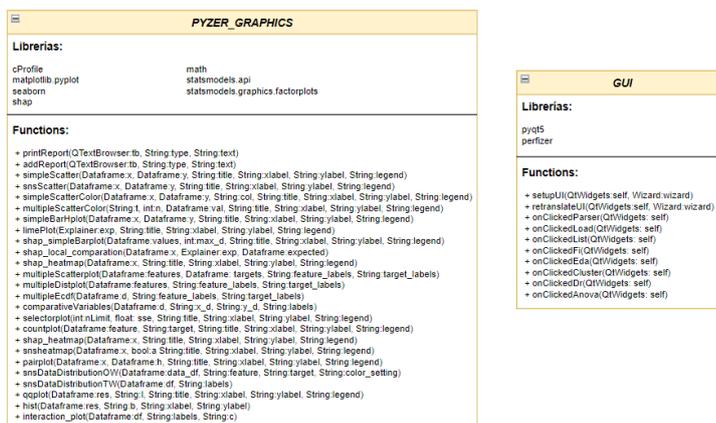


Figura 5.19: Vista de la app Perfyzer

- Controlador:** es básicamente el gestor de la aplicación. Se encarga de la lógica de la misma y la actualización del modelo y la vista. La estructura se compone de un núcleo que ejecuta el código a modo de *main* en el fichero *perfyzer.py* y una serie de ficheros con las funciones complementarias para el funcionamiento de los algoritmos. Todos ellos se muestran en la figura 5.20.

Algoritmos

Los algoritmos desarrollados para el análisis de los resultados de las mediciones de las redes 4G y 5G-NSA, se activan al pulsar los correspondientes botones que se visualizan en la figura 5.28.

- Parser:** consiste en tomar una serie de archivos con los datos en bruto y obtener los datos parseados y guardados en un archivo csv. Existe una variable en la interfaz que nos permite elegir si queremos parsear todos los documentos a la vez, o especificar el tipo de datos que se quieren parsear. En la figura 5.22 se visualiza el *flow-chart* del proceso.
- Listado:** genera una lista de los archivos parseados que se encuentran en la carpeta *./Parsed/* y los muestra en la app.
- Cargar dataset:** consiste en tomar el fichero indicado en la interfaz (sin extensión csv) y genera un objeto de la clase Pyzer que contiene toda la información del *dataset* mediante Dataframes de Pandas y etiquetas.

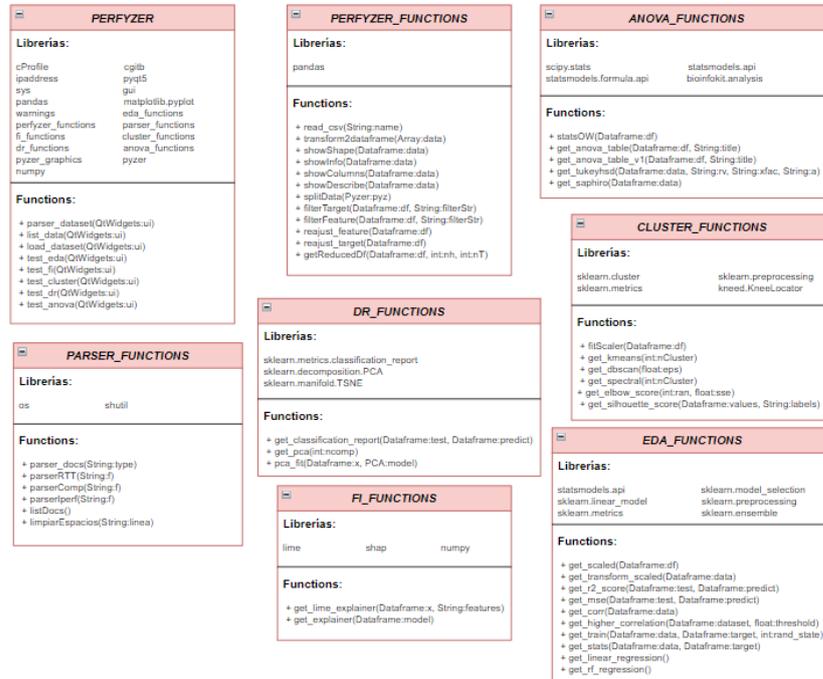


Figura 5.20: Vista de la app Perfyzer

- Exploratory Data Analysis (EDA):** consiste en el análisis fundamental e introductorio para comprender el comportamiento de los datos del dataset. Además, genera una serie de gráficas útiles para realizar comparativas. Cabe destacar que en este algoritmo se permite el uso de dos tipos de regresiones:

- Regresión lineal:** es el modelo más sencillo y pretende adaptar las observaciones a una línea. Este modelo se puede definir fácilmente como:

$$y_i \sim N(\mu_i, \sigma^2)$$

$$\mu_i = \beta_0 + \beta_1 x_i$$

$$\sigma^2 = \text{constante}$$

- Regresión Random Forest:** este tipo de regresión emplea árboles de decisión que se genera a partir de un conjunto de entrenamiento y define una atributos categóricos. Finalmente, utiliza métodos estadísticos para ordenar los atributos en nodos internos que serán útiles para la predicción. En nuestro caso se emplea la regresión implementada por Scikit-learn que se basa en *Mean Absolute Error (MAE)* que se define como:

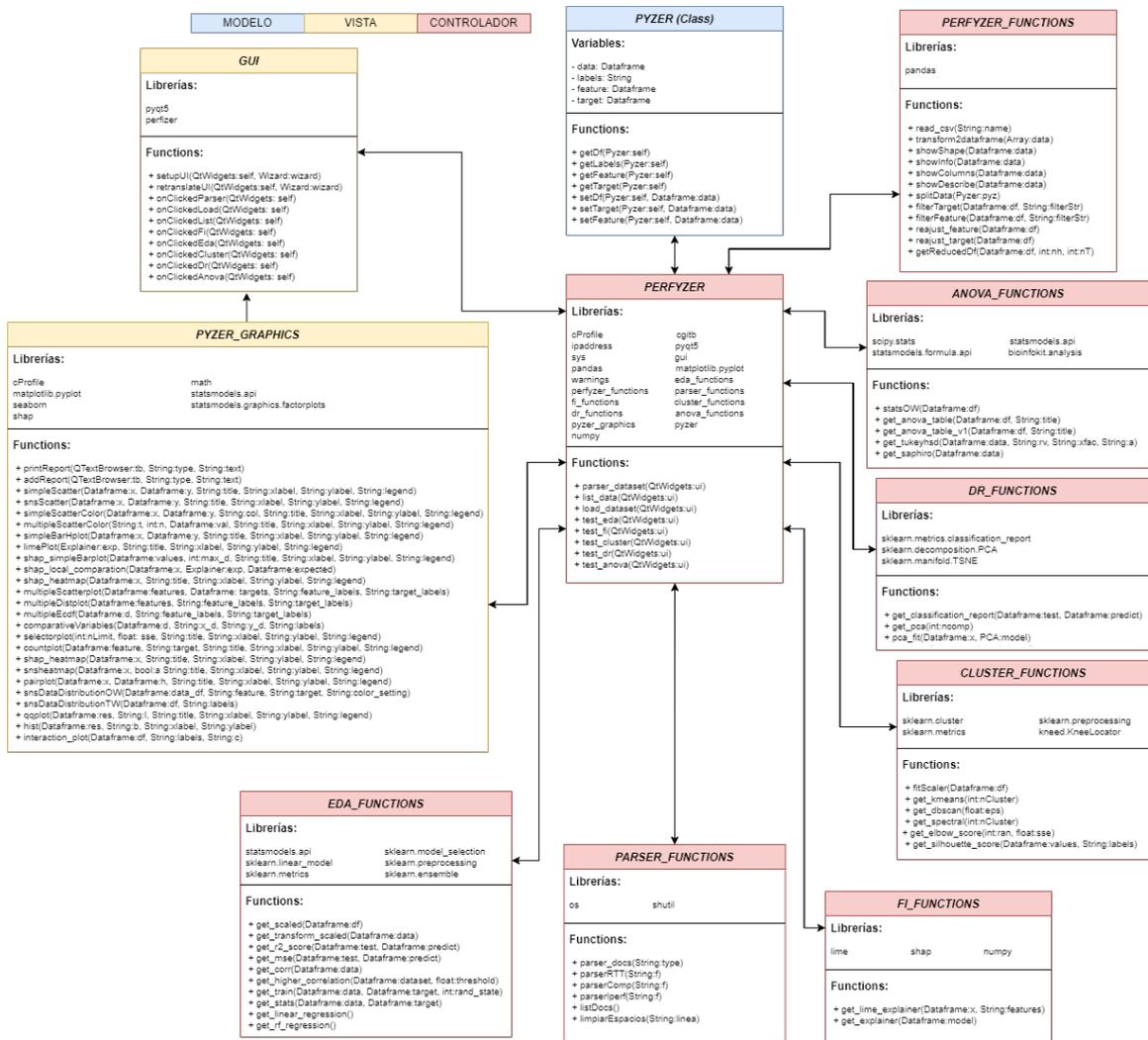


Figura 5.21: UML de la aplicación Perfyzer

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |y_i - \mu|$$

En la figura 5.23 se muestra el *flow-chart* del funcionamiento de este algoritmo implementado.

- Feature Importance (FI):** consiste en el uso de mecanismos para la selección de las características más importantes para un posterior análisis más en profundidad. En esta parte del código se ha decidido emplear tres tipos de análisis de importancia de características.

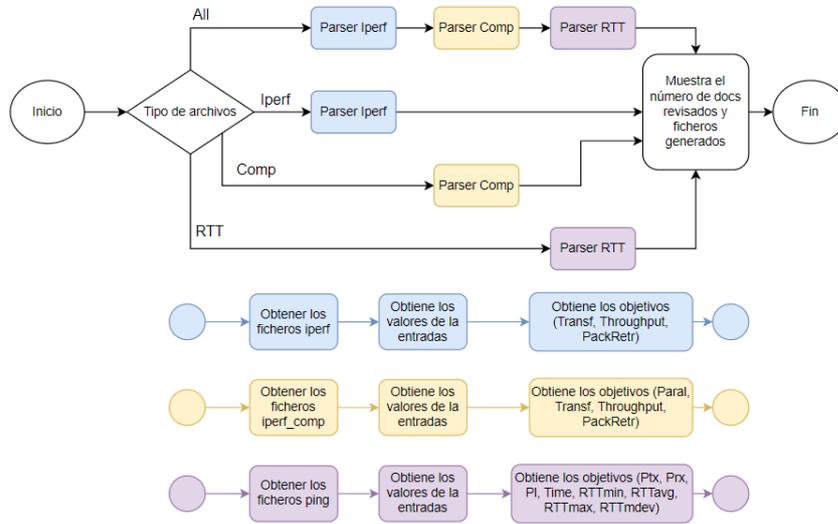


Figura 5.22: Flow chart del Parser

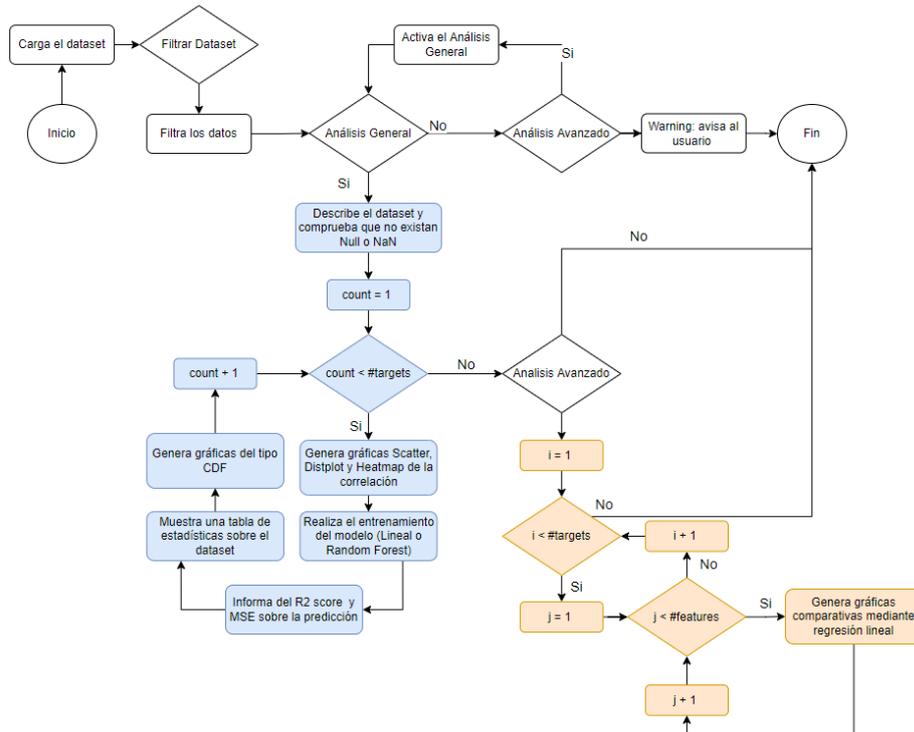


Figura 5.23: Flow chart del Exploratory Data Analysis (EDA)

- **General:** emplea la misma regresión Random Forest que se ha explicado anteriormente. Se emplea dado que internamente tiene una ordenación de las características que el modelo considera más relevantes.
- **Local Interpretable Model-agnostic Explanations (LIME):** este algoritmo es útil para explicaciones de modelos tabulares y clasificadores. Se utiliza para explicar las predicciones de un modelo de aprendizaje automático, lo cual es beneficioso a la hora de entender cómo se comporta un modelo. La explicación de LIME viene dada por la expresión [79]:

$$\xi(x) = \operatorname{argmin}_{g \in G} \mathcal{L}(f, g, \pi_x) + \Omega(g)$$

donde G es un conjunto de modelos potencialmente interpretables, $\mathcal{L}(f, g, \pi_x)$ es una medida de infidelidad del modelo g y $\Omega(g)$ es la medida de complejidad (e.g. profundidad del árbol de decisión)

- **SHapley Additive exPlanations (SHAP):** es un enfoque teórico de *game-theoretic* para explicar el resultado de cualquier modelo de aprendizaje automático. Este algoritmo enlaza la asignación óptima de características con las explicaciones locales utilizando los valores de Shapley de la teoría de juegos [80] y sus extensiones relacionadas. La explicación empleada por nuestra aplicación viene dada por [81]:

$$\phi^j(f) = \sum_{S \subseteq \{x^1, \dots, x^p\} \setminus \{x^j\}} \frac{|S|!(p - |S| - 1)!}{p!} (f(S \cup \{x^j\}) - f(S))$$

donde S es un subconjunto de características j , p es el número de características del modelo, f es el modelo y x^j es la característica.

En la figura 5.24 se muestra el *flow-chart* del funcionamiento del apartado *Feature Importance*.

- **Clustering:** consiste en el uso de mecanismos de aprendizaje automático relacionados con el agrupamiento de observaciones dependiendo de ciertas entradas o características. En la implementación se ha decidido emplear tres tipos de mecanismos de *clustering*.
 - **K-means:** es uno de los algoritmos de aprendizaje automático no supervisado más sencillos de implementar, consiste en agrupar observaciones similares y descubrir patrones subyacentes. Para

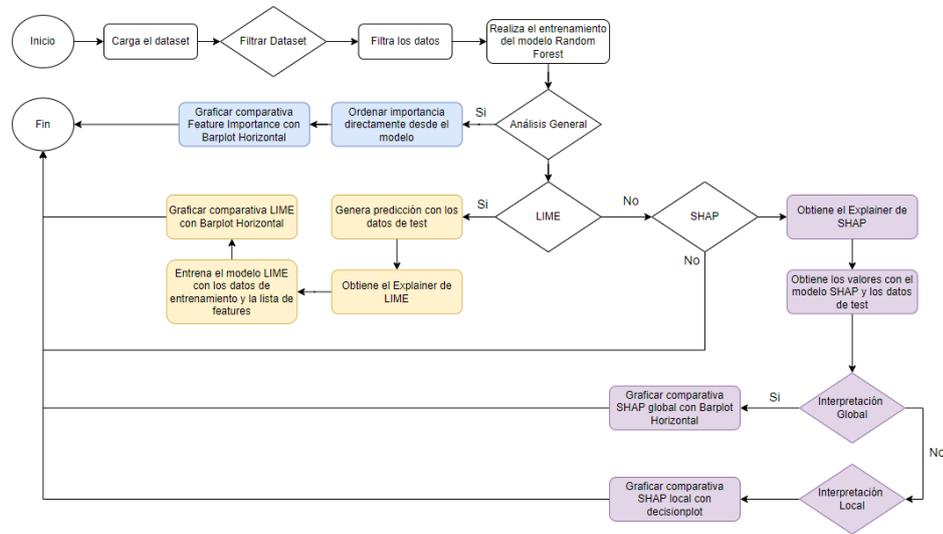


Figura 5.24: Flow chart del Feature Importance (FI)

lograr este objetivo, K-means busca un número fijo N de clusters en un conjunto de datos.

El proceso completo de este algoritmo es sencillo, consiste en inicializar aleatoriamente los centroides que determinan los clusters, después iterativamente asignan las observaciones más cercanas a un determinado clusters y se va calculando el nuevo centroide, hasta que el centroide se estabilice. Para más detalles en [82].

- **Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise (DBSCAN):** es un algoritmo de clustering basado en la densidad. Esta técnica consiste en suponer que si una observación corresponde a un cluster, entonces debería estar rodeado de otras observaciones del mismo cluster. En nuestro caso, se trabaja con DBSCAN cuya distancia empleada para la clusterización está basada en distancia euclídea.
- **Spectral Clustering:** se considera un algoritmo en crecimiento que en ciertas situaciones presenta mejor rendimiento que otros algoritmos como los mencionados previamente. Esta técnica considera cada observación como un nodo de un grafo e intenta solucionar el problema mediante partición de grafos. Los pasos a seguir para implementar este algoritmo se puede ver en [83].

En la figura 5.25 se muestra el *flow-chart* del funcionamiento del Clustering.

- **Dimensionality Reduction (DR):** contiene los procesos necesarios

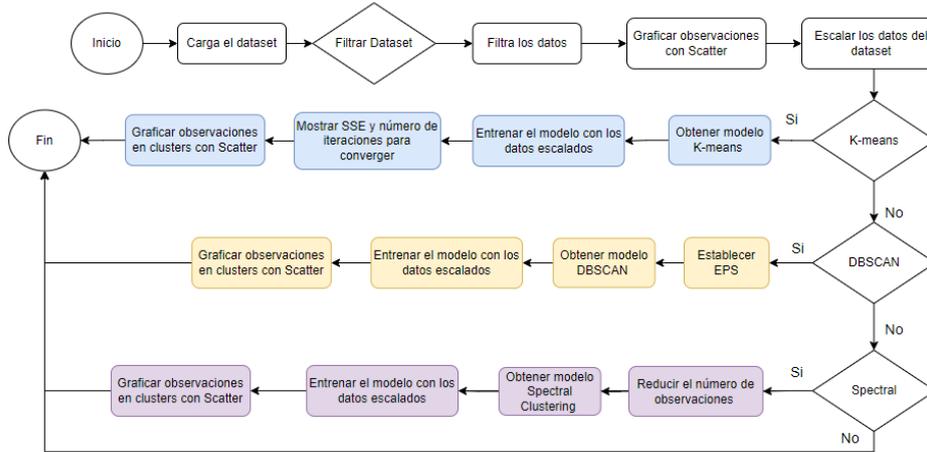


Figura 5.25: Flow chart del Clustering

para modificar el *dataset* de inicio reduciendo el número de variables aleatorias a un número de componentes principales. Estos algoritmos son muy útiles cuando nuestro problema tiene un número elevado de características. En este apartado se ha decidido implementar dos algoritmos que se encarguen de la reducción de dimensiones del *dataset*.

- **Principal Components Analysis (PCA):** este algoritmo se encarga de encontrar aproximaciones de baja dimensiones a los datos de las observaciones en subespacios lineales de datos. Este mecanismo se fundamenta en dos procesos [84].

1. Definir todos los subespacios lineales de K dimensiones que se definen como:

$$\ell_k = \operatorname{argmin}_{\ell \in \mathcal{L}_k} E \left(\min_{y \in \ell} \|\tilde{X} - y\|^2 \right)$$

donde ℓ_k denotan los todos los subespacios lineales, $\tilde{X} = X - \mu$

2. Calcula la matriz de covarianza Σ y se realiza la descomposición espectral como:

$$\Sigma = E\Lambda E^T = \sum_j \lambda_j e_j e_j^T$$

donde λ_j corresponde con los valores propios ordenados en Σ y e_j son los valores propios.

- **T-distributed Stochastic Neighbor Embedding (t-SNE):** este algoritmo pretende realizar la reducción de dimensiones al

igual que PCA, pero no emplea subespacios lineales, por lo que es más complejo de entender. El mecanismo t-SNE utiliza una distribución t-Student para calcular la similitud entre dos puntos en un espacio de baja dimensión, para evitar problemas de aglomeración y optimización. Los pasos a seguir son [85]:

1. Calcular la distribución t-Student con un grado de libertad y usando esta distribución, se define las probabilidades conjuntas q_{ij} como:

$$q_{ij} = \frac{\left(1 + \|y_i - y_j\|^2\right)^{-1}}{\sum_{k \neq l} \left(1 + \|y_k - y_l\|^2\right)^{-1}}$$

2. Calcular el gradiente entre los pares en espacios de altas dimensiones (p_{ij}) y las probabilidades conjuntas q_{ij} que se puede obtener con la siguiente fórmula:

$$\frac{\delta C}{\delta y_i} = 4 \sum_j (p_{ij} - q_{ij}) (y_i - y_j) \left(1 + \|y_i - y_j\|^2\right)^{-1}$$

3. Calcular la representación de los datos en baja dimensión como:

$$Y^{(t)} = Y^{(t-1)} + \eta \frac{\delta C}{\delta y} + \alpha(t) \left(Y^{(t-1)} - Y^{(t-2)}\right)$$

El proceso desarrollado en python para Dimensionality Reduction se puede apreciar en la figura 5.26:

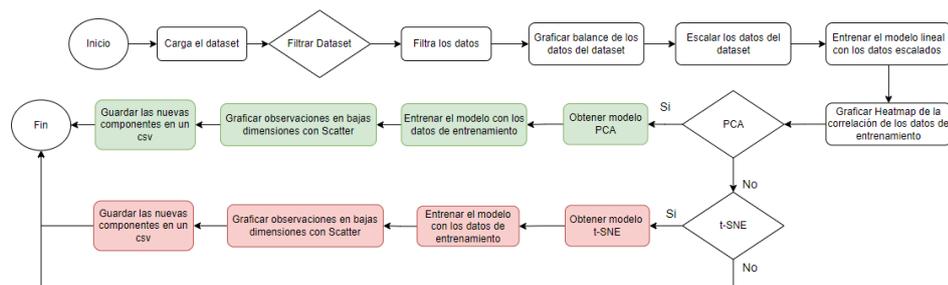


Figura 5.26: Flow chart del Dimensionality Reduction

- **ANALYSIS OF VARIANCE (ANOVA):** se encarga de realizar una prueba estadística ANOVA que permite determinar si existe una diferencia estadísticamente significativa entre dos o más grupos categóricos mediante la comprobación de las diferencias de medias utilizando la varianza. En la implementación se permite realizar el test de los dos tipos de ANOVA:
 - **One-way ANOVA:** trabaja solamente con una variable independiente de entrada o característica (también conocida como factor) y una variable dependiente continua de salida u objetivo. La variable independiente divide los casos en dos o más niveles, categorías o grupos mutuamente excluyentes dependiendo de las medias de la variables dependiente.
 - **Two-ways:** trabaja con dos o más variables independientes de entrada y una variable dependiente continua de salida. Las variables independientes dividen los casos en dos o más niveles mutuamente excluyentes.

Mediante un *flow-chart* se muestre el funcionamiento de ANOVA (véase la figura 5.27)

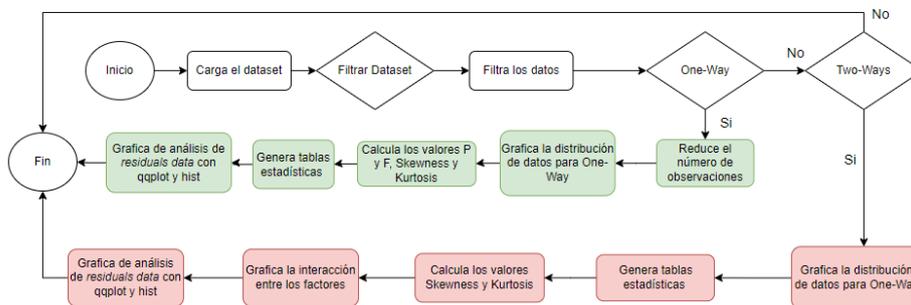


Figura 5.27: Flow chart de ANOVA

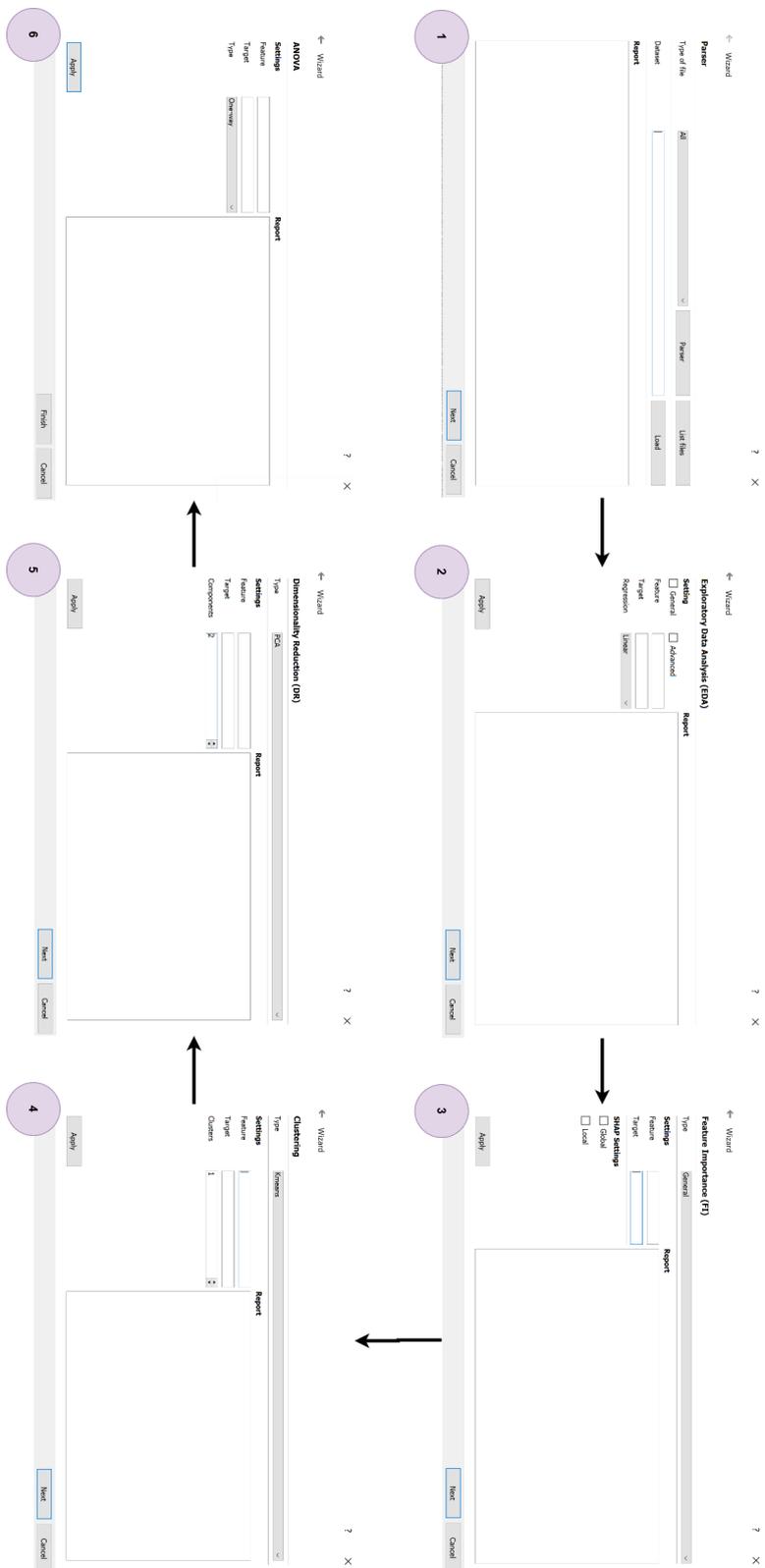


Figura 5.28: Navegación por la interfaz gráfica Perfyzer

Capítulo 6

Pruebas

En este capítulo se presentan las pruebas que se han realizado para cada una de las redes desplegadas, es decir, la red 4G, red 5G y NB-IoT. Las pruebas consisten en comprobar las funcionalidades de las redes y algunas pruebas de medición de variables para comprobar la calidad que puede proporcionarnos.

6.1. Pruebas de concepto sobre las redes

6.1.1. Conectividad entre Estación Base y UE

Al ser la primera red que se despliega con el software *Amarisoft LTE 100* debemos comprobar que la conectividad entre los eNBs y los UEs se realiza correctamente. Para ello, simplemente debemos lanzar la red 4G y esperar a que los dispositivos se conecten automáticamente. El proceso internamente es similar para la conexión de las redes LTE-M y 5G. En este caso, podemos visualizar los mensajes enviados para la autenticación y conexión desde la interfaz web como se ve en la figura 6.1.

Debido a que en la interfaz web repiten mensajes debidos a conexiones y desconexiones internas, se ha decidido que por simplicidad de lectura y poder entender mejor el intercambio de los mensajes en los diferentes procedimientos graficarlos mediante diagramas de secuencia. En la figura 6.2 se muestra el intercambio de mensajes resumido para la conexión entre el smartphone y la estación base.

Time	Diff	RAN	CN	IMS	UE ID	IMSI	Cell	Info	Message
10.22:57.286		STAP							Connecting to 127.0.1.100:36412
10.22:58.202	+0.916	STAP							New connection from 127.0.1.1:45222
-		STAP							127.0.1.1:45222 S1 setup response
10.22:58.252	+0.001	STAP							127.0.1.100:36412 S1 setup response
10.23:02.606	+4.354		RX						New connection from 127.0.0.1:33912
-			RX						New connection from 127.0.0.1:59307
-			RX						127.0.0.1:33912 Capabilities-Exchange-Request
-			CX						127.0.0.1:33912 Capabilities-Exchange-Answer
-			RX						127.0.0.1:59307 Capabilities-Exchange-Request
-			RX						127.0.0.1:59307 Capabilities-Exchange-Answer
-				MMS					MMS server listen on 192.168.3.1:1111
-			CX						Connecting to 127.0.1.100:3868
-			RX						127.0.1.100:3868 Capabilities-Exchange-Request
-			CX						127.0.1.100:3868 Capabilities-Exchange-Answer
-			RX						127.0.1.100:3868 Capabilities-Exchange-Answer
10.23:06.022	+3.416	RRC			1		1	CCCH	RRC connection request
-		RRC			1		1	CCCH	RRC connection setup
10.23:06.072	+0.050	RRC			1		1	DCCH	RRC connection setup complete
-		NAS			1			EMM	Attach request
-		STAP			100	293280000000007			127.0.1.100:36412 Initial UE message
-		NAS			100	293280000000007		EMM	Attach request
-		NAS			100	293280000000007			EPS encryption caps=0x0 Integrity caps=0x0
-		NAS			100	293280000000007			GUTI not found
-		NAS			100	293280000000007			5GS encryption caps=0x0 Integrity caps=0x000
-		NAS			100	293280000000007		EMM	Identify request
-		STAP			100	293280000000007			127.0.1.1:45222 Downlink NAS transport
10.23:06.073	+0.001	STAP			100				127.0.1.100:36412 Downlink NAS transport
-		NAS			1			EMM	Identify request
-		RRC			1		1	DCCH	DL information transfer
10.23:06.102	+0.029	RRC			1		1	DCCH	UL information transfer
-		NAS			1			EMM	Identify response
-		STAP			100				127.0.1.100:36412 Uplink NAS transport
-		STAP			100	293280000000007			127.0.1.1:45222 Uplink NAS transport
-		NAS			100	293280000000007		EMM	Identify response
-		NAS			100	293280000000007		EMM	Authentication request
-		STAP			100	293280000000007			127.0.1.1:45222 Downlink NAS transport
10.23:06.103	+0.001	STAP			100				127.0.1.100:36412 Downlink NAS transport
-		NAS			1			EMM	Authentication request
-		RRC			1		1	DCCH	DL information transfer
10.23:06.202	+0.099	RRC			1		1	DCCH	UL information transfer
-		NAS			1			EMM	Authentication response
-		STAP			100				127.0.1.100:36412 Uplink NAS transport
-		STAP			100	293280000000007			127.0.1.1:45222 Uplink NAS transport
-		NAS			100	293280000000007		EMM	Authentication response
-		NAS			100	293280000000007			UE auth OK
-		NAS			100	293280000000007		EMM	Security mode command
-		STAP			100	293280000000007			127.0.1.1:45222 Downlink NAS transport
10.23:06.403	+0.001	STAP			100				127.0.1.100:36412 Downlink NAS transport
-		NAS			1			EMM	Security mode command
-		RRC			1		1	DCCH	DL information transfer
10.23:06.442	+0.039	RRC			1		1	DCCH	UL information transfer
-		NAS			1			EMM	Security mode complete
-		STAP			100				127.0.1.100:36412 Uplink NAS transport
-		STAP			100	293280000000007			127.0.1.1:45222 Uplink NAS transport
-		NAS			100	293280000000007		EMM	Security mode complete
10.23:06.443	+0.001	STAP			100				127.0.1.100:36412 Initial context setup request
-		NAS			100	293280000000007		EMM	Attach accept
-		STAP			100	293280000000007			127.0.1.1:45222 Initial context setup request
10.23:06.482	+0.039	RRC			1		1	DCCH	Security mode complete
-		RRC			1		1	DCCH	UE capability enquiry
10.23:06.552	+0.070	RRC			1		1	DCCH	UE capability information
-		STAP			100				127.0.1.100:36412 UE capability info indication
-		NAS			1			EMM	Attach accept
-		RRC			1		1	DCCH	RRC connection reconfiguration
10.23:06.553	+0.001	STAP			100	293280000000007			127.0.1.1:45222 UE capability info indication
10.23:06.582	+0.029	RRC			1		1	DCCH	RRC connection reconfiguration complete
-		STAP			100				127.0.1.100:36412 Initial context setup response
-		RRC			1		1	DCCH	UL information transfer
-		NAS			1			EMM	Attach complete
-		STAP			100				127.0.1.100:36412 Uplink NAS transport
-		STAP			100	293280000000007			127.0.1.1:45222 Initial context setup response
-		STAP			100	293280000000007			127.0.1.1:45222 Uplink NAS transport
-		NAS			100	293280000000007		EMM	Attach complete
10.23:13.189	+6.606		IMS						New connection from 127.0.0.2:10042
-			IMS		1				IMS register imsi=293280000000007 imelv=86372504
-			IMS		1				IMS Register ack

Figura 6.1: Conexión y Autenticación del Smartphone

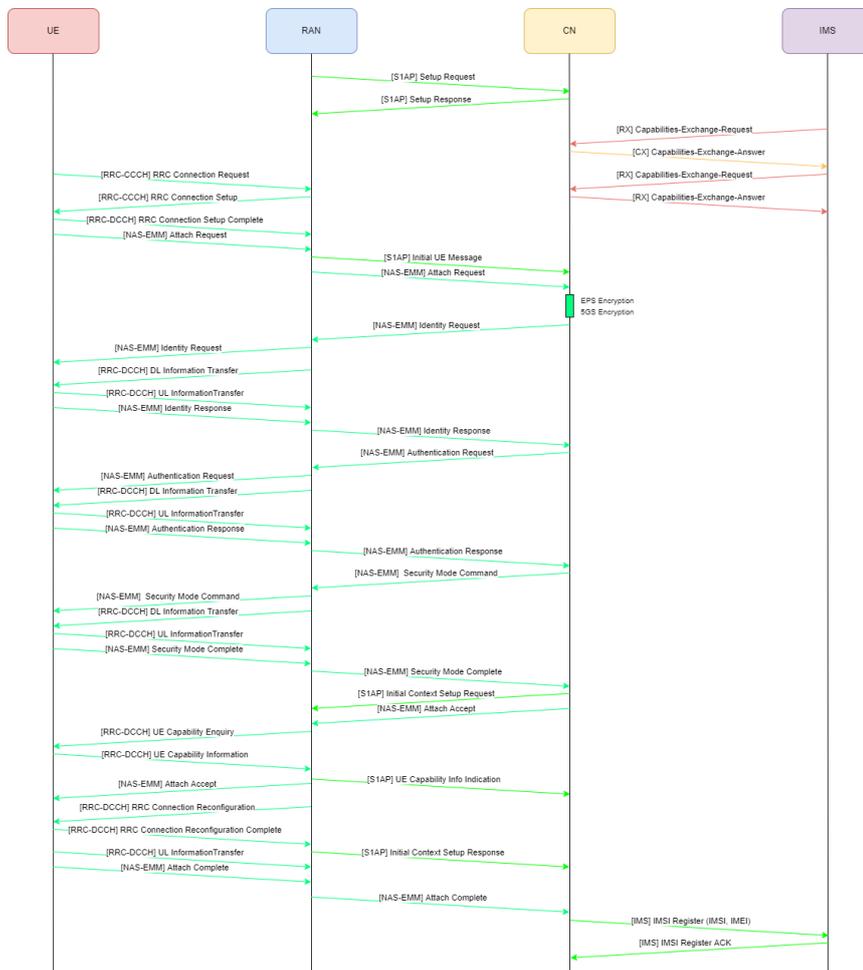


Figura 6.2: Diagrama de secuencia de la conectividad entre dispositivo y Estación base

En este punto, debemos tener conectividad con la red. Una forma sencilla de comprobarlo es realizar una búsqueda en Internet.

Nota: es posible que el móvil no se conecte automáticamente. Podemos conectarnos manualmente desde la configuración de la red móvil.

Respecto a la red LTE-M Cat-M1 también se ha realizado la prueba de conectividad con éxito. Los mensajes intercambiados es similar al de la red 4G incluyendo los mensajes que se describen a continuación:

- **[RRC] System Information Block Type 1:** describe los parámetros relacionados del SIB1, es decir, indica si está permitido el uso de eDRX, la longitud de la ventana en ms y la información de la lista de *schedulers* a usar.

- **[RRC] System Information:** describe los parámetros del SIB2 como el mapeo del preámbulo, la configuración básica de los canales físicos.

Por último, se ha realizado la conectividad del smartphone con la red 5G NSA. Al igual que el caso anterior, el *core* sigue siendo el mismo que para la red LTE, entonces el intercambio de mensajes es similar e incluye:

- **[RRC] RRC Connection Reconfiguration:** donde se informa de las medidas de configuración de las celdas de las redes 4G LTE y 5G NR NSA.
- **[RRC] Measurement Report:** informa de las medidas del UE para la detección de la celda NR.
- **[RRC] RRC Connection Reconfiguration Complete:** indica que el UE acepta la configuración de la celda NR para añadirla.

6.1.2. Envío de SMS

El envío de mensajes SMS se pueden probar de dos formas.

- **Simular SMS:** podemos simular un envío de mensaje SMS directamente desde la estación base. Para ello, debemos irnos al IMS y emplear el comando:

```
sms [impi/impu] 'mensaje'  
e.g. sms 293280000000001 hola
```

- **Enviar SMS desde otro terminal:** obviamente podemos emplear este servicio entre terminales que se encuentre identificados en la red. Simplemente debemos enviar el mensaje al número de teléfono (MSISDN) asociado al terminal al que queremos realizar el envío como se ve en 6.3.

El intercambio de mensajes en un envío SMS se muestra mediante en la figura 6.4.

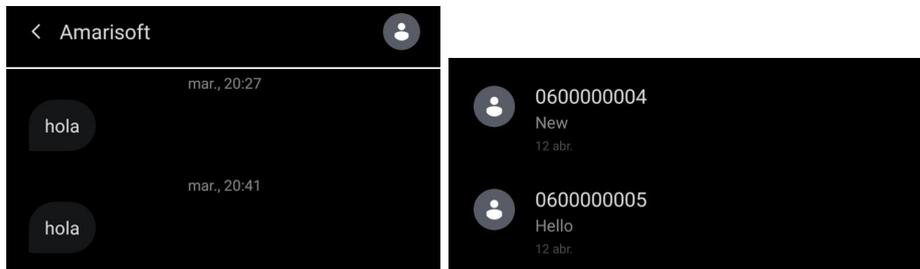


Figura 6.3: Envío SMS

23 46 48 972	+5 952	IMS	1	SMS-CP
-	-	IMS	1	SMS-CP
-	-	IMS	1	SMS src=0600000000 dst=600: received
-	-	IMS	1	SMS src=0600000000 dst=600: sending
-	-	IMS	1	SMS-CP
-	-	IMS	1	SMS-CP
-	-	NAS	2	EMM Uplink NAS transport
-	-	NAS	101 (100)	EMM Uplink NAS transport
-	-	IMS	1	SMS-CP
-	-	IMS	1	SMS-CP
-	-	NAS	101 (100)	EMM Downlink NAS transport
-	-	IMS	1	SMS-CP
-	-	NAS	101 (100)	EMM Downlink NAS transport
-	-	IMS	1	SMS-CP
-	-	NAS	101 (100)	EMM Downlink NAS transport

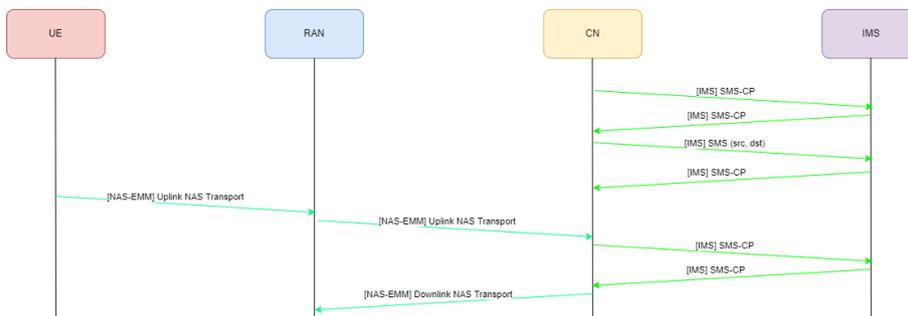


Figura 6.4: Mensajes y diagrama de secuencia de un SMS

6.1.3. Llamada VoLTE

En una red LTE o NR es posible realizar llamadas entre terminales sobre IP, es decir, realizar llamadas VoLTE. Para ello, se debe activar esta funcionalidad en los terminales mediante la clave `*#*#86583#*#*`. Una vez activado, si la base de datos IMS está actualizada y contiene la información adecuada que coincide con la configuración de la tarjeta USIM, entonces es posible establecer una llamada y quedará registrada como se muestra en la figura 6.5.

Time	Diff	CN	IMS	UE ID	Info	Message
9:46:41.481	+0.019	RRCC	1	DCCH	UL Information Transfer	
-	-	NAS	1	ESM	ESM information transfer	
9:46:41.482	+0.001	RRCC	1	DCCH	Security Mode Command	
9:46:41.501	+0.019	RRCC	1	DCCH	Security Mode Complete	
-	-	RRCC	1	DCCH	UE Capability Enquiry	
9:46:41.529	+0.028	RRCC	1	DCCH	UE Capability Information	
-	-	NAS	1	EMM	Attach accept	
-	-	RRCC	1	DCCH	RRC Connection Reconfiguration	
9:46:41.561	+0.032	RRCC	1	DCCH	RRC Connection Reconfiguration Complete	
9:46:41.721	+0.119	RRCC	1	DCCH	UL Information Transfer	
-	-	NAS	1	ESM	PDN connectivity request	
9:46:41.722	+0.001	NAS	1	ESM	Activate default EPS bearer context request	
-	-	RRCC	1	DCCH	RRC Connection Reconfiguration	
9:46:41.741	+0.019	RRCC	1	DCCH	RRC Connection Reconfiguration Complete	
9:46:41.761	+0.020	RRCC	1	DCCH	UL Information Transfer	
-	-	NAS	1	ESM	Activate default EPS bearer context accept	

Time	Diff	IMS	UE ID	Info	Message
9:45:44.250	-	IMS	-	-	New connection from 127.0.0.2:10042
9:46:41.601	+57.351	IMS	1	IMS	imsi:001010123456789 imeisv=8625630349158901 flags
-	-	IMS	1	IMS	IMS Register ack
9:46:41.850	+0.249	SIP	0	REGISTER	sip:ims.mnc001.mcc001.3gppnetwork.org SIP/2.0 from 192.168.4.2.500
-	-	SIP	0	SIP/2.0	401 Unauthorized to 192.168.4.2.5000
9:46:41.978	+0.128	SIP	1	REGISTER	sip:ims.mnc001.mcc001.3gppnetwork.org SIP/2.0 from 192.168.4.2.500
-	-	IMS	-	-	001010123456789 authenticated
-	-	IMS	-	-	Register 001010123456789@192.168.4.2.5000
-	-	SIP	1	SIP/2.0	200 OK to 192.168.4.2.5000
9:46:42.029	+0.051	SIP	2	SUBSCRIBE	sip:001010123456789@ims.mnc001.mcc001.3gppnetwork.org SIP/2.0
-	-	SIP	2	SIP/2.0	200 OK to 192.168.4.2.5000
-	-	SIP	2	NOTIFY	sip:001010123456789@192.168.4.2.5080 SIP/2.0 to 192.168.4.2.5000
9:46:42.137	+0.108	SIP	2	SIP/2.0	200 OK from 192.168.4.2.5000
9:46:57.070	+14.933	SIP	3	INVITE	tel:666.phone-context:ims.mnc001.mcc001.3gppnetwork.org SIP/2.0 to
-	-	SIP	3	SIP/2.0	401 Unauthorized to 192.168.4.2.5000
9:46:57.109	+0.039	SIP	4	ACK	tel:666.phone-context:ims.mnc001.mcc001.3gppnetwork.org SIP/2.0 to
9:46:57.170	+0.061	SIP	5	INVITE	tel:666.phone-context:ims.mnc001.mcc001.3gppnetwork.org SIP/2.0 to
-	-	IMS	-	-	001010123456789 authenticated
-	-	SIP	5	SIP/2.0	100 Trying to 192.168.4.2.5000
-	-	SIP	5	SIP/2.0	183 Session Progress to 192.168.4.2.5000
9:46:57.289	+0.119	SIP	5	PRACK	sip:001010123456789@192.168.4.1.5060 SIP/2.0 from 192.168.4.2.500
-	-	SIP	5	SIP/2.0	200 OK to 192.168.4.2.5000

Figura 6.5: Mensajes en llamada VoLTE (log MME a la izquierda y log IMS a la derecha)

Además, en la figura 6.6 se muestran el intercambio de mensajes ordenados mediante un diagrama de secuencia. Suponemos el terminal se encuentra registrado por el nodo IMS.

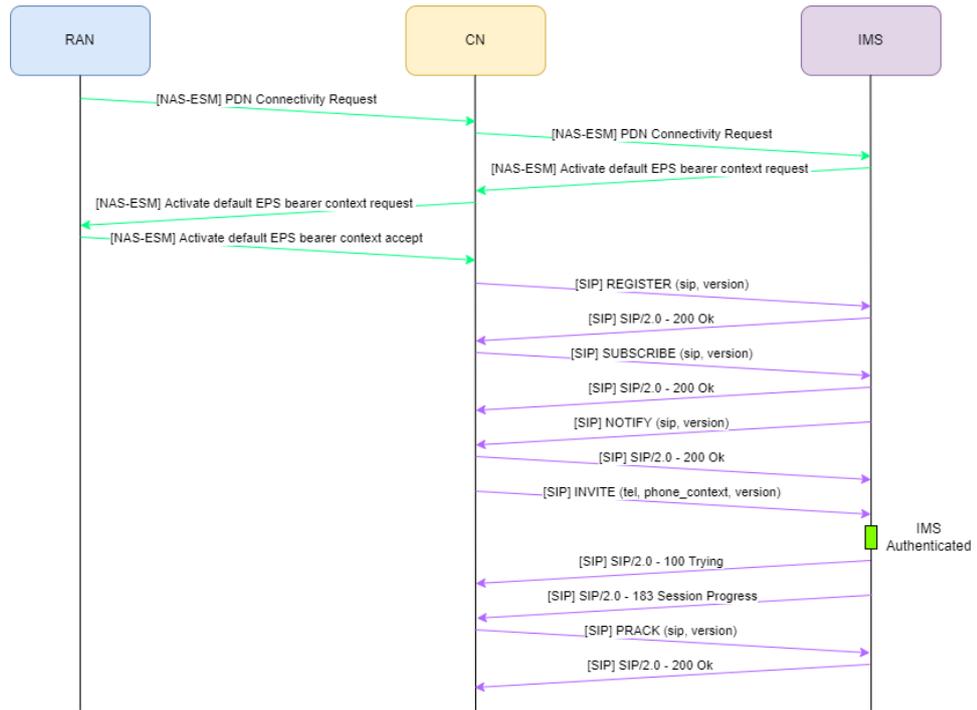


Figura 6.6: Diagrama de secuencia de la llamada VoLTE

6.2. Metodología de experimentación

6.2.1. Diseño de experimentos

Este proyecto consiste en la evaluación del rendimiento de las redes 4G LTE y 5G NR. Debido a que las medidas se realizan sobre bandas licenciadas, no es posible realizar las pruebas pertinentes en cualquier situación y por tanto, se realizan sobre un entorno controlado sin afectar a la contaminación del entorno radioeléctrico. Es decir, las pruebas de medición se realizarán en el interior de una cámara anecoica. Otra consideración es que nuestra señal no se verá afectada por las ondas electromagnéticas que puedan interferir con las emitidas por la estación base. Además, debemos destacar que aunque el escenario de medición es simple, la toma de todas las medidas y su análisis varios meses. También se debe tener en cuenta que se ha podido trabajar en la cámara semi-anechoica solamente en los momentos en los que se encontraba desocupada, lo que complica el trabajo y extendiendo el tiempo de experimentación aún más allá de los dos meses mencionados.

Setup de experimentación

El *setup* es un factor principal a la hora de experimentar dado que cualquier variación en este puede afectar significativamente a los resultados. En este proyecto, el *setup* se instala dentro de una cámara anecoica como se muestra en la figura 6.7.

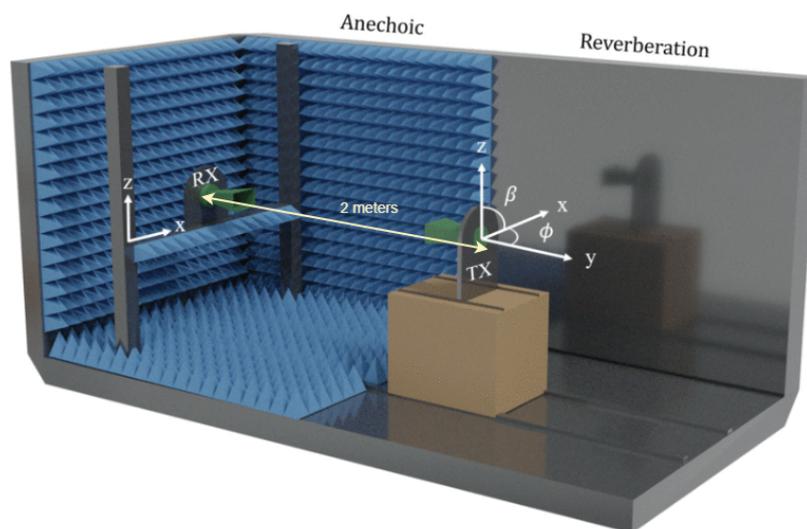


Figura 6.7: Setup de experimentación en la cámara semi-anechoica

Como se aprecia, se emplea un transmisor (estación base) y un receptor (smartphone, en concreto, Huawei P40 Lite 5G). Estos se encuentran enfrentados y perfectamente alineados a una distancia de dos metros cuando trabajamos en la zona anecóica de la cámara y se encontraran alineados, pero no enfrentados cuando trabajamos en la zona reverberante de la cámara. Esta variación podemos apreciarla en la figura 6.8.

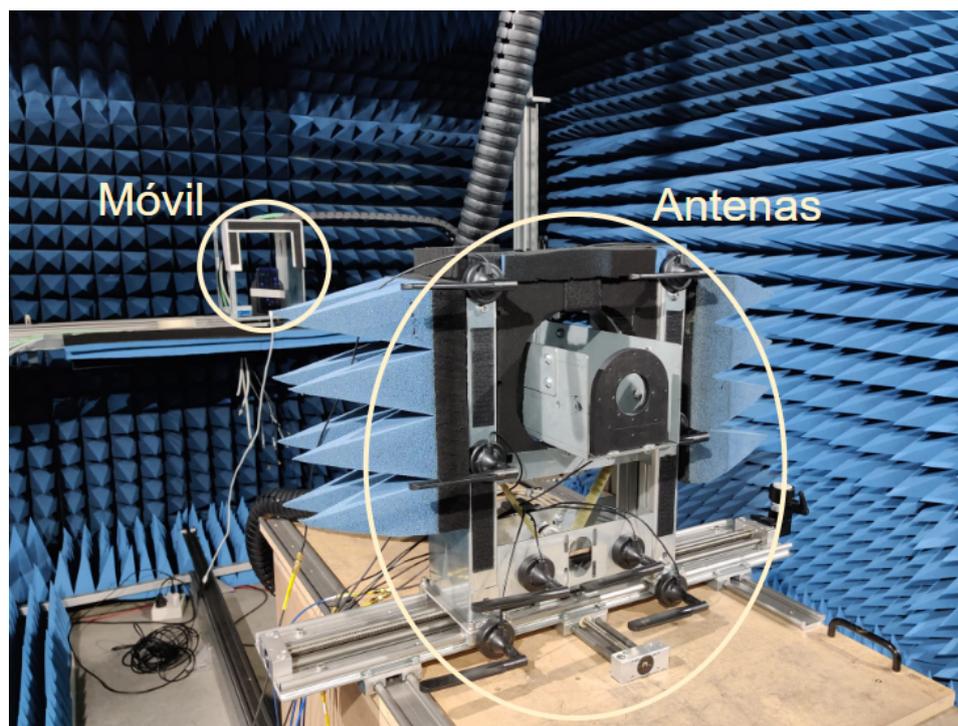


Figura 6.8: Setup para zona reverberante

Respecto al transmisor, obviamente se compone de varias antenas dado que se pretende emplear tecnología MIMO2x2. Por otro lado, el receptor (Huawei P40 Lite 5G) emplea también dos antenas. En la figura 6.9 se muestra la distribución de las antenas del transmisor de forma que la distancia entre las antenas con la misma función sea mayor del doble de la longitud de onda (λ) de forma que no existe acoplo entre antenas. Además, al desplegar la ref 5G NSA se generan multiceldas, es decir, una celda LTE y otra NR empleando bandas de frecuencias diferentes para evitar la interferencia en frecuencia.

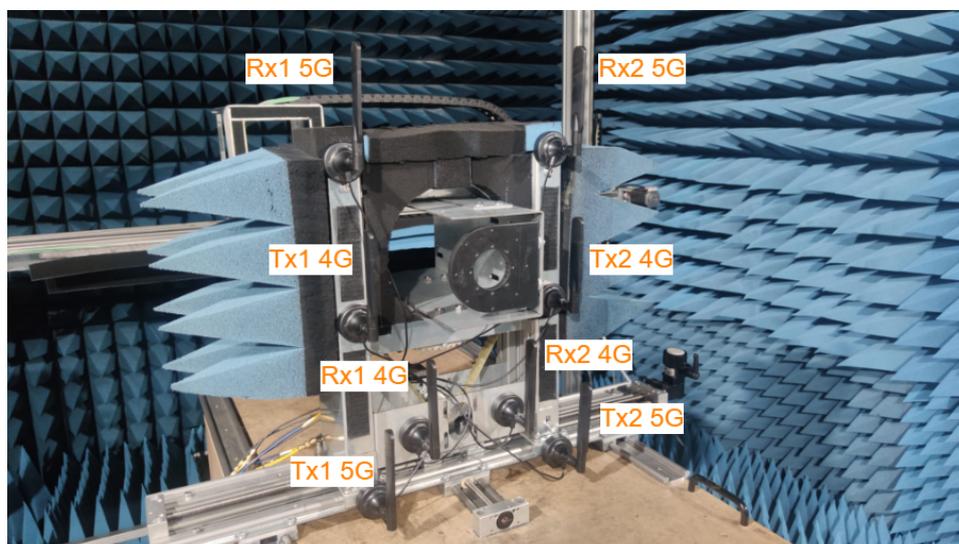


Figura 6.9: Distribución de las antenas

Dataset de experimentación

En esta experimentación, se ha decidido emplear una serie de parámetros de entrada, de características o categóricas. Estos parámetros se describen en las tablas 6.1 y se modifican en cada experimento mediante software, o hardware en su defecto.

Parámetro	Descripción	Valores
Tecnología	Tipo de red que se emplea	4G(4) / 5G(5)
Multiplexación (FDD)	Tipo de multiplexación empleado	FDD(1) / TDD(2)
Bandwidth (BW)	Ancho de banda de la celda	1.4/5/10/15/20 MHz
MIMO	Número de antenas empleadas	SISO(1) / MIMO(2)
Banda	Banda de frecuencia empleada	4G: 1/3/5/7/20/38/41 5G: 1/38
Posición	Posición del terminal	Centro(1)
Cámara	Zona de medidas en la cámara	Anecoica(1) / Rever(2)
Polarización	Posición de antenas	1/2/3 *
Dispositivo (Disp)	Dispositivo utilizado	Huawei(1) / OnePlus(2) **

Tabla 6.1: Parámetros de entrada

* La polarización dependerá de la posición de las antenas y las tres variaciones se muestran en orden en la figura 6.10.

** En las mediciones solamente se emplea el dispositivo Huawei dado que soporta ambas tecnologías, y así evitamos la alteración de un factor.



Figura 6.10: Polarización de las antenas

En cada experimento se pretende analizar el rendimiento en función de los parámetros de rendimiento u objetivo que se describen en la tabla 6.2 y se obtienen empleando iperf3 y ping entre los dispositivos.

Parámetro	Descripción	Unidad
Transf	Tamaño de los datos transferidos	MBytes
Throughput	Velocidad con la que se transfieren los datos	Mbits/sec
PcktRetr	Paquetes retransmitidos	-
Ptx	Paquetes transmitidos	-
Prx	Paquetes recibidos	-
Pl	Porcentaje de paquetes perdidos	-
Time	Tiempo total del ping	ms
RTTmin	<i>Round Trip Time</i> mínimo	ms
RTTavg	<i>Round Trip Time</i> medio	ms
RTTmax	<i>Round Trip Time</i> máximo	ms
RTTmdev	Desviación típica del RTT	ms

Tabla 6.2: Parámetros de rendimiento

Finalmente, se experimentaron con todas las configuraciones posibles, es decir, se realizaron aproximadamente quinientos experimentos y se recopiló todos los datos en bruto que se almacenan en archivos con extensión txt como los que se muestran en la figura 6.13. Posteriormente, se analizaron empleando la aplicación Perfyzer como se muestra en el siguiente capítulo, que proporciona información estadística para comprender el rendimiento de la entrega de datos bajo diversas configuraciones de parámetros.

iperf_4G_FDD_1p4_MIMO2x2_banda1_centro_anecoica_1_huawei.txt	25/04/2022 12:59	Documento de texto	228 KB
iperf_4G_FDD_1p4_MIMO2x2_banda1_centro_anecoica_2_huawei.txt	25/04/2022 12:59	Documento de texto	228 KB
iperf_4G_FDD_1p4_MIMO2x2_banda1_centro_anecoica_3_huawei.txt	25/04/2022 12:59	Documento de texto	228 KB
iperf_4G_FDD_1p4_MIMO2x2_banda1_centro_rever_1_huawei.txt	25/04/2022 12:59	Documento de texto	228 KB
iperf_4G_FDD_1p4_MIMO2x2_banda1_centro_rever_2_huawei.txt	25/04/2022 12:59	Documento de texto	228 KB
iperf_4G_FDD_1p4_MIMO2x2_banda1_centro_rever_3_huawei.txt	25/04/2022 12:59	Documento de texto	228 KB
iperf_4G_FDD_1p4_MIMO2x2_banda3_centro_anecoica_1_huawei.txt	25/04/2022 12:59	Documento de texto	228 KB
iperf_4G_FDD_1p4_MIMO2x2_banda3_centro_anecoica_2_huawei.txt	25/04/2022 12:59	Documento de texto	228 KB
iperf_4G_FDD_1p4_MIMO2x2_banda3_centro_anecoica_3_huawei.txt	25/04/2022 12:59	Documento de texto	228 KB
iperf_4G_FDD_1p4_MIMO2x2_banda3_centro_rever_1_huawei.txt	25/04/2022 12:59	Documento de texto	228 KB
iperf_4G_FDD_1p4_MIMO2x2_banda3_centro_rever_2_huawei.txt	25/04/2022 12:59	Documento de texto	228 KB
iperf_4G_FDD_1p4_MIMO2x2_banda3_centro_rever_3_huawei.txt	25/04/2022 12:59	Documento de texto	228 KB
iperf_4G_FDD_1p4_MIMO2x2_banda5_centro_anecoica_1_huawei.txt	25/04/2022 12:59	Documento de texto	228 KB
iperf_4G_FDD_1p4_MIMO2x2_banda5_centro_anecoica_2_huawei.txt	25/04/2022 12:59	Documento de texto	228 KB
iperf_4G_FDD_1p4_MIMO2x2_banda5_centro_anecoica_3_huawei.txt	25/04/2022 12:59	Documento de texto	228 KB
iperf_4G_FDD_1p4_MIMO2x2_banda5_centro_rever_1_huawei.txt	25/04/2022 12:59	Documento de texto	228 KB
iperf_4G_FDD_1p4_MIMO2x2_banda5_centro_rever_2_huawei.txt	25/04/2022 12:59	Documento de texto	228 KB
iperf_4G_FDD_1p4_MIMO2x2_banda5_centro_rever_3_huawei.txt	25/04/2022 12:59	Documento de texto	228 KB
iperf_4G_FDD_1p4_MIMO2x2_banda7_centro_anecoica_1_huawei.txt	25/04/2022 12:59	Documento de texto	228 KB
iperf_4G_FDD_1p4_MIMO2x2_banda7_centro_anecoica_2_huawei.txt	25/04/2022 12:59	Documento de texto	228 KB
iperf_4G_FDD_1p4_MIMO2x2_banda7_centro_anecoica_3_huawei.txt	25/04/2022 12:59	Documento de texto	228 KB
iperf_4G_FDD_1p4_MIMO2x2_banda7_centro_rever_1_huawei.txt	25/04/2022 12:59	Documento de texto	228 KB
iperf_4G_FDD_1p4_MIMO2x2_banda7_centro_rever_2_huawei.txt	25/04/2022 12:59	Documento de texto	228 KB
iperf_4G_FDD_1p4_MIMO2x2_banda7_centro_rever_3_huawei.txt	25/04/2022 12:59	Documento de texto	228 KB
iperf_4G_FDD_1p4_MIMO2x2_banda20_centro_anecoica_1_huawei.txt	25/04/2022 12:59	Documento de texto	228 KB
iperf_4G_FDD_1p4_MIMO2x2_banda20_centro_anecoica_2_huawei.txt	25/04/2022 12:59	Documento de texto	228 KB
iperf_4G_FDD_1p4_MIMO2x2_banda20_centro_anecoica_3_huawei.txt	25/04/2022 12:59	Documento de texto	228 KB
iperf_4G_FDD_1p4_MIMO2x2_banda20_centro_rever_1_huawei.txt	25/04/2022 12:59	Documento de texto	228 KB
iperf_4G_FDD_1p4_MIMO2x2_banda20_centro_rever_2_huawei.txt	25/04/2022 12:59	Documento de texto	228 KB
iperf_4G_FDD_1p4_MIMO2x2_banda20_centro_rever_3_huawei.txt	25/04/2022 12:59	Documento de texto	228 KB
iperf_4G_FDD_1p4_SISO_banda1_centro_anecoica_1_huawei.txt	25/04/2022 12:59	Documento de texto	217 KB
iperf_4G_FDD_1p4_SISO_banda1_centro_anecoica_2_huawei.txt	25/04/2022 12:59	Documento de texto	228 KB
iperf_4G_FDD_1p4_SISO_banda1_centro_anecoica_3_huawei.txt	25/04/2022 12:59	Documento de texto	228 KB

Figura 6.13: Ficheros en bruto de la experimentación

Capítulo 7

Análisis de Resultados

En este capítulo se presentan el análisis de las mediciones de rendimiento que se han realizado en la experimentación. Este análisis parte del parseo de los datos brutos para la creación de un *dataset* apropiado para el análisis. Finalmente, se muestra el análisis de los datos mediante técnicas de *Exploratory Data Analysis*, ANOVA y *Feature Importance*. Además, se incluyen una sección comparando características mediante regresión lineal.

7.1. Construcción del dataset

Obviamente, el primer paso tras determinar los parámetros de medida del rendimiento y tener la experimentación realizada debemos de generar nuestros *dataset* de forma que sea simple poder analizarlos. En este proyecto, debido a trabajar con python para el análisis se ha optado por parsear los datos brutos como los que se marcan en la figura 7.1 en archivos csv que son sencillos de cargar en objetos *dataframe* y permiten una sencilla gestión con la librería *Pandas*.

[4]	7.00-8.00	sec	1.73 MBytes	14.5 Mbits/sec	12	154 KBytes	---	192.168.2.2 ping statistics ---	15	packets transmitted, 15 received, 0% packet loss, time 14014ms		
[6]	7.00-8.00	sec	695 KBytes	5.70 Mbits/sec	2	52.7 KBytes	rtt min/avg/max/mdev = 19.062/29.660/37.964/6.429 ms	PING 192.168.2.2 (192.168.2.2) 56(84) bytes of data.	64	bytes from 192.168.2.2: icmp_seq=1 ttl=64 time=25.4 ms		
[8]	7.00-8.00	sec	1.91 MBytes	16.1 Mbits/sec	0	176 KBytes	64 bytes from 192.168.2.2: icmp_seq=2 ttl=64 time=24.9 ms	64	bytes from 192.168.2.2: icmp_seq=3 ttl=64 time=24.1 ms	64	bytes from 192.168.2.2: icmp_seq=4 ttl=64 time=23.8 ms	
[10]	7.00-8.00	sec	2.10 MBytes	17.6 Mbits/sec	2	159 KBytes	64 bytes from 192.168.2.2: icmp_seq=5 ttl=64 time=22.3 ms	64	bytes from 192.168.2.2: icmp_seq=6 ttl=64 time=22.9 ms	64	bytes from 192.168.2.2: icmp_seq=7 ttl=64 time=20.0 ms	
[12]	7.00-8.00	sec	1.48 MBytes	12.4 Mbits/sec	22	147 KBytes	64 bytes from 192.168.2.2: icmp_seq=8 ttl=64 time=18.8 ms	64	bytes from 192.168.2.2: icmp_seq=9 ttl=64 time=37.9 ms	64	bytes from 192.168.2.2: icmp_seq=10 ttl=64 time=36.9 ms	
[14]	7.00-8.00	sec	1.85 MBytes	15.5 Mbits/sec	5	166 KBytes	64 bytes from 192.168.2.2: icmp_seq=11 ttl=64 time=37.4 ms	64	bytes from 192.168.2.2: icmp_seq=12 ttl=64 time=36.9 ms	64	bytes from 192.168.2.2: icmp_seq=13 ttl=64 time=36.9 ms	
[16]	7.00-8.00	sec	1611 KBytes	8.29 Mbits/sec	0	88.2 KBytes	64 bytes from 192.168.2.2: icmp_seq=14 ttl=64 time=35.0 ms	64	bytes from 192.168.2.2: icmp_seq=15 ttl=64 time=33.9 ms	---	192.168.2.2 ping statistics ---	
[18]	7.00-8.00	sec	821 KBytes	6.73 Mbits/sec	0	71.1 KBytes	15	packets transmitted, 15 received, 0% packet loss, time 14011ms	rtt min/avg/max/mdev = 19.983/29.135/37.981/7.123 ms	PING 192.168.2.2 (192.168.2.2) 56(84) bytes of data.	64	bytes from 192.168.2.2: icmp_seq=1 ttl=64 time=21.4 ms
[20]	7.00-8.00	sec	1.54 MBytes	12.9 Mbits/sec	10	141 KBytes	64	bytes from 192.168.2.2: icmp_seq=2 ttl=64 time=19.9 ms	---	192.168.2.2 ping statistics ---		
[22]	7.00-8.00	sec	1.79 MBytes	15.0 Mbits/sec	32	166 KBytes	---	192.168.2.2 ping statistics ---	15	packets transmitted, 15 received, 0% packet loss, time 14011ms		
[SUM]	7.00-8.00	sec	14.9 MBytes	125 Mbits/sec	85							
[4]	8.00-9.00	sec	1.73 MBytes	14.5 Mbits/sec	25	159 KBytes						
[6]	8.00-9.00	sec	632 KBytes	5.18 Mbits/sec	6	59.2 KBytes						
[8]	8.00-9.00	sec	1.85 MBytes	15.5 Mbits/sec	31	143 KBytes						
[10]	8.00-9.00	sec	1.60 MBytes	13.5 Mbits/sec	26	122 KBytes						
[12]	8.00-9.00	sec	1.60 MBytes	13.5 Mbits/sec	16	150 KBytes						
[14]	8.00-9.00	sec	1.79 MBytes	15.0 Mbits/sec	10	171 KBytes						
[16]	8.00-9.00	sec	1.05 MBytes	8.80 Mbits/sec	0	94.8 KBytes						
[18]	8.00-9.00	sec	885 KBytes	7.25 Mbits/sec	0	80.3 KBytes						
[20]	8.00-9.00	sec	1.67 MBytes	14.0 Mbits/sec	7	147 KBytes						
[22]	8.00-9.00	sec	1.79 MBytes	15.0 Mbits/sec	17	171 KBytes						
[SUM]	8.00-9.00	sec	14.6 MBytes	122 Mbits/sec	138							

Figura 7.1: Datos en bruto de las pruebas Iperf y Ping

La forma más sencilla de realizar esta tarea es empleando la aplicación

Perfyzer que se encarga del proceso de parseo y generar los archivos csv como se muestra en la figura 7.2

Parser

Type of file:

Dataset:

Report

```
[R] Running parser All docs ...
[I] It is parsed 990 documents.
[I] The new dataset is: ['rtt_parsed.csv', 'iperf_parsed.csv', 'comp_parsed.csv'].
[I] The parser has finished
```

Tecnologia, FDD, BW, MIMO, Banda, Posicion, Camara, Polarizacion, Disp, Interv, Transf, Throughput, PcktRetr

```
4G, FDD, 10, MIMO, 1, centro, anecoica, 1, huawei, 0.00-1.00, 24.1, 202, 1248
4G, FDD, 10, MIMO, 1, centro, anecoica, 1, huawei, 1.00-2.00, 11.1, 93.3, 141
4G, FDD, 10, MIMO, 1, centro, anecoica, 1, huawei, 2.00-3.00, 10.8, 90.2, 24
4G, FDD, 10, MIMO, 1, centro, anecoica, 1, huawei, 3.00-4.00, 10.6, 89.1, 12
4G, FDD, 10, MIMO, 1, centro, anecoica, 1, huawei, 4.00-5.00, 11.1, 92.8, 29
4G, FDD, 10, MIMO, 1, centro, anecoica, 1, huawei, 5.00-6.00, 10.8, 90.2, 32
4G, FDD, 10, MIMO, 1, centro, anecoica, 1, huawei, 6.00-7.00, 11.1, 92.7, 12
4G, FDD, 10, MIMO, 1, centro, anecoica, 1, huawei, 7.00-8.00, 10.7, 89.6, 17
4G, FDD, 10, MIMO, 1, centro, anecoica, 1, huawei, 8.00-9.00, 10.9, 91.3, 33
4G, FDD, 10, MIMO, 1, centro, anecoica, 1, huawei, 9.00-10.00, 10.6, 89.1, 1
4G, FDD, 10, MIMO, 1, centro, anecoica, 1, huawei, 0.00-10.00, 122, 102, 1549
4G, FDD, 10, MIMO, 1, centro, anecoica, 1, huawei, 0.00-1.00, 24.8, 208, 1203
4G, FDD, 10, MIMO, 1, centro, anecoica, 1, huawei, 1.00-2.00, 11.2, 93.8, 77
4G, FDD, 10, MIMO, 1, centro, anecoica, 1, huawei, 2.00-3.00, 10.8, 90.2, 51
4G, FDD, 10, MIMO, 1, centro, anecoica, 1, huawei, 3.00-4.00, 10.8, 90.6, 8
4G, FDD, 10, MIMO, 1, centro, anecoica, 1, huawei, 4.00-5.00, 10.8, 90.3, 0
4G, FDD, 10, MIMO, 1, centro, anecoica, 1, huawei, 5.00-6.00, 10.8, 90.2, 24
4G, FDD, 10, MIMO, 1, centro, anecoica, 1, huawei, 6.00-7.00, 10.8, 90.1, 10
4G, FDD, 10, MIMO, 1, centro, anecoica, 1, huawei, 7.00-8.00, 10.8, 90.2, 8
4G, FDD, 10, MIMO, 1, centro, anecoica, 1, huawei, 8.00-9.00, 10.8, 90.7, 25
```

Tecnologia, FDD, BW, MIMO, Banda, Posicion, Camara, Polarizacion, Disp, Ptx, Prx, P1, Time, RTTmin, RTTavg, RTTmax, RTTmed

```
4G, FDD, 10, MIMO, 1, centro, anecoica, 1, huawei, 15, 14, 6, 14044, 24.979, 30.097, 36.568, 3.516
4G, FDD, 10, MIMO, 1, centro, anecoica, 1, huawei, 15, 15, 0, 14015, 15.982, 25.526, 36.992, 6.135
4G, FDD, 10, MIMO, 1, centro, anecoica, 1, huawei, 15, 15, 0, 14012, 17.946, 23.296, 36.756, 4.944
4G, FDD, 10, MIMO, 1, centro, anecoica, 1, huawei, 15, 15, 0, 14014, 15.975, 23.839, 37.017, 5.064
4G, FDD, 10, MIMO, 1, centro, anecoica, 1, huawei, 15, 13, 13, 14045, 18.023, 24.679, 37.045, 4.872
4G, FDD, 10, MIMO, 1, centro, anecoica, 1, huawei, 15, 15, 0, 14015, 15.937, 26.622, 43.022, 8.003
4G, FDD, 10, MIMO, 1, centro, anecoica, 1, huawei, 15, 15, 0, 14011, 16.072, 31.972, 37.990, 5.354
4G, FDD, 10, MIMO, 1, centro, anecoica, 1, huawei, 15, 15, 0, 14015, 23.025, 30.123, 37.311, 4.308
4G, FDD, 10, MIMO, 1, centro, anecoica, 1, huawei, 15, 10, 33, 14122, 22.925, 26.230, 29.124, 2.269
4G, FDD, 10, MIMO, 1, centro, anecoica, 1, huawei, 15, 15, 0, 14013, 16.067, 24.652, 38.040, 5.961
4G, FDD, 10, MIMO, 1, centro, anecoica, 1, huawei, 15, 15, 0, 14016, 17.605, 28.284, 36.471, 5.212
4G, FDD, 10, MIMO, 1, centro, anecoica, 1, huawei, 15, 13, 13, 14017, 19.257, 24.059, 28.998, 3.063
4G, FDD, 10, MIMO, 1, centro, anecoica, 1, huawei, 15, 15, 0, 14014, 16.041, 29.553, 37.888, 5.234
4G, FDD, 10, MIMO, 1, centro, anecoica, 1, huawei, 15, 13, 13, 14036, 18.066, 24.980, 33.875, 4.146
4G, FDD, 10, MIMO, 1, centro, anecoica, 1, huawei, 15, 15, 0, 14012, 17.604, 24.812, 38.880, 4.979
4G, FDD, 10, MIMO, 1, centro, anecoica, 1, huawei, 15, 14, 6, 14038, 23.879, 28.847, 33.989, 3.429
4G, FDD, 10, MIMO, 1, centro, anecoica, 1, huawei, 15, 13, 13, 14048, 22.025, 27.333, 33.128, 3.645
4G, FDD, 10, MIMO, 1, centro, anecoica, 1, huawei, 15, 15, 0, 14015, 18.034, 26.917, 37.112, 6.444
4G, FDD, 10, MIMO, 1, centro, anecoica, 1, huawei, 15, 15, 0, 14015, 18.059, 29.244, 37.019, 6.237
4G, FDD, 10, MIMO, 1, centro, anecoica, 1, huawei, 15, 15, 0, 14015, 23.093, 30.253, 37.552, 4.348
```

Figura 7.2: Aplicación Perfyzer parseando y archivos csv

7.2. Análisis de los dataset

Esta sección se emplea para la comprensión de los datos del dataset y un análisis de los mismo de forma genérica. Para ello, primero se analizan mediante técnicas Exploratory Data Analysis (EDA), luego se emplean mecanismos de Feature Importance (FI) y se realizan test ANOVA sobre las características de las medidas objetivas que se consideran relevantes. Por último, se mostrarán una gráficas comparativas de las dos redes analizadas.

Nota: el informe del análisis se puede encontrar en Anexo B.

7.2.1. Exploratory Data Analysis (EDA)

Al parsear los datos se generaron dos dataset (iperf_parsed.csv y rtt_parsed.csv). Ambos dataset comparten las mismas características. En primera instancia lo que pretendemos es entender un poco estos dataset y cómo se constituyen. Por este motivo, comprobamos el número de subcategorías o valores únicos que tiene cada variable, así como el número de valores *Null* o *NaN*. Esta información se muestra resumida en la tabla 7.1 y vemos que no existirá inconsistencia en los datos.

Parámetro	Subcategorías	<i>Null+NaN</i>
Tecnología	2	0
Multiplexación (FDD)	2	0
Bandwidth (BW)	5	0
MIMO	2	0
Banda	7	0
Posición	3	0
Cámara	2	0
Polarización	3	0
Transf	1720	0
Throughput	1229	0
PcktRetr	2075	0
PI	9	0
RTTmin	3928	0
RTTavg	6636	0
RTTmax	4359	0

Tabla 7.1: Descripción inicial de los dataset

El siguiente paso es comprobar si las características son independientes unas de otras. Esto se puede comprobar mediante una matriz de correlación como la que se muestra en la figura 7.3.

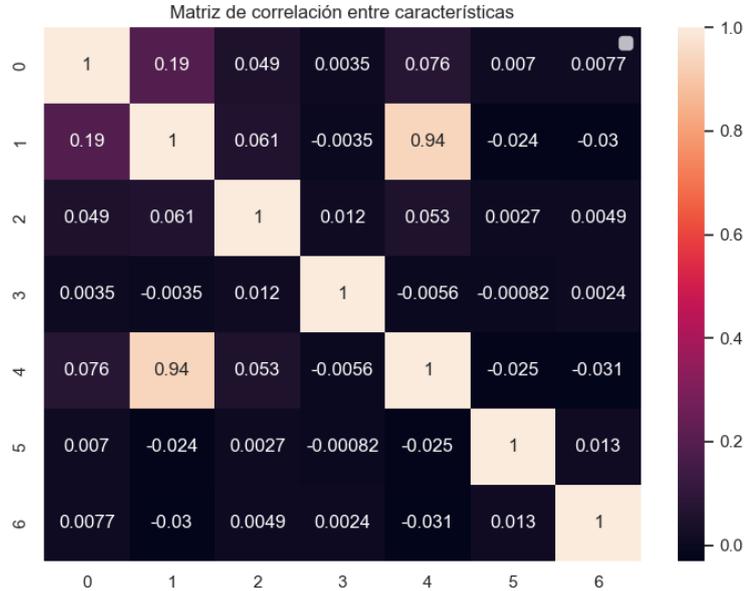


Figura 7.3: Matriz de correlación entre características

En esta matriz vemos como las únicas variables que tiene una alta correlación entre ellas corresponden con la multiplexación y las bandas. Este resultado es normal debido a que las bandas 1/3/5/7/20 emplean multiplexación FDD y las bandas 38/41 emplean multiplexación TDD. Respecto al resto de combinaciones podemos afirmar que las características no dependen unas de otras.

Análisis dataset Iperf

Ahora nos centramos en el *dataset* correspondiente a las pruebas *iperf*, filtramos los objetivos a *Transf*, *Throughput* y *PcktRetr*; y se realiza un análisis de resultados de una regresión empleando el modelo Ordinary Least Squares (OLS) como se puede apreciar en las figuras 7.4 7.5 7.7.

Observando la figura 7.4, podemos entender un poco mejor el comportamiento de las características frente a la cantidad de datos transferidos. Si nos fijamos podemos ver que se trabaja con un total de 80634 observaciones; el valor *R-squared* – que representa el porcentaje de variación de la variable dependiente con las variables independientes – se encuentra próximo a **0** lo que indica que nuestros valores de datos de transferencia no se ajustan adecuadamente a la regresión; los parámetros Akaike’s Information Criteria (AIC) y Bayesian Information Criteria (BIC) – que determinan la máxima *log-likelihood* – son valores muy elevados, lo que significa que el modelo es muy preciso probabilísticamente hablando; la probabilidad Omnibus – que

determina si los errores se encuentran distribuidos normalmente – es **0** lo que nos indica que los errores en nuestro caso no están distribuidos normalmente; el parámetro *Durbin-Watson* – que indica si la varianza de los errores es constante – es próxima a **2** lo que significa que los resultados de la regresión son fiables; el parámetro *skew* – que determina la asimetría – debería ser próxima a **0** si nuestros datos son simétricos, aunque este caso no son simétricos; por último, el parámetro *kurtosis* –que determina si los datos tienen colas pesadas o ligeras respecto a una distribución normal – es un valor elevado lo que indica que para este análisis en concreto las colas son relevantes.

OLS Regression Results						
	coef	std err	t	P> t	[0.025	0.975]
Dep. Variable:	Transf			R-squared:	0.099	
Model:	OLS			Adj. R-squared:	0.099	
Method:	Least Squares			F-statistic:	1272.	
Date:	Thu, 07 Jul 2022			Prob (F-statistic):	0.00	
Time:	07:52:53			Log-Likelihood:	-3.7782e+05	
No. Observations:	80634			AIC:	7.557e+05	
Df Residuals:	80626			BIC:	7.557e+05	
Df Model:	7					
Covariance Type:	nonrobust					
const	15.5562	0.092	168.443	0.000	15.375	15.737
x1	0.6815	0.099	6.897	0.000	0.488	0.875
x2	-2.0732	0.296	-7.001	0.000	-2.654	-1.493
x3	7.5712	0.093	81.763	0.000	7.390	7.753
x4	3.8583	0.092	41.773	0.000	3.677	4.039
x5	-0.0044	0.292	-0.015	0.988	-0.576	0.567
x6	-0.3633	0.092	-3.932	0.000	-0.544	-0.182
x7	-0.3484	0.092	-3.770	0.000	-0.529	-0.167
Omnibus:	69366.877		Durbin-Watson:	1.999		
Prob(Omnibus):	0.000		Jarque-Bera (JB):	1659908.118		
Skew:	4.250		Prob(JB):	0.00		
Kurtosis:	23.538		Cond. No.	6.29		

Figura 7.4: Análisis OLS Regression para Transf

A continuación, comprobamos el análisis de la figura 7.5 que muestra la regresión OLS de los datos del *throughput*. Observando los mismos parámetros que en el análisis anterior, podemos determinar que nuestras observaciones se ajustan bastante bien a la regresión, el modelo empleado es muy preciso en términos probabilísticos, los errores no están distribuidos normalmente, los resultados de la regresión son fiables, las observaciones son simétricas debido al bajo valor del *skew* y las colas no son muy relevantes.

Además, debido a que se habla de la distribución de las observaciones, a modo de ejemplificación, se muestra unas gráficas, en la figura 7.6 de las PDFs de estas en función de las características. En estas podemos detectar cierta simetría y que los valores se encuentran muy concentrados en determinados valores de las características por lo que las colas se pueden obviar.

OLS Regression Results

```

=====
Dep. Variable:          Throughput    R-squared:                0.820
Model:                  OLS           Adj. R-squared:           0.820
Method:                 Least Squares  F-statistic:              5.238e+04
Date:                   Thu, 07 Jul 2022  Prob (F-statistic):       0.00
Time:                   07:52:59      Log-Likelihood:          -3.5186e+05
No. Observations:      80634        AIC:                     7.037e+05
Df Residuals:          80626        BIC:                     7.038e+05
Df Model:               7
Covariance Type:       nonrobust
=====

```

	coef	std err	t	P> t	[0.025	0.975]
const	71.6227	0.067	1070.018	0.000	71.491	71.754
x1	2.9932	0.072	41.797	0.000	2.853	3.134
x2	-9.4383	0.215	-43.978	0.000	-9.859	-9.018
x3	35.3308	0.067	526.425	0.000	35.199	35.462
x4	17.8188	0.067	266.178	0.000	17.688	17.950
x5	-0.0719	0.211	-0.340	0.734	-0.486	0.342
x6	-1.6951	0.067	-25.313	0.000	-1.826	-1.564
x7	-1.2362	0.067	-18.457	0.000	-1.367	-1.105

```

=====
Omnibus:                4174.295    Durbin-Watson:           2.002
Prob(Omnibus):          0.000    Jarque-Bera (JB):       16508.976
Skew:                   0.009    Prob(JB):                0.00
Kurtosis:               5.217    Cond. No.                6.29
=====

```

Figura 7.5: Análisis OLS Regression para Throughput

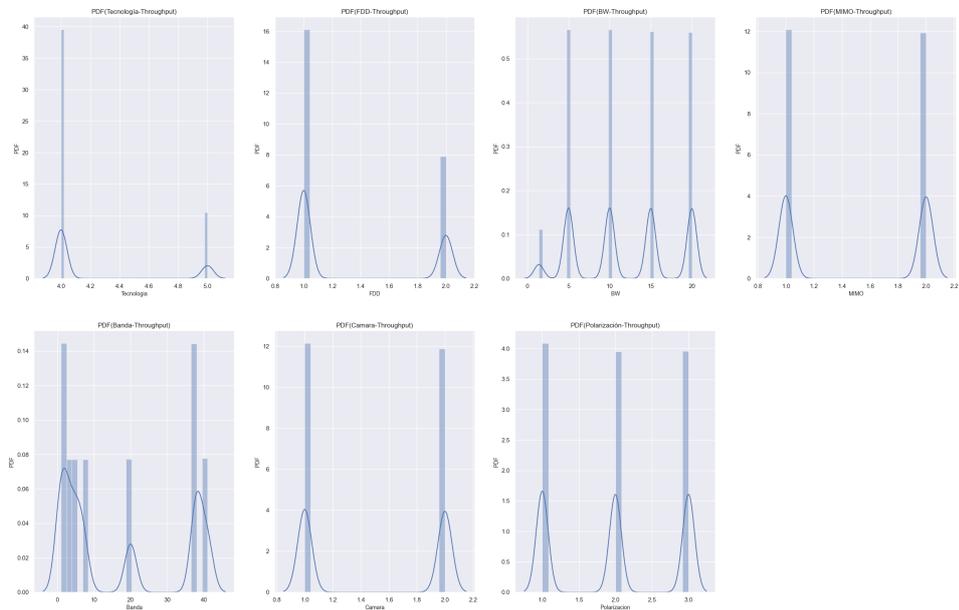


Figura 7.6: PDFs del Throughput

Por concluir con los análisis OLS en este dataset, comprobamos el comportamiento de las observaciones respecto de los paquetes retransmitidos. En este caso, las observaciones no se ajustan a la regresión, el modelo empleado es preciso en términos probabilísticos, los errores en este análisis no están distribuidos normalmente, los resultados obtenidos de la regresión son fiables, las observaciones no muestran un comportamiento simétrico y las cols son relevantes.

```

=====
                        OLS Regression Results
=====
Dep. Variable:          PcktRetr      R-squared:                0.023
Model:                  OLS           Adj. R-squared:           0.023
Method:                 Least Squares  F-statistic:              270.6
Date:                   Thu, 07 Jul 2022  Prob (F-statistic):       0.00
Time:                   07:53:05       Log-Likelihood:           -5.7597e+05
No. Observations:      80634          AIC:                      1.152e+06
Df Residuals:          80626          BIC:                      1.152e+06
Df Model:               7
Covariance Type:       nonrobust
=====
                        coef      std err          t      P>|t|      [0.025      0.975]
-----
const          177.5346      1.078      164.660      0.000      175.421      179.648
x1              6.3342      1.154       5.491      0.000         4.073         8.595
x2             -5.9167      3.457      -1.712      0.087     -12.692         0.859
x3             41.4857      1.081      38.375      0.000         39.367        43.605
x4             12.4208      1.078      11.519      0.000         10.307        14.534
x5             19.1210      3.406       5.615      0.000         12.446        25.796
x6              1.4277      1.079       1.324      0.186         -0.686         3.542
x7              1.7226      1.079       1.597      0.110         -0.392         3.837
=====
Omnibus:              56672.541      Durbin-Watson:           1.991
Prob(Omnibus):        0.000      Jarque-Bera (JB):        826701.103
Skew:                 3.314      Prob(JB):                0.00
Kurtosis:             17.217      Cond. No.                6.29
=====

```

Figura 7.7: Análisis OLS Regression para PcktRetr

Además, se ha realizado una representación de las CDFs donde es posible apreciar cambios respecto de las características para la transferencia de datos, como se muestra en la figura 7.8. En estas se puede destacar que FDD permite la transferencia de datos levemente superior a la proporcionada por TDD, lo que se ve claramente también en la gráficas de las bandas, observando las bandas claras que emplean FDD. Por otro lado, apreciamos que la tecnología MIMO también proporciona mayor transferencia de datos que si empleamos SISO. Por último, y como era de esperar, a mayor ancho de banda, más capacidad de transmisión de datos tendremos.

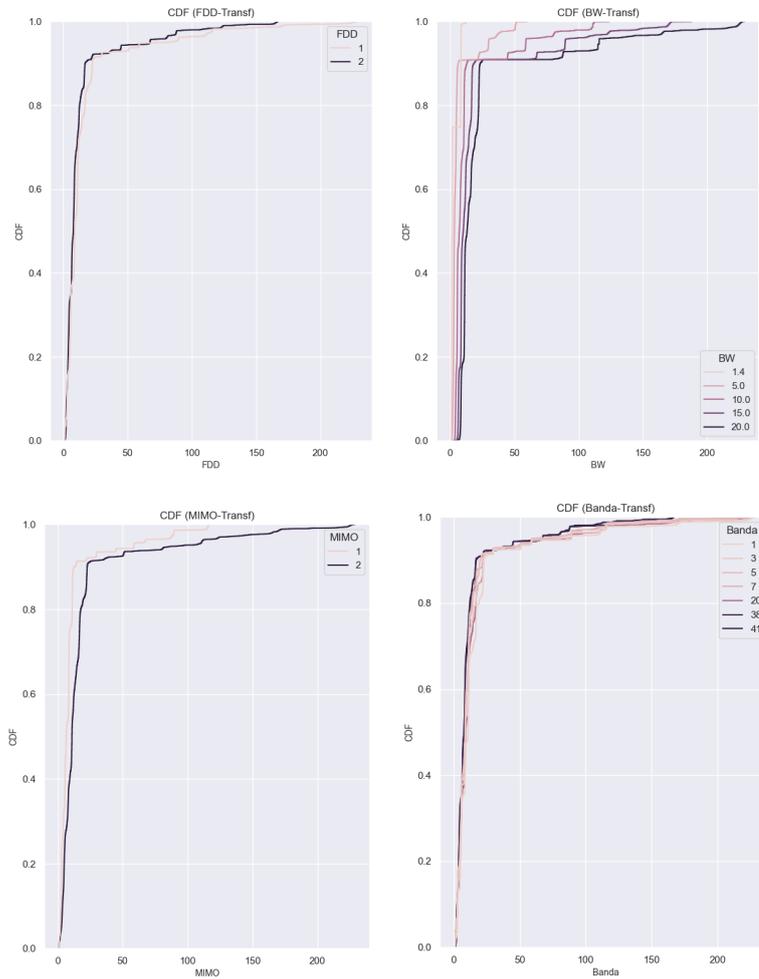


Figura 7.8: CDFs de transferencia de datos

A continuación, sobre la figura 7.9 se analiza el comportamiento visible mediante CDFs de las características para el parámetro *throughput*. Frente a estas gráficas, podemos confirmar que el *throughput* incrementa si se emplea tecnología 5G y, obviamente, con el ancho de banda. Pero eso no es todo, también muestra mejores prestaciones empleando multiplexación FDD, tecnologías MIMO 2x2. Y cabe destacar que mejora también sutilmente en las medidas tomadas sobre la zona anecóica de la cámara. Incluso, el rendimiento de este factor respecto a la polarización empleada es varía, siendo la segunda polarización (posición horizontal) la mejor entre las probadas, lo que puede deberse a la orientación de las antenas dentro del dispositivo.

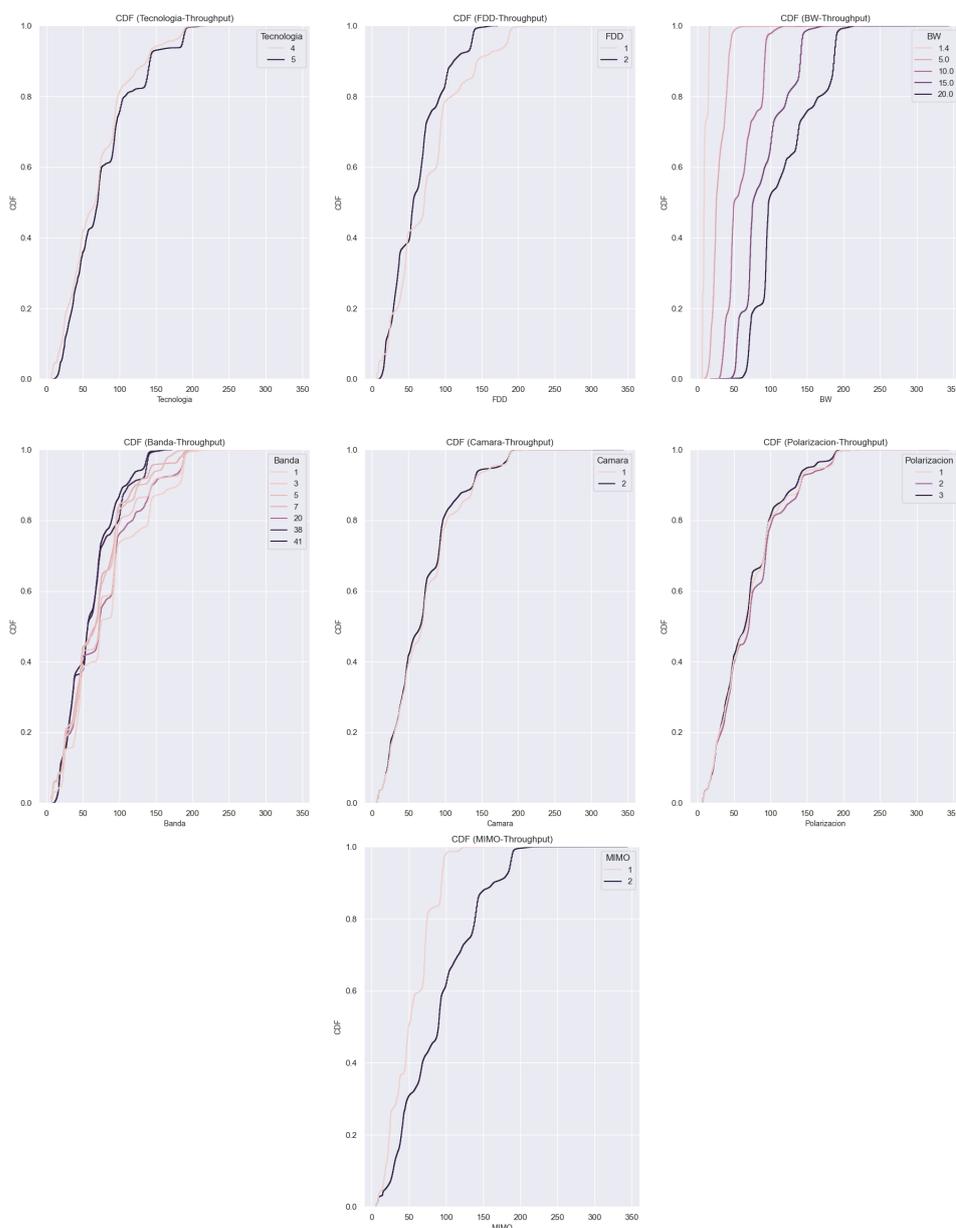


Figura 7.9: CDFs de Throughput

Por último, mostramos este análisis en relación a los paquetes retransmitidos durante las pruebas *iperf*. Respecto a la figura 7.10, solamente comentar que existe diferencia notoria a simple vista en las características de multiplexación, ancho de banda y tecnologías MIMO. Existe mayor probabilidad de retransmisión cuando encontramos trabajando con multiplexación TDD, tecnología MIMO 2x2 y cuanto mayor es el ancho de banda de la celda.

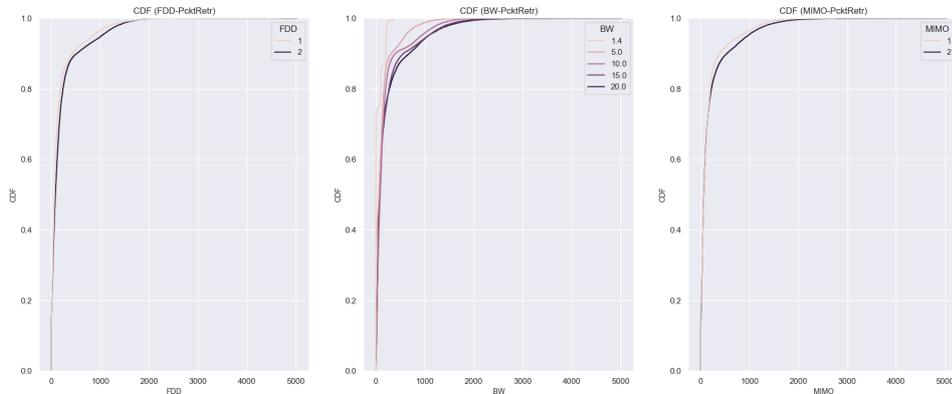


Figura 7.10: CDFs de paquetes retransmitidos

Análisis dataset RTT

En este momento, cambiamos de dataset y empleamos el relativo a las pruebas de latencia. En este caso, para reducir un poco el número de elementos a analizar, se ha decidido emplear únicamente los objetivos *Packet Loss* (Pl) y RTT. El método de análisis es idéntico al empleado para el dataset anterior, por tanto, se comienza realizando el análisis de resultados de una regresión OLS.

En la figura 7.11 se muestra los resultados de la regresión para el parámetro *packet loss*. Al tratar con este dataset, encontramos que trabajamos con un total de 7992 observaciones. En este análisis podemos aclarar que las observaciones no se ajustan adecuadamente a la regresión lineal, los errores no se encuentran normalmente distribuidos, los resultados obtenidos de la regresión son fiables, las observaciones no presentan simetría y los valores de cola son relevantes.

Por otro lado, realizamos este análisis en relación con la latencia, aunque consideramos la latencia como el tiempo de ida y vuelta de un paquete por la red. Observando la figura 7.12 vemos que las observaciones no se comporta de manera similar a la regresión lineal, los errores no siguen una distribución normal, pero los resultados obtenidos por la regresión son fiables. Además, las observaciones no son simétricas y las colas son pesadas.

```

=====
                        OLS Regression Results
=====
Dep. Variable:          P1      R-squared:                0.004
Model:                  OLS      Adj. R-squared:           0.003
Method:                 Least Squares      F-statistic:              4.755
Date:                   Thu, 07 Jul 2022    Prob (F-statistic):      2.40e-05
Time:                   08:46:31      Log-Likelihood:          -15352.
No. Observations:      7992      AIC:                     3.072e+04
Df Residuals:          7984      BIC:                     3.078e+04
Df Model:               7
Covariance Type:       nonrobust
=====
              coef      std err          t      P>|t|      [0.025      0.975]
-----
const          0.1204      0.018        6.510      0.000        0.084      0.157
x1             -0.0331      0.020       -1.671      0.095       -0.072      0.006
x2              0.0970      0.056        1.723      0.085       -0.013      0.207
x3             -0.0265      0.019       -1.413      0.158       -0.010      0.063
x4             -0.0046      0.018       -0.248      0.804       -0.041      0.032
x5             -0.1397      0.055       -2.530      0.011       -0.248     -0.031
x6             -0.0635      0.018       -3.435      0.001       -0.100     -0.027
x7             -0.0523      0.018       -2.829      0.005       -0.089     -0.016
=====
Omnibus:              18701.437      Durbin-Watson:           1.992
Prob(Omnibus):        0.000      Jarque-Bera (JB):       150495323.260
Skew:                 23.310      Prob(JB):                0.00
Kurtosis:             673.645      Cond. No.                6.00
=====

```

Figura 7.11: Análisis OLS Regression para P1

```

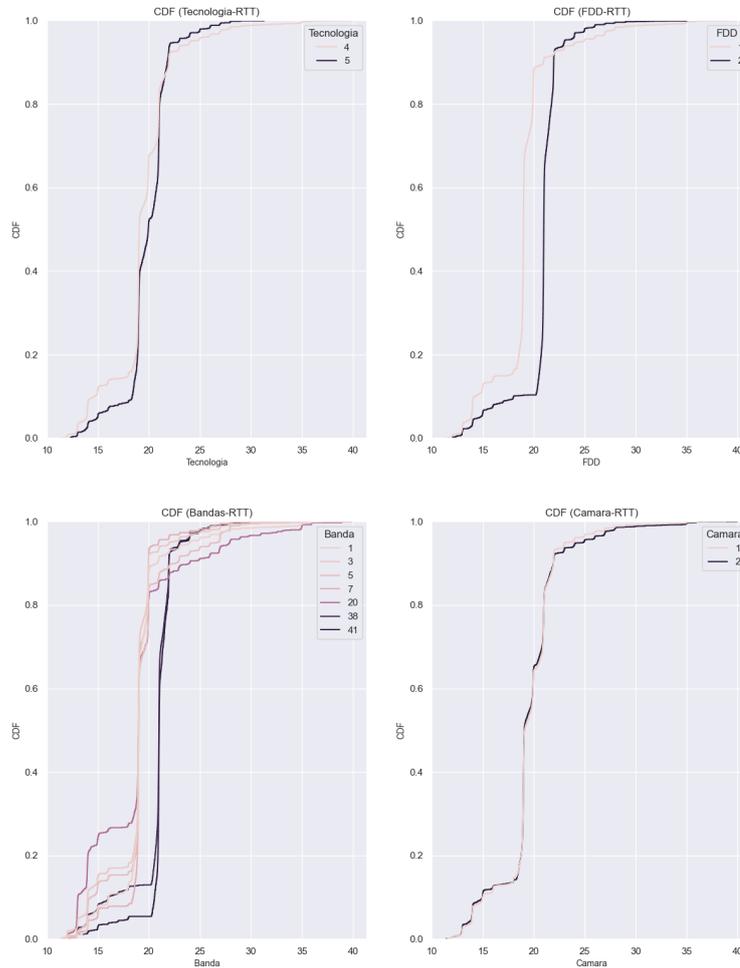
=====
                        OLS Regression Results
=====
Dep. Variable:          RTTmin      R-squared:                0.180
Model:                  OLS      Adj. R-squared:           0.180
Method:                 Least Squares      F-statistic:              250.9
Date:                   Thu, 07 Jul 2022    Prob (F-statistic):      0.00
Time:                   08:46:33      Log-Likelihood:          -19389.
No. Observations:      7992      AIC:                     3.879e+04
Df Residuals:          7984      BIC:                     3.885e+04
Df Model:               7
Covariance Type:       nonrobust
=====
              coef      std err          t      P>|t|      [0.025      0.975]
-----
const          19.5196      0.031      637.070      0.000      19.460      19.580
x1             -0.0916      0.033       -2.793      0.005       -0.156     -0.027
x2              0.8066      0.093        8.645      0.000        0.624      0.989
x3              0.9862      0.031      31.777      0.000        0.925      1.047
x4              0.1989      0.031        6.490      0.000        0.139      0.259
x5             -0.1222      0.091       -1.336      0.182       -0.302      0.057
x6              0.0471      0.031        1.537      0.124       -0.013      0.107
x7              0.0372      0.031        1.212      0.225       -0.023      0.097
=====
Omnibus:              3057.194      Durbin-Watson:           1.990
Prob(Omnibus):        0.000      Jarque-Bera (JB):       26154.198
Skew:                 1.598      Prob(JB):                0.00
Kurtosis:             11.266      Cond. No.                6.00
=====

```

Figura 7.12: Análisis OLS Regression para la latencia

Continuando con el mismo orden, procedemos a destacar mediante gráficas de CDF qué características muestran en general mejoras sobre estos parámetros objetivos.

A la hora de realizar el análisis mediante CDF, solamente nos quedaremos con el parámetro de salida RTT mínimo o latencia, dado que la CDF de la probabilidad de pérdida de paquetes no nos es útil debido a que la mayoría de las mediciones se concentran en 0 y no da cabida a una interpretación visual. En las gráficas mostradas en la figura 7.13 se puede ver cómo por norma general la red 4G necesita un mayor tiempo para el envío de información que la red 5G, así como que si empleamos la multiplexación TDD tiende a necesitar mayor tiempo para la transmisión. La latencia tiende a aumentar respecto del ancho de banda y cuando se emplea MIMO 2x2. Respecto a las polarizaciones, en este caso se ven afectadas, pero muy levemente.



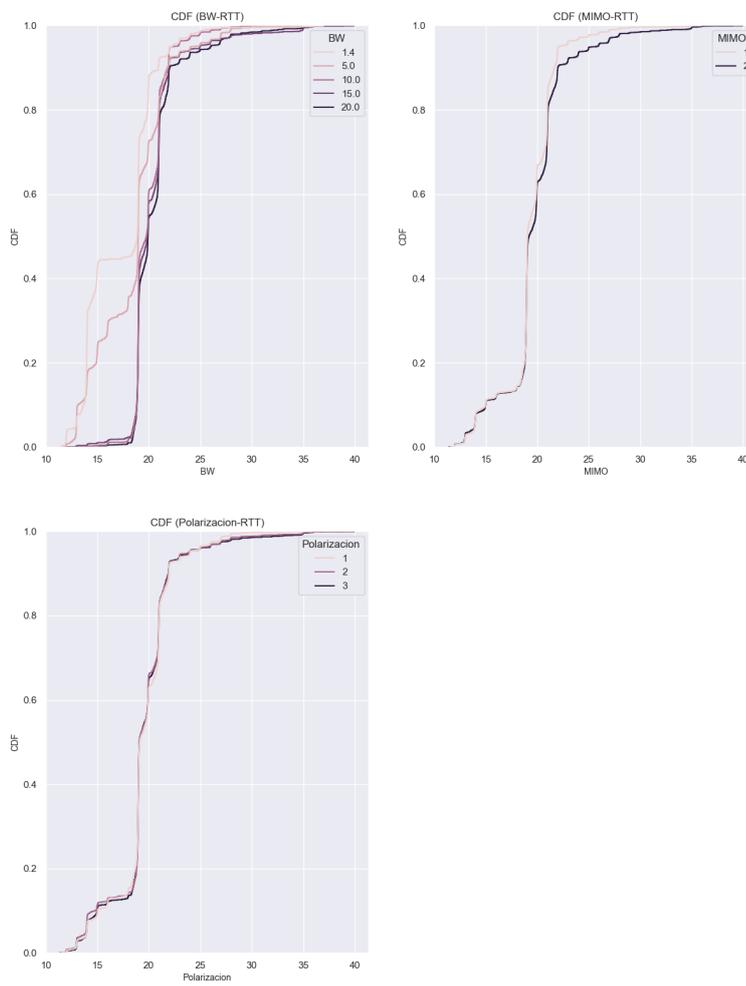


Figura 7.13: CDFs de latencia

7.2.2. Feature Importance (FI)

En este análisis se pretende comprender cómo afectan y cuáles son las principales características para cada parámetro de salida. Para ello, se emplea la pantalla Feature Importance de Perfyzer. Aunque en este se permiten tres tipos de análisis, solamente nos vamos a centrar en el algoritmo SHAP dado que es el más fiables y sencillo de interpretar de los implementados.

Al igual que hemos hecho hasta ahora, se comentarán los resultados obtenidos para cada uno de los parámetros de salida. En la figura 7.14 se muestran los resultados del orden de relevancia según SHAP de cada característica para un objetivo predefinido para el dataset iperf. La interpretación de las gráficas son intuitivas y nos permiten así reducir posteriormente el número de características a analizar, quedándonos solamente con dos o tres para cada uno de los parámetros objetivos.

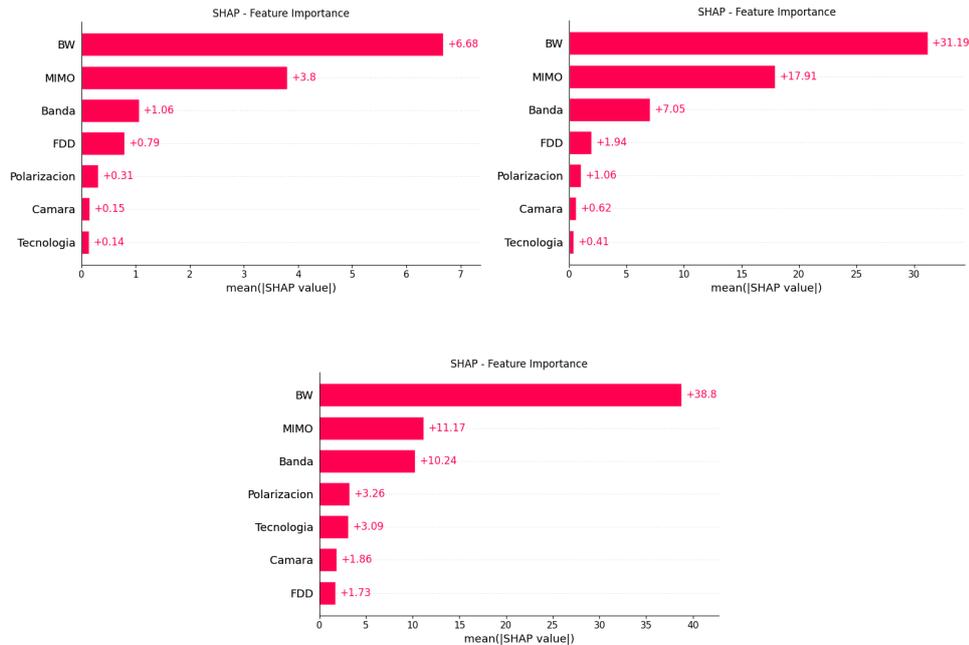


Figura 7.14: Importancia de características para el dataset Iperf (Trnsf, Throughput y PcktRetr) mediante SHAP

Fijándonos en general, es posible afirmar que las características más importantes para los tres objetivos son las características de ancho de banda (BW), tecnología MIMO y las bandas de frecuencia empleadas. Además, el orden de relevancia es idéntico en transferencia de datos y *throughput*, mientras que para los paquetes retransmitidos es más relevante el cambio de tecnología que el de multiplexación.

Si se realiza el mismo análisis sobre el dataset RTT considerando los parámetros *packet loss* y RTT mínimo, obtenemos las gráficas que se muestran en la figura 7.15. Respecto a la probabilidad de pérdidas de paquetes, se determina que las características más relevantes son la banda de frecuencia, la polarización de las antenas y la zona de la cámara donde se realizan los experimentos. Mientras, si miramos la latencia mínima, esta se ve fuertemente afectada por el ancho de banda de la celda, la banda de frecuencia y el uso o no de la tecnología MIMO.

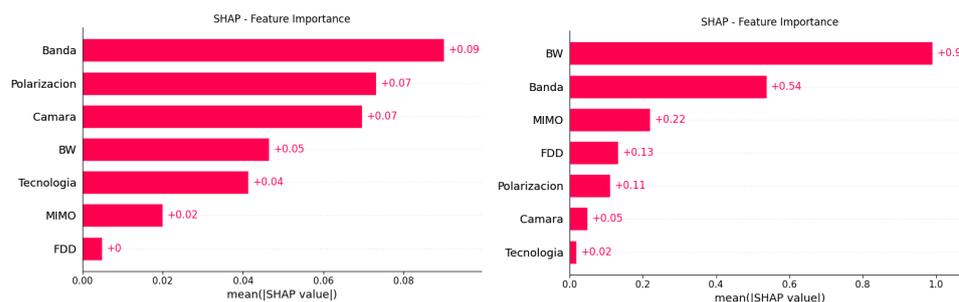


Figura 7.15: Importancia de características para el dataset RTT (P1, RTT-min) mediante SHAP

7.2.3. ANalysis Of VAriance (ANOVA)

Los test ANOVA nos van a permitir descubrir si las características mencionadas como más importantes en el apartado anterior y los objetivos se encuentran fuertemente relacionados o no, es decir, nos indica si las características son significativas. En este análisis solamente nos centraremos en los dos objetivos principales del rendimiento, es decir, en la velocidad de transmisión y en la latencia (RTT). Dado que Perfyzer solamente permite la comparación de dos a dos características para un único objetivo, se ha decidido realizar los análisis de los objetivos por separado.

ANOVA sobre el throughput

Respecto de las características, se han tomado los pares tecnología-[X]. Primero se muestra los resultados obtenidos en el análisis entre las características **Tecnología-FDD**. En ella, se comprueba si las características y la interacción entre ellas son significativas. Para ello, debemos fijarnos en el valor de la columna $\mathbf{PR}(> \mathbf{F})$ y se considera significativa si este parámetro se encuentra por debajo de 0.05. Entonces en este caso, ambas características y su interacción pueden considerarse significativas dentro del dataset. Sabiendo esto, también se puede comprobar cual de ellos es el más importante. En este caso podemos afirmar que el más relevante es la característica FDD debido a tener el mayor valor en la columna de \mathbf{F} .

	sum_sq	df	F	PR(>F)
C(Tecn)	1.783323e+06	1.0	921.977838	1.337501e-201
C(FDD)	5.531360e+06	1.0	2859.713204	0.000000e+00
C(Tecn):C(FDD)	4.734012e+05	1.0	244.748414	4.210468e-55
Residual	1.949497e+08	100789.0	NaN	NaN

Ahora se realiza este test sobre el par **Tecnología-BW** donde podemos comprobar que tanto la variable Tecnología como la interacción entre ambas características no son significativas. Mientras que el factor BW si es significativo.

	sum_sq	df	F	PR(>F)
C(Tecn)	-5.226411e-05	1.0	-6.809246e-08	1.000000
C(BW)	5.724384e+07	4.0	1.864508e+04	0.000000
C(Tecn):C(BW)	5.581361e+03	4.0	1.817924e+00	0.177564
Residual	7.735560e+07	100783.0	NaN	NaN

Esta vez se realiza el test empleando el par **Tecnología-MIMO** donde comprobamos que tanto características como interacción son significativas y el factor más relevante de entre ellos en este caso es la característica MIMO.

	sum_sq	df	F	PR(>F)
C(Tecn)	7.940243e+05	1.0	479.040602	6.108847e-106
C(MIMO)	3.326767e+07	1.0	20070.623905	0.000000e+00
C(Tecn):C(MIMO)	6.259770e+05	1.0	377.656474	5.744554e-84
Residual	1.670608e+08	100789.0	NaN	NaN

ANOVA sobre la latencia

A partir de este momento comenzamos a realizar los test de ANOVA sobre el objetivo de latencia o RTT. Primero, comenzamos con el par **Tecnología-BW** donde el único factor significativo es el ancho de banda.

	sum_sq	df	F	PR(>F)
C(Tecn)	-4.016050e-10	1.0	-5.071118e-11	1.000000e+00
C(BW)	5.789798e+03	4.0	1.827713e+02	2.115067e-151
C(Tecn):C(BW)	3.022176e+00	4.0	9.540353e-02	7.574234e-01
Residual	7.904409e+04	9981.0	NaN	NaN

El siguiente test se realiza con el par **Tecnología-MIMO** que nos indica que únicamente el factor de ancho de banda es significativo en este análisis.

	sum_sq	df	F	PR(>F)
C(Tecn)	-4.016050e-10	1.0	-5.071118e-11	1.000000e+00
C(BW)	5.789798e+03	4.0	1.827713e+02	2.115067e-151
C(Tecn):C(BW)	3.022176e+00	4.0	9.540353e-02	7.574234e-01
Residual	7.904409e+04	9981.0	NaN	NaN

7.2.4. Comparativa de las tecnologías

Al analizar empleando Perfyzer es sencillo graficar comparativas dada una característica fija en términos de la media de las subcategorías. Empleando estas gráficas se pretende comparar las tecnologías de una manera diferente a la vista hasta ahora. Obviamente, para no saturar más la memoria con gráfica de todas las posibles combinaciones se ha decidido graficar de forma que podemos comparar correctamente entre 4G y 5G. Además, solamente se tienen en cuenta los dos objetivos principales que son el *throughput* y *RTT* mínimo.

Comparativa en función del throughput

Partimos de la premisa de que todas las gráficas van a mostrar la tecnología frente al *throughput*. En primer lugar, se muestra la comparativa al emplear diferentes tipos de multiplexación (FDD (1) / TDD (2)) como se muestra en la figura 7.16. De esta representación sacamos en claro que el *throughput* incrementa al emplear la tecnología 5G, además de que las prestaciones son mejores cuando se utiliza una multiplexación FDD. También se puede destacar que el incremento en FDD es más pronunciado que en multiplexación TDD.

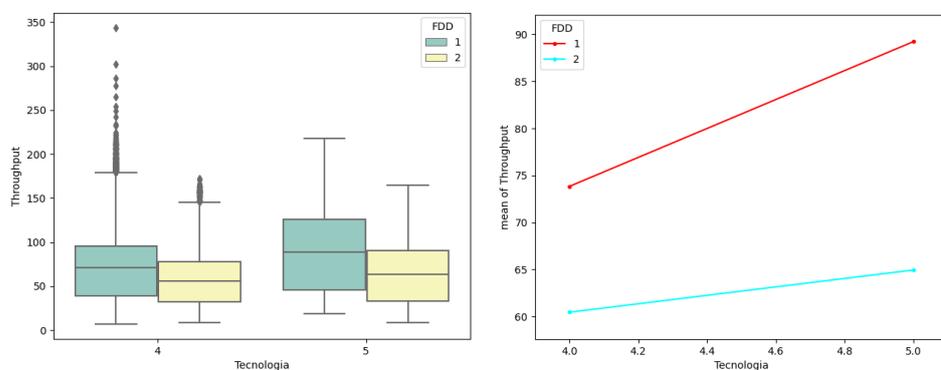


Figura 7.16: Comparación Throughput-Tecnología en función de la multiplexación

La siguiente característica que pretendemos emplear a continuación es el ancho de banda. En este caso es de esperar que el *throughput* se incremente conforme aumenta esta característica. En la figura 7.17, aparte de comprobar este aumento de la velocidad de transmisión, podemos ver que el pico máximo del *throughput* se encuentra entorno a los 340 Mbps.

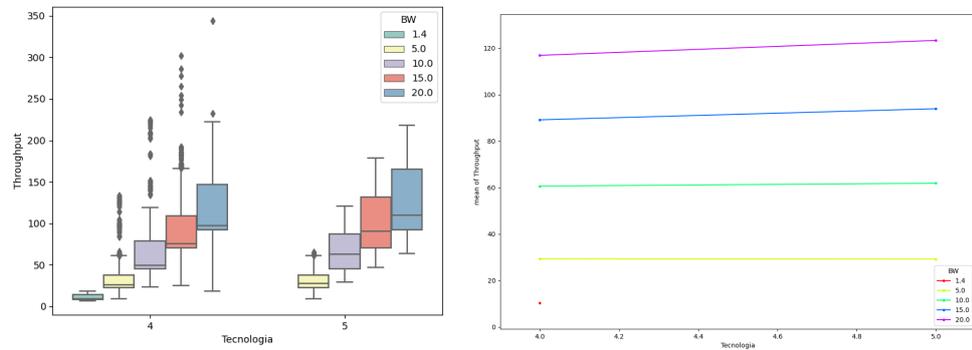


Figura 7.17: Comparación Throughput-Tecnología en función del ancho de banda

Ahora tratamos de entender el comportamiento en función del número de antenas empleadas en la comunicación. Es fácilmente entendible que si empleamos el doble de antenas, la velocidad de transmisión sea próxima al doble de la anterior como se representa en la figure 7.18. Si llama la atención que cuando empleamos tecnología SISO no existe diferencia significativa entre usarlo en redes 4G o hacerlo en redes 5G, como si ocurre cuando empleamos tecnología MIMO.

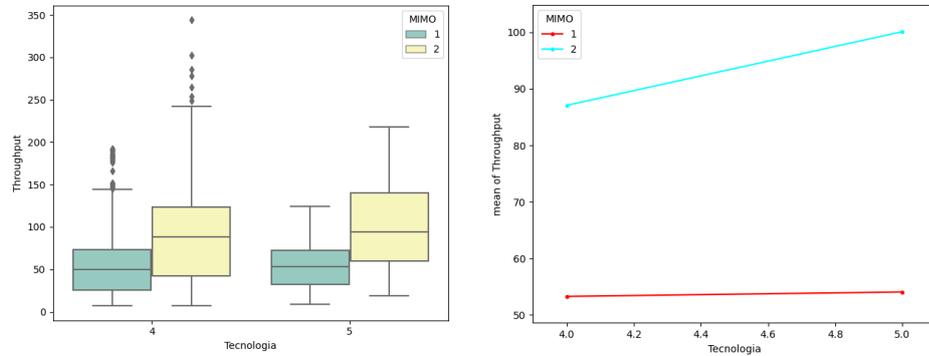


Figura 7.18: Comparación Throughput-Tecnología en función del número de antenas

El objetivo del siguiente análisis es observar el comportamiento de nuestra estación base en entornos de visión directa (zona anecóica) o con múltiples reflexiones (zona reverberante). Para esto se emplean las zonas de la cámara semi-anecóica. En la figura 7.19 presenciamos un comportamiento normal donde se entiende que las prestaciones respecto a la velocidad de transmisión son mejores cuando nos encontramos en la zona anecóica, aunque el cambio es más notable cuando nos centramos solamente en las redes 4G.

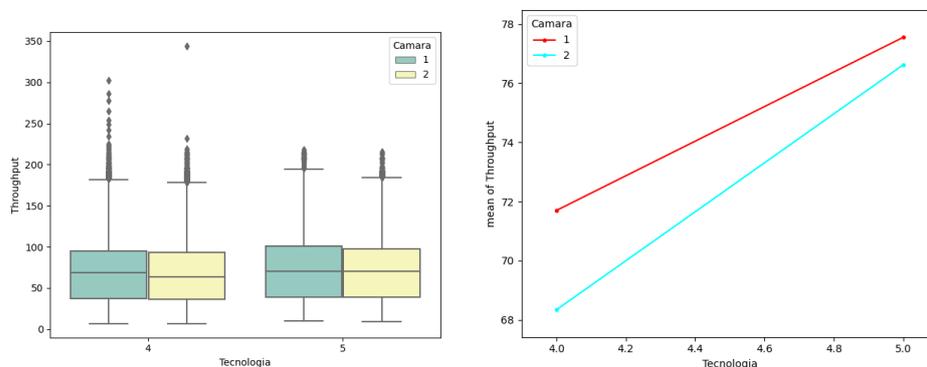


Figura 7.19: Comparación Throughput-Tecnología en función de la zona de la cámara semi-aneecóica

Hasta ahora, hemos tenido oportunidad de hablar de casi todas las características, pero una que no destacaba en ningún análisis previo es la orientación de las antenas y consigo la polarización de las ondas emitidas. En la figura 7.20 podemos comprobar que las diferencias son relativamente pequeñas, pero aún así son apreciables. En general el que mejores prestaciones presenta es la polarización 2 (orientación horizontal) y la polarización 1 (orientación vertical) muestra un comportamiento similar en el cambio de tecnología. Si podemos notar que la polarización 3 (orientación recta) presenta las peores medidas de *throughput* en redes 4G, pero las prestaciones cuando se trata de redes 5G son aceptables.

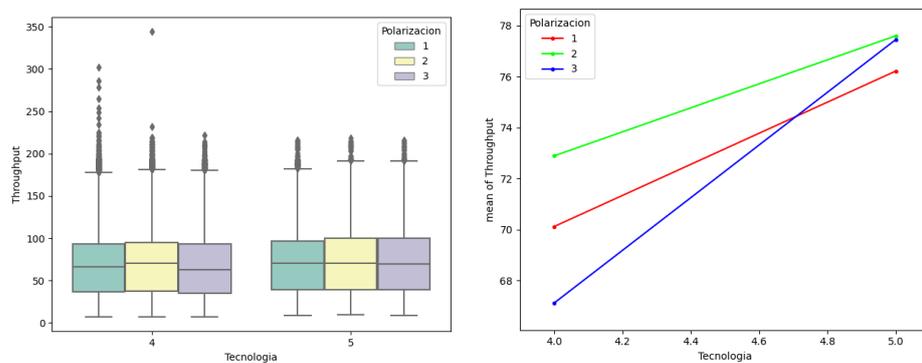


Figura 7.20: Comparación Throughput-Tecnología en función de la orientación de las antenas

Comparativa en función de la latencia mínima

La comparativa empleando el dataset RTT se procede a realizar de la misma forma que hicimos hasta ahora, si destacar que solamente se emplearán las gráficas lineales dado que las medidas de latencias son muy concentradas y, por tanto, la media es suficiente para entender el comportamiento. Además, de que las representaciones en cajas mostrarían demasiados *outliers* que entorpecen la interpretación.

El orden a seguir será el mismo que se ha empleado hasta este punto, comenzando así con la interpretación en función del tipo de multiplexación. Visualizando la figura 7.21 vemos que obviamente al emplear TDD el tiempo es superior al necesitado en FDD. Pero en esta última multiplexación se observa un comportamiento anómalo. La latencia media es menor cuando se emplea las redes 4G. Esto puede deberse a la falta de optimización por parte de la estación base para redes 5G.

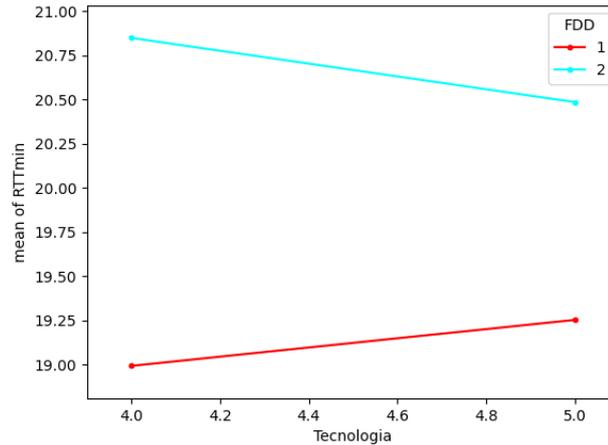


Figura 7.21: Comparación RTT-Tecnología en función de la multiplexación

Siguiendo con el análisis, se procede a chequear el comportamiento en función del aumento del ancho de banda de la celda. Como podemos apreciar excepto la banda de 5 MHz, todas tienden a congregarse entorno a los 20.25 ms cuando se trata de redes 5G. Si es común que las bandas con menos ancho de banda proporcionen menos *throughput* como ocurre en las redes 4G.

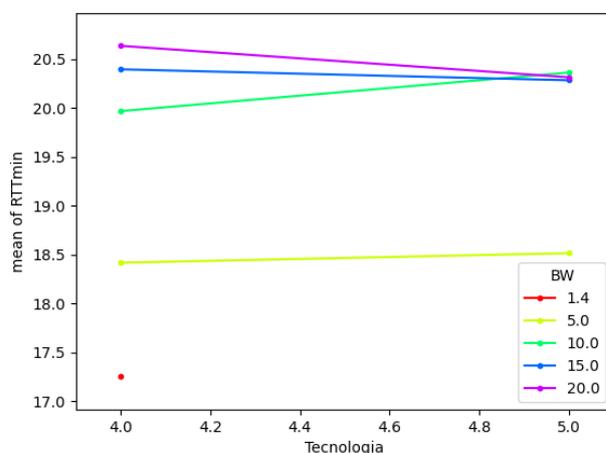


Figura 7.22: Comparación RTT-Tecnología en función del ancho de banda

En función del número de antenas, también se modifica la capacidad de envío de datos y esto supone que se aumentará el tiempo de transmisión como se ve claramente en la figura 7.23

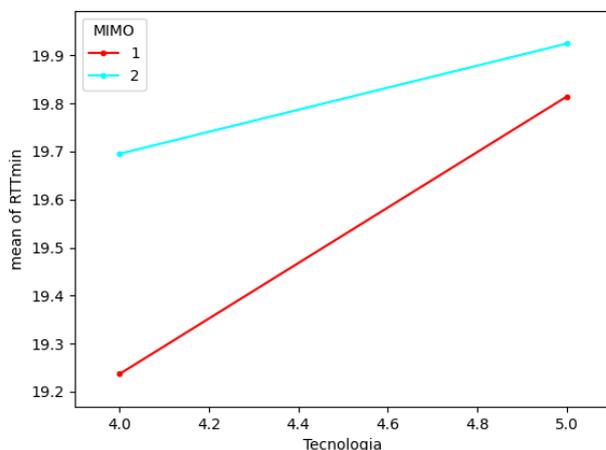


Figura 7.23: Comparación RTT-Tecnología en función del número de antenas

Ahora tratamos de entender el comportamiento en función de la zona de la cámara en la que se emita. En la figura 7.24 se representa un comportamiento cuanto menos curioso. Empleando 4G tenemos peor rendimiento en términos de latencia para las observaciones tomadas sobre la zona reverberante, pero cuando utilizamos 5G esto cambia y las peores prestaciones vienen dadas en la zona anecóica. Aunque las diferencias son ínfimas.

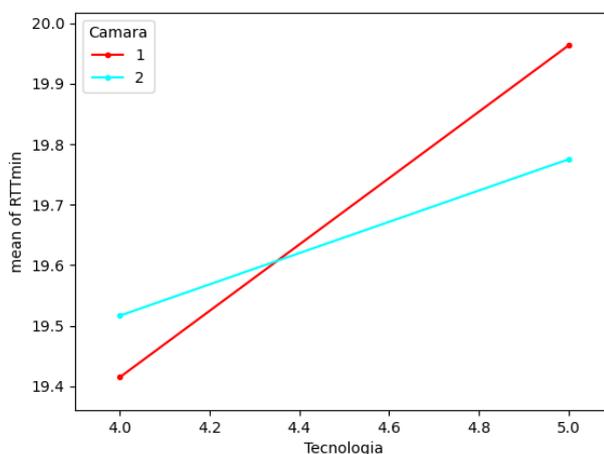


Figura 7.24: Comparación RTT-Tecnología en función de la zona de la cámara semi-anecóica

Por último, analizamos el comportamiento frente a las diferentes polarizaciones que se muestran en la figura 7.25. La representación no deja duda de que la latencia al cambiar a la red 5G aumenta. Además, como ocurría en el caso de la cámara anecóica la mejor prestación permuta a su vez con el cambio de tecnología.

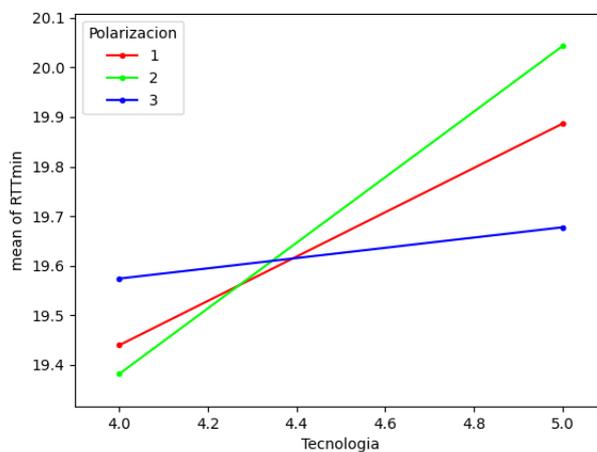


Figura 7.25: Comparación RTT-Tecnología en función de la polarización

Capítulo 8

Conclusiones y Trabajos Futuros

En este capítulo se presentan un resumen de los objetivos obtenidos y se exponen las conclusiones alcanzadas tras el análisis de los resultados. Finalmente, se citan las líneas de trabajo futuro a realizar en el ámbito a lo largo del proyecto y las líneas de trabajos futuros a realizar entorno al mismo.

8.1. Conclusiones

El proyecto en sí ha supuesto bastantes dificultades debidas a las múltiples redes que se plantearon para desplegar y analizar. En definitiva, se han resuelto los problemas que han ido apareciendo a la hora de desplegar las redes 4G LTE, 5G NR y LTE-M Cat-M1 y se han logrado el 100 % de los objetivos que se proponen en el apartado 1.2.

Principalmente, se realizó un estudio de las tecnologías y capacidades de las mismas que podíamos emplear para el despliegue en su totalidad de estas redes. Siendo seleccionada la opción, aunque más costosa económicamente, más sencilla de implementar, es decir, las redes se despliegan sobre una estación base real de *Amarisoft*. Para todas las redes se ha estudiado las capacidades que nos ofrece esta solución, el funcionamiento de las mismas y la mejor forma, sin quebrarnos trabajando sin sentido, para desplegarlas con éxito. Para la implementación de cada red fue necesario la configuración a consciencia de cada una y entender los archivos de configuración por defecto para poder ajustarlos a lo que queríamos. Además, se han tenido que configurar y/o programar los dispositivos externos que se conectarán y con los que se realizan las pruebas de conectividad, llamada VoLTE y envío de mensajes SMS.

En la realización de las pruebas de experimentación, se ideó un *setup* específico ubicado dentro de una cámara semi-anecóica, se estudiaron los posibles parámetros a estudiar en función de las diferentes configuraciones de los parámetros de entrada o características y se automatizó el proceso de experimentación de forma que se optimizase el tiempo de uso de la cámara y se pudiese trabajar en paralelo sobre otro tema.

En el siguiente paso, se realizaron los análisis de los resultados en función de los parámetros objetivos como *transfer*, *throughput*, *packet loss*, *packet retransmitted* y *RTT minimum*. Para cada uno de ellos, se emplearon diferentes métodos de análisis utilizando una aplicación diseñada e implementada específicamente para esta labor. La aplicación Perfyzer se encarga de todo lo relacionado con el análisis y consta de funciones propias para generar el dataset; y funciones más orientadas al análisis empleando mecanismos de aprendizaje automático como Exploratory Data Analysis, Feature Importance, Dimensionality Reduction, *clustering* e, incluso, *testing* empleando ANOVA.

Finalmente, se interpretaron los resultados obtenidos de las diferentes técnicas de análisis que nos permitía la aplicación Perfyzer. En estos resultados, se obtuvieron algunos que podemos categorizar de obvios como que el *throughput* presenta mejores prestaciones cuando se emplea las redes 5G y se ha obtenido picos de aproximadamente 340 Mbps; o que los paquete perdidos y retransmitidos aumentan conforme se aumenta el ancho de banda de la celda. Además de estos, también se han observado algunos resultados curiosos como que la latencia mínima empeora en el cambio de 4G a 5G cuando empleamos multiplexación FDD, aunque en términos generales la latencia mínima es mejor que si se emplea multiplexación TDD. Si se desea conocer más resultados, vienen todas las interpretaciones en el apartado 7.2.

8.2. Trabajos Futuros

A pesar de tener en pleno funcionamiento las redes previstas sobre la estación base *Amarisoft*, cabe comentar que existen posibles mejoras o ideas a desarrollar para continuar con la investigación en este campo. Estas se reflejan a continuación:

- Mejora del diseño de la interfaz de la aplicación Perfyzer.
- Generar un *pipeline* entre los algoritmos DR y *clustering* para poder realizar análisis más en profundidad.
- Pulir algunos algoritmos de la aplicación Perfyzer y optimizar el código de la aplicación Perfyzer.

- Implementación de redes 5G empleando otras posibilidades como free5g o OAI.
- Determinar nuevas características configurables como modulación o probar con antenas de mejores prestaciones para las frecuencias de las bandas empleadas para aumentar si cabe la posibilidad el dataset.
- Pulir el análisis de resultados y publicar un artículo en una revista Journal Citation Report (JCR).

Glosario

2G Segunda Generación de las comunicaciones móviles.

3G Tercera Generación de las comunicaciones móviles.

3GPP 3rd Generation Partnership Project.

4G Cuarta Generación de las comunicaciones móviles.

5G Quinta Generación de las comunicaciones móviles.

5GC 5G Core Network.

ACK Acknowledgement.

AF Application Functions.

AIC Akaike's Information Criteria.

AMF Access and Mobility Management Function.

ANOVA ANalysis Of VAriance.

APN Access Point Name.

AS Access Stratum.

AUSF Authentication Server Function.

AWS Amazon Web Services.

BCCH Broadcast Control Channel.

BIC Bayesian Information Criteria.

BSC Base Station Controller.

Cat-M1 Category M1.

CBM Condition Based Monitoring.

CCCH Common Control Channel.

CDF Cumulative Distribution Function.

CN Core Network.

CP-OFDM cyclical Prefix Orthogonal Frequency Division Multiplexing.

CUPS Control and User Plane Separation.

DBSCAN Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise.

DCI Downlink Control Information.

DFT Discrete Fourier Transform.

DFT-S-OFDM DFT spread OFDM.

DL Downlink.

DL-SCH Downlink Shared Channel.

DONAS Data Over Non-Access Stratum.

DR Dimensionality Reduction.

DRB Dedicated Radio Bearer.

DRX Discontinuous Reception.

DTCH Dedicated Traffic Channel.

DU Distributed Unit.

E-UTRAN Evolved Universal Mobile Telecommunications System Terrestrial Radio Access Network.

EARFCN E-UTRA Absolute Radio Frequency Channel Number.

eCPRI enhanced Common Public Radio Interface.

EDA Exploratory Data Analysis.

eDRX Extended Discontinuous Reception.

EIR Equipment Identity Register.

eMBB enhanced Mobile Broadband.

eMBMS Evolved Multimedia Broadcast Multicast Services.

EN-DC E-UTRAN - NR Dual Connectivity.

eNB Evolved Node B.

EPC Evolved Packet Core.

FDD Frequency Division Duplex.

FFT Fast Fourier Transform.

FI Feature Importance.

gNB Next Generation NodeB.

GPRS General Packet Radio Service.

GSM Global System for Mobile communications.

GUI Graphical User Interface.

HARQ Hybrid automatic repeat request.

HARQ Hybrid Automatic Repeat Request.

HD Half-Duplex.

HSPA High-Speed Packet Access.

HSS Home Subscriber Server.

ICCID Integrated Circuit Card ID.

IEEE Institute of Electrical and Electronics Engineers.

IMS IP Multimedia Subsystem.

IMSI International Mobile Subscriber Identify.

IoT Internet of Things.

IP Internet Protocol.

IPSEC Internet Protocol security.

ISM Industrial, Scientific and Medical.

JCR Journal Citation Report.

Ki Authentication Key.

KPI Key Performance Indicator.

LAI Location Area Identity.

Li-Fi Light Fidelity.

LIME Local Interpretable Model-agnostic Explanations.

LoRa Long Range.

LoRaWAN Long Range Wide Area Network.

LPWAN Low Power Wide Area Network.

LTE Long Term Evolution.

LTE-M LTE CatM1.

M2M Machine to Machine.

MAC Media Access Control.

MBMS Multimedia Broadcast Multicast Services.

MCCH Multicast Control Channel.

MIB Master Information Block.

MIMO Multiple-Input Multiple-Output.

MIT Massachusetts Institute of Technology.

ML Machine Learning.

MME Mobility Management Entity.

mMTC massive Machine-Type Communications.

MNO Mobiles Network Operators.

MSC Mobile Switching Center.

MSISDN Mobile Station International Subscriber Directory Number.

MTCH Multicast Traffic Channel.

MVC Model - View - Controller.

NACK Negative Acknowledgement.

NAS Network Attached Storage.

NB-IoT NarrowBand-Internet of Things.

NBPBCH Narrow-Band Physical Broadcast Channel.

NEF Network Exposure Function.

NFC Near Field Communication.

NFV Network Function Virtualization.

NLOS Non-Line-Of-Sight.

NPDCCH Narrow-Band Physical Downlink Control Channel.

NPDSCH Narrow-Band Physical Downlink Shared Channel.

NPSS Narrow-Band Primary Synchronization Signal.

NR New Radio.

NRF NF Repository Function.

NRS Narrow-Band Reference Signal.

NSA Non Standalone.

NSSF Network Slice Selection Function.

NSSS Narrow-Band Secondary Synchronization Signal.

OAI OpenAirInterface.

OFDM Orthogonal Frequency Division Multiplexing.

OFDMA Orthogonal Frequency Division Multiple Access.

OLS Ordinary Least Squares.

OTS Object Transaction Service.

P-GW Packet Data Network Gateway.

PAP Power Angular Profile.

PBCH Physical Broadcast Channel.

PCA Principal Components Analysis.

PCCH Paging Control Channel.

PCF Policy Control Function.

PCFICH Physical Control Format Indicator Channel.

- PCH** Paging Channel.
- PCI** Peripheral Component Interconnect.
- PCRF** Policy and Charging Rules Function.
- PDCCH** Physical Downlink Control Channel.
- PDCP** Packet Data Convergence Protocol.
- PDF** Probability Density Functions.
- PDN** Packet Data Network.
- PDP** Power Delay Profile.
- PDSCH** Physical Downlink Shared Channel.
- PHICH** Physical Hybrid ARQ Indicator Channel.
- PHY** Capa física.
- PLMN** Public Land Mobile Network.
- PMCH** Physical Multicast Channel.
- PRACH** Physical Random Access Channel.
- PSM** Power Saving Modes.
- PUCCH** Physical Uplink Control Channel.
- PUSCH** Physical Uplink Shared Channel.
- QAM** Quadrature Amplitude Modulation.
- QoS** Quality of Service.
- QPSK** Quadrature Phase Shift Keying.
- RAN** Red de Acceso Radio.
- RAP** Random Access Process.
- RB** Resource Block.
- RF** Radiofrecuencia.
- RLC** Radio Link Control.
- RNC** Radio Network Controller.

RRC Radio Resource Control.

RTT Round Trip Time.

RX Recepción.

S-GW Service Gateway.

S1AP S1 Application Part.

SA Stand Alone.

SBA Service Based Architecture.

SBI Service Based Interfaces.

SC-FDMA Single Carrier Frequency Division Multiple Access.

SCS Subcarrier Spacings.

SDR Software Defined Radio.

SFN System Frame Number.

SHAP SHapley Additive exPlanations.

SIB System Information Block.

SINR Signal to Interference plus Noise Ratio.

SIP Session Initiation Protocol.

SISO Single Input Single Output.

SMF Session Management Function.

SMS Short Message Service.

SNR Signal to Noise Ratio.

SRS Software Radio Systems.

t-SNE T-distributed Stochastic Neighbor Embedding.

TDD Time Division Duplex.

TX Transmisión.

UDM Unified Data Management.

UE User Equipment.

UL Uplink.

UML Unified Modeling Language.

UMTS Universal Mobile Telecommunications System.

UPF User Plane Function.

URLLC Ultra Reliable Low Latency Communications.

USIM User subscriber Identification Module.

V2X Vehicle to Everything.

VoLTE Voice over LTE.

WCDMA Wideband Code Division Multiple Access.

Wi-Fi Wireless Fidelity.

WIMUNET Wireless and Multimedia Networking Lab (TIC-235).

WLAN Wireless Local Area Network.

WMAN Wireless Metropolitan Area Network.

WPAN Wireless Personal Area Network.

WWAN Wireless Wide Area Network.

xHAUL Backhaul/Fronthaul.

Bibliografía

- [1] Get link y col. *Training's on 5G*. URL: <https://www.connectivity.technology/2020/08/two-short-trainings-on-5g-beginners.html> (visitado 07-07-2022).
- [2] *5G - que es y cuales son sus beneficios*. Zoom Informatica. URL: <https://zoominformatica.com/blog/5g-que-es-y-cuales-son-sus-beneficios/> (visitado 07-07-2022).
- [3] *Official Page of 3GPP*. URL: <https://www.3gpp.org/> (visitado 07-07-2022).
- [4] *3GPP Release 16*. URL: <https://www.3gpp.org/release-16> (visitado 07-07-2022).
- [5] *3GPP: Release 17*. URL: <https://www.3gpp.org/release-17> (visitado 07-07-2022).
- [6] *Software company dedicated to 4G LTE and 5G NR*. en-US. URL: <https://www.amarisoft.com/> (visitado 07-07-2022).
- [7] *XV Jornadas de Ingeniería Telemática (JITEL 2021)*. en-US. URL: <https://jitel21.udc.es/> (visitado 07-07-2022).
- [8] *IMG: alcance-tec-inalambricas.jpeg*. URL: <https://ticnegocios.camaravalencia.com/wp-content/uploads/2018/06/alcance-tec-inalambricas.jpg> (visitado 07-07-2022).
- [9] *Official Page of srsRAN*. original-date: 2013-12-06T13:53:04Z. Mayo de 2021. URL: <https://github.com/srsran/srsRAN> (visitado 07-07-2022).
- [10] *SRS: The most trusted open software for mobile wireless networks*. en-US. URL: <https://srs.io/> (visitado 07-07-2022).
- [11] *SRS: Products of SRS*. en-US. URL: <https://srs.io/products/> (visitado 07-07-2022).
- [12] *SRS: srsRAN - Your own mobile network*. URL: <https://www.srsran.com/> (visitado 07-07-2022).
- [13] *OpenAirInterface: 5G software alliance for democratising wireless innovation*. en-US. URL: <https://openairinterface.org/> (visitado 07-07-2021).

- [14] *OAI: Home · Wiki · oai / cn5g / oai-cn5g-amf*. en. URL: <https://gitlab.eurecom.fr/oai/cn5g/oai-cn5g-amf/-/wikis/home> (visitado 07-07-2022).
- [15] *Open Source Mobile Communications*. URL: <http://osm-download.etsi.org/ftp/osm-10.0-ten/OSM-MR11-hackfest/presentations/OSM-MR%5C%2311%5C%20Hackfest%5C%20-%5C%200AI%5C%200nboarding%5C%20Challenge%5C%20-%5C%203.%5C%20AI%5C%205G%5C%20Core.pdf> (visitado 07-07-2022).
- [16] *OAI: 5G CORE NETWORK – OpenAirInterface*. en-US. URL: <https://openairinterface.org/oai-5g-core-network-project/> (visitado 07-07-2022).
- [17] *free5GC*. URL: <https://www.free5gc.org/> (visitado 07-07-2022).
- [18] *Home · Wiki · oai / cn5g / oai-cn5g-amf*. GitLab. URL: <https://gitlab.eurecom.fr/oai/cn5g/oai-cn5g-amf/-/wikis/home> (visitado 12-05-2022).
- [19] *GitHub: software free5gc*. original-date: 2020-01-31T08:45:17Z. Mayo de 2021. URL: <https://github.com/free5gc/free5gc> (visitado 07-07-2022).
- [20] *Amarisoft: Technology*. en-US. URL: <https://www.amarisoft.com/technology/> (visitado 07-07-2022).
- [21] *Amarisoft: AMARI Callbox Series*. Amarisoft. URL: <https://www.amarisoft.com/products/test-measurements/amari-lte-callbox/> (visitado 07-07-2022).
- [22] *Amarisoft: Build product with our technology*. Amarisoft. URL: <https://www.amarisoft.com/products/custom-projects/> (visitado 07-07-2022).
- [23] *Amarisoft: Sovereign 5G*. Amarisoft. URL: <https://www.amarisoft.com/products/sovereign-5g/> (visitado 12-05-2022).
- [24] Sadiq Iqbal y J. M. Hamamreh. “A Comprehensive Tutorial on How to Practically Build and Deploy 5G Networks Using Open-Source Software and General-Purpose, Off-the-Shelf Hardware”. En: *RS Open Journal on Innovative Communication Technologies* 2 (16 de dic. de 2021). DOI: 10.46470/03d8ffbd.4ccb7950.
- [25] *LTE-M vs. NB-IoT*. URL: <https://www.sierrawireless.com/iot-blog/lte-m-vs-nb-iot/> (visitado 07-07-2022).
- [26] *Diferencias entre NB-IOT y LTE-M*. es-ES. Section: Internet of Things. Mayo de 2018. URL: <https://accent-systems.com/es/blog/diferencias-nb-iot-lte-m/> (visitado 07-07-2022).

- [27] *Verizon: Cat-M1 and NB-IoT Solutions*. Verizon Business. URL: <https://www.verizon.com/business/products/internet-of-things/connected-assets/lte-category-m1-narrow-band-technologies/> (visitado 07-07-2022).
- [28] *Verizon: ThingSpace*. URL: <https://thingspace.verizon.com/index.html> (visitado 07-07-2022).
- [29] *Vodafone NarrowBand IoT*. URL: <https://www.vodafone.es/c/empresas/es/narrowband-iot/> (visitado 07-07-2022).
- [30] *Shiratech Solutions: iCOMOX™ NB-IoT*. URL: <https://www.shiratech-solutions.com/products/nbiot/> (visitado 07-07-2022).
- [31] *FreeRTOS, sistema operativo con funcionamiento en tiempo real para microcontroladores - AWS*. Amazon Web Services, Inc. URL: <https://aws.amazon.com/es/freertos/> (visitado 07-07-2022).
- [32] *IoT Solutions - Modules, IoT Platforms & IoT Connectivity — Sierra Wireless*. URL: <https://www.sierrawireless.com/> (visitado 07-07-2022).
- [33] *Official Page of U-Blox*. u-blox. URL: <https://www.u-blox.com/en> (visitado 07-07-2022).
- [34] *Quectel: IoT Modules, IoT Antennas and IoT Connectivity*. Quectel. URL: <https://www.quectel.com> (visitado 07-07-2022).
- [35] *PureSoftware: NarrowBand IoT (NB-IoT) Solutions*. PureSoftware. URL: <https://puresoftware.com/nb-iot-solutions/> (visitado 07-07-2022).
- [36] *Verkotan Test Lab: IoT OTA Measurements - IoT Performance Evaluation*. Verkotan. URL: <https://verkotan.com/services/iot-ota-measurements/> (visitado 07-07-2022).
- [37] Rohde & Schwarz GmbH & Co KG. C. *NB-IoT/LTE-M network testing*. URL: https://www.rohde-schwarz.com/ph/solutions/test-and-measurement/mobile-network-testing/expertise/nb-iot/nb-iot-lte-m-network-testing_231984.html (visitado 16-05-2022).
- [38] Ahmed Hussain, Per-Simon Kildal y Andrés Alayón Glazunov. “Interpreting the Total Isotropic Sensitivity and Diversity Gain of LTE-Enabled Wireless Devices From Over-the-Air Throughput Measurements in Reverberation Chambers”. En: *IEEE Access* 3 (9 de mar. de 2015). DOI: 10.1109/ACCESS.2015.2411393.
- [39] Agbotiname Imoize y Oluwatomisin Adegbite. “MEASUREMENTS-BASED PERFORMANCE ANALYSIS OF A 4G LTE NETWORK IN AND AROUND SHOPPING MALLS AND CAMPUS ENVIRONMENTS IN LAGOS NIGERIA”. En: 14 (1 de jun. de 2018), págs. 208-225.

- [40] Leonardo Bonati y col. *OpenRAN Gym: An Open Toolbox for Data Collection and Experimentation with AI in O-RAN*. arXiv:2202.10318. type: article. arXiv, 21 de feb. de 2022. arXiv: 2202.10318[cs]. URL: <http://arxiv.org/abs/2202.10318> (visitado 18-05-2022).
- [41] Michele Polese y col. *Understanding O-RAN: Architecture, Interfaces, Algorithms, Security, and Research Challenges*. arXiv:2202.01032. type: article. arXiv, 2 de feb. de 2022. arXiv: 2202.01032[cs, eess]. URL: <http://arxiv.org/abs/2202.01032> (visitado 18-05-2022).
- [42] Tezcan Cogalan y col. “5G-CLARITY: 5G-Advanced Private Networks Integrating 5G NR, WiFi, and LiFi”. En: *IEEE Communications Magazine* 60.2 (feb. de 2022). Conference Name: IEEE Communications Magazine, págs. 73-79. ISSN: 1558-1896. DOI: 10.1109/MCOM.001.2100615.
- [43] George Darzanos y col. “Business Models for 5G Experimentation as a Service: 5G Testbeds and Beyond”. En: *2022 25th Conference on Innovation in Clouds, Internet and Networks (ICIN)*. 2022 25th Conference on Innovation in Clouds, Internet and Networks (ICIN). ISSN: 2472-8144. Mar. de 2022, págs. 169-174. DOI: 10.1109/ICIN53892.2022.9758131.
- [44] Bruno Donassolo y col. “Online Reconfiguration of IoT Applications in the Fog: The Information-Coordination Trade-Off”. En: *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems* 33.5 (mayo de 2022). Conference Name: IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, págs. 1156-1172. ISSN: 1558-2183. DOI: 10.1109/TPDS.2021.3097281.
- [45] D. Roy, S. Sadhu y S. Nandi. “Advantages of 5G-IoT over LTE-M or Nb-IoT Enhancing Next Generation Technologies”. En: *Michael Faraday IET International Summit 2020 (MFIIS 2020)*. Michael Faraday IET International Summit 2020 (MFIIS 2020). Vol. 2020. Oct. de 2020, págs. 296-301. DOI: 10.1049/icp.2021.1172.
- [46] Rapeepat Ratasuk y col. “LTE-M Evolution Towards 5G Massive MTC”. En: *2017 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps)*. 2017 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps). Dic. de 2017, págs. 1-6. DOI: 10.1109/GLOCOMW.2017.8269112.
- [47] Alberto Rico-Alvarino y col. “An overview of 3GPP enhancements on machine to machine communications”. En: *IEEE Communications Magazine* 54.6 (jun. de 2016). Conference Name: IEEE Communications Magazine, págs. 14-21. ISSN: 1558-1896. DOI: 10.1109/MCOM.2016.7497761.
- [48] Krishna Patel, Shah y Sagarkumar Patel. “Survey on LTE Network Architecture and its Security Aspects”. En: 3 (20 de sep. de 2018), págs. 2456-3307.

- [49] Ashish Kumar, Ankit Aswal y Lalit Singh. “4G Wireless Technology: A Brief Review”. En: *International Journal of Engineering and management Research* 3 (5 de abr. de 2013), págs. 35-43.
- [50] *3GPP: The Evolved Packet Core*. URL: <https://www.3gpp.org/technologies/keywords-acronyms/100-the-evolved-packet-core> (visitado 07-07-2022).
- [51] *4G LTE frequency band*. URL: https://www.sqimway.com/lte_band.php (visitado 07-07-2022).
- [52] *ETSI - Welcome to the World of Standards!* ETSI. Library Catalog: www.etsi.org. URL: https://www.etsi.org/deliver/etsi_tr/121900_121999/121915/15.00.00_60/tr_121915v150000p.pdf (visitado 07-07-2022).
- [53] Jorge Navarro-Ortiz y col. “A Survey on 5G Usage Scenarios and Traffic Models”. En: *IEEE Communications Surveys Tutorials* 22.2 (2020). Conference Name: IEEE Communications Surveys Tutorials, págs. 905-929. ISSN: 1553-877X. DOI: 10.1109/COMST.2020.2971781.
- [54] Jonathan Prados Garzón. *Architecture, Modeling, Planning, and Dynamic Provisioning of Softwarized 5G Mobile Core Networks*. Accepted: 2018-11-21T13:04:47Z. Universidad de Granada, 2018. ISBN: 978-84-13-06018-7. URL: <https://digibug.ugr.es/handle/10481/53865> (visitado 12-05-2022).
- [55] *Arquitectura de las redes 5G. Núcleo de red, redes RAN y arquitectura de seguridad para la tecnología 5G*. eng. Last Modified: 2021-03-19. Mayo de 2019. URL: <https://www.viavisolutions.com/es-es/arquitectura-de-la-tecnologia-5g> (visitado 07-07-2022).
- [56] *Official Page of O-RAN ALLIANCE*. URL: <https://www.o-ran.org/> (visitado 21-05-2021).
- [57] *ETSI - Release 16*. ETSI. Library Catalog: www.etsi.org. URL: https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/123500_123599/123501/16.06.00_60/ts_123501v160600p.pdf (visitado 07-07-2022).
- [58] *5G NR frequency band*. URL: https://www.sqimway.com/nr_band.php/ (visitado 07-07-2022).
- [59] Ali Zaidi y col. *5G Physical Layer: Principles, Models and Technology Components*. Google-Books-ID: mtJKDwAAQBAJ. Academic Press, 22 de sep. de 2018. 324 págs. ISBN: 978-0-12-814579-1.
- [60] Xingqin Lin y col. “5G New Radio: Unveiling the Essentials of the Next Generation Wireless Access Technology”. En: *IEEE Communications Standards Magazine* 3.3 (sep. de 2019), págs. 30-37. ISSN: 2471-2825, 2471-2833. DOI: 10.1109/MCOMSTD.001.1800036. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8928165/> (visitado 20-05-2022).

- [61] Manal Alareqi y col. “A Survey of Internet of Things Services Provision by Telecom Operators”. En: 18 (13 de jul. de 2018), págs. 1-11. DOI: 10.4108/eai.13-7-2018.155571.
- [62] *ITU: IoT Standards Part II:Part II: 33GPP StandardsGPP Standards Training on PLANNING INTERNET OF THINGS (IoT)s NETWORKS- Training on PLANNING INTERNET OF THINGS (IoT)s NETWORKS.* URL: <https://www.itu.int/en/ITU-D/Regional-Presence/AsiaPacific/Documents/Events/2018/IoT-BDG/7.%5C%20IoT%5C%20Standards%5C%20Part%5C%20II%5C%20-%5C%20Sami%5C%20Tabbane.pdf> (visitado 23-05-2022).
- [63] Saiz Miranda. “Estudio en detalle de NB-IoT: comparación con otras tecnologías LPWAN considerando diferentes patrones de tráfico”. En: (), pág. 90.
- [64] *OSM: Software pysim.* original-date: 2016-01-18T08:48:09Z. Mayo de 2021. URL: <https://github.com/osmocom/pysim> (visitado 27-07-2022).
- [65] *Official page of Open Source Mobile Communications.* URL: <https://osmocom.org/> (visitado 07-07-2022).
- [66] *Official Page of Visual Studio Code - Code Editing. Redefined.* en. URL: <https://code.visualstudio.com/> (visitado 07-07-2022).
- [67] *scikit-learn: machine learning in Python — scikit-learn 1.1.1 documentation.* URL: <https://scikit-learn.org/stable/> (visitado 07-07-2022).
- [68] Michael Waskom. “seaborn: statistical data visualization”. En: *Journal of Open Source Software* 6.60 (6 de abr. de 2021), pág. 3021. ISSN: 2475-9066. DOI: 10.21105/joss.03021. URL: <https://joss.theoj.org/papers/10.21105/joss.03021> (visitado 07-07-2022).
- [69] *Matplotlib — Visualization with Python.* URL: <https://matplotlib.org/> (visitado 07-07-2022).
- [70] Riverbank Computing Limited. *PyQt5: Python bindings for the Qt cross platform application toolkit.* Ver. 5.15.7. URL: <https://www.riverbankcomputing.com/software/pyqt/> (visitado 03-07-2022).
- [71] *iPerf - Download iPerf3 and original iPerf pre-compiled binaries.* URL: <https://iperf.fr/iperf-download.php> (visitado 07-07-2022).
- [72] *Wireshark · Go Deep.* URL: <https://www.wireshark.org/> (visitado 07-07-2022).
- [73] *HUAWEI MateBook X Pro Especificaciones — HUAWEI España.* URL: <https://consumer.huawei.com/es/laptops/matebook-x-pro-2020/specs/> (visitado 07-07-2022).

- [74] *7049P-TRT — 4U — SuperServer — Products — Super Micro Computer, Inc.* URL: <https://www.supermicro.com/en/products/system/4U/7049/SYS-7049P-TRT.cfm> (visitado 07-07-2022).
- [75] *PyCom Fipy*. en-GB. URL: <https://pycom.io/product/fipy/> (visitado 07-07-2022).
- [76] *LTE Modem Firmware Update*. URL: <https://docs.pycom.io/updatefirmware/ltemodem/> (visitado 07-07-2022).
- [77] Dario Radečić. *LIME: How to Interpret Machine Learning Models With Python*. Medium. URL: <https://towardsdatascience.com/lime-how-to-interpret-machine-learning-models-with-python-94b0e7e4432e> (visitado 07-07-2022).
- [78] *Welcome to the SHAP documentation — SHAP latest documentation*. URL: <https://shap.readthedocs.io/en/latest/index.html> (visitado 07-07-2022).
- [79] Marco Tulio Ribeiro, Sameer Singh y Carlos Guestrin. "Why Should I Trust You?": Explaining the Predictions of Any Classifier. Number: arXiv:1602.04938. 9 de ago. de 2016. arXiv: 1602.04938[cs,stat]. URL: <http://arxiv.org/abs/1602.04938> (visitado 04-07-2022).
- [80] Universidad Nacional Abierta y a Distancia y col. "The value of shapley as a strategy for Resource Optimization on Power Line Communication (PLC)". En: *Ingeniería y Ciencia* (2015), págs. 189-211. ISSN: 17949165, 22564314. DOI: 10.17230/ingciencia.11.22.9. URL: <http://publicaciones.eafit.edu.co/index.php/ingciencia/article/view/2556> (visitado 04-07-2022).
- [81] Dillon Bowen y Lyle Ungar. *Generalized SHAP: Generating multiple types of explanations in machine learning*. Number: arXiv:2006.07155. 15 de jun. de 2020. arXiv: 2006.07155[cs,stat]. URL: <http://arxiv.org/abs/2006.07155> (visitado 04-07-2022).
- [82] Luis Fernando Pinto Sánchez-Matamoro. "Análisis de la aplicación de algoritmos de K-means y Continuous Max-Flow a la segmentación de imágenes en color". En: ().
- [83] *ML — Spectral Clustering*. GeeksforGeeks. Section: Machine Learning. 19 de jul. de 2019. URL: <https://www.geeksforgeeks.org/ml-spectral-clustering/> (visitado 04-07-2022).
- [84] *Dimension Reduction: Principal Component Analysis*. URL: https://www.stat.cmu.edu/~larry/=sml/dimension_reduction.pdf (visitado 07-07-2022).
- [85] Geoffrey Hinton Laurens van der Maaten. "Visualizing Data using t-SNE". En: 9 (12 de ago. de 2008), págs. 2579-2605.

Apéndice

Apéndice A

Código de Automatización de los Experimentos

Este anexo presenta los diferentes archivos empleados en la automatización de los experimentos en la cámara anecoica. Si nos fijamos en la figura 6.11 aparecen menos ficheros de los que se describen en este anexo, esto se debe a que la imagen se volvería mucho más pequeña y no sería apropiada para visualizarse. Por este motivo, se decidió agrupar las funciones de algunos dentro del archivo que las llamaban.

Listing A.1: campaign_test.sh

```
1 #!/bin/bash
2 # Jorge Navarro-Ortiz (jorgenavarro@ugr.es), Felix Delgado-Ferro (
   felixdelgado@ugr.es), University of Granada 2021
3
4 # Phone type (1 = Huawei P40, not rooted; 2 = Xiaomi Mi Mix 2S, rooted
   )
5 PHONE_TYPE=1
6
7 # CAMPAIGN PARAMETERS
8 SLEEP_AFTER_RESTART=5
9 SLEEP_BETWEEN_EXPERIMENTS=5
10
11 # Test parameters
12 REPETITIONS=20
13 SERVER="192.168.2.2"
14
15 # COMMANDS
16 STOPNETWORK="sudo service lte stop"
17 STARTNETWORK="sudo service lte start"
18
19 # Network configuration (fixed values for the campaign)
20 #PATH_CONFIG_FILE_SYMLINK="/root/enb/config/enb.cfg" # Jorge
21 PATH_CONFIG_FILE_SYMLINK="/opt/enb/config/enb.cfg" # Felix
22 tecn="5G" # 4G/5G
23 posicion="centro" # centro/arribaDerecha/arribaIzquierda/
   abajoDerecha/abajoIzquierda
24 tipo="anecoica" # anecoica/rever
25 polarizacion="1" # 1/2/3 (mirar fotos)
```

```

26
27 # Experiment array (do not add spaces between the variable name, '='
    and the first '('; you can add after that parenthesis)
28 TDD_ARRAY=(
    1 1 1 1 1 ) # 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1
29 NR_TDD_ARRAY=(
    1 1 1 1 1 ) # 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1
30 NR_TDD_CONFIG_ARRAY=(
    1 1 1 1 1 ) # 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1
31 N_RB_DL_ARRAY=(
    100 75 50 25 100 75 50 25 100 75 50
    25 100 75 50 25 ) # 100 75 50 25 6 100 75 50 25 6 )
32 N_Antenna_DL_ARRAY=(
    1 1 1 1 2 2 2 2 1 1 1
    1 2 2 2 2 ) # 1 1 1 1 1 1 2 2 2 2 )
33 band4G_FDD_ARRAY=(
    1 1 1 1 1 ) # 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 )
34 band4G_TDD_ARRAY=(
    38 38 38 38 38 38 38 38 38 38 38
    38 38 38 38 38 ) # 42 42 42 42 42 42 42 42 42 )
35 preferred_network_ARRAY=(
    5 5 5 5 5 ) # 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 )
36
37
38 #####
39 # Functions
40 #####
41
42 getBandwidth () {
43     N_RB_DL_VALUE=$1
44     case $N_RB_DL_VALUE in
45         100)
46             echo "20"
47             ;;
48         75)
49             echo "15"
50             ;;
51         50)
52             echo "10"
53             ;;
54         25)
55             echo "5"
56             ;;
57         6)
58             echo "1.4"
59             ;;
60         *)
61             echo "10" # Default value
62             ;;
63     esac
64 }
65
66 getMIMO () {
67     N_Antenna_DL_VALUE=$1
68     case $N_Antenna_DL_VALUE in
69         1)
70             echo "SISO"
71             ;;
72         2)
73             echo "MIMO2x2"
74             ;;
75         4)
76             echo "MIMO4x4"
77             ;;
78         *)

```

```
79     echo "SIS0" # Default value
80     ;;
81   esac
82 }
83
84 getDLEARFCN_FDD () {
85   band4G_FDD_VALUE=$1
86   case $band4G_FDD_VALUE in
87     1)
88       echo "300"
89       ;;
90     3)
91       echo "1575"
92       ;;
93     5)
94       echo "2525"
95       ;;
96     7)
97       echo "3100"
98       ;;
99     20)
100      echo "6300"
101      ;;
102     *)
103      echo "300" # Default value
104      ;;
105   esac
106 }
107
108 getDLEARFCN_TDD () {
109   band4G_TDD_VALUE=$1
110   case $band4G_TDD_VALUE in
111     38)
112       echo "38050"
113       ;;
114     41)
115       echo "40620"
116       ;;
117     42)
118       echo "42590"
119       ;;
120     *)
121       echo "40620" # Default value
122       ;;
123   esac
124 }
125
126 #####
127 # Experiment loop
128 #####
129 NOEXPERIMENTS=${#TDD_ARRAY[@]}
130 echo "NOEXPERIMENTS=${NOEXPERIMENTS}"
131
132 if [[ $PHONE_TYPE == 1 ]]; then
133   phone="huawei"
134 elif [[ $PHONE_TYPE == 2 ]]; then
135   phone="xiaomi"
136 fi
137
138 for (( i=0; i<$NOEXPERIMENTS; i++ )); do
139   # Variables that can be computed from the experiment values
140   TDD_VALUE=${TDD_ARRAY[$i]}
```

```

141 if [[ $TDD_VALUE == 0 ]]; then fdd="FDD"; else fdd="TDD"; fi
142 NR_TDD_VALUE=${NR_TDD_ARRAY[$i]}
143 NR_TDD_CONFIG_VALUE=${NR_TDD_CONFIG_ARRAY[$i]}
144 N_RB_DL_VALUE=${N_RB_DL_ARRAY[$i]}
145 bw=$(getBandwidth $N_RB_DL_VALUE)
146 N_Antenna_DL_VALUE=${N_Antenna_DL_ARRAY[$i]}
147 mimo=$(getMIMO $N_Antenna_DL_VALUE)
148 band4G_FDD_VALUE=${band4G_FDD_ARRAY[$i]}
149 dl_earfcn_4G_FDD_VALUE=$(getDLEARFCN_FDD $band4G_FDD_VALUE)
150 band4G_TDD_VALUE=${band4G_TDD_ARRAY[$i]}
151 dl_earfcn_4G_TDD_VALUE=$(getDLEARFCN_TDD $band4G_TDD_VALUE)
152 if [[ $TDD_VALUE == 0 ]]; then
153     # FDD
154     band4G=$band4G_FDD_VALUE
155 else
156     # TDD
157     band4G=$band4G_TDD_VALUE
158 fi
159 testname="${tecn}_${fdd}_${bw}_${mimo}_banda${band4G}_${posicion}_${
    tipo}_${polarizacion}_${phone}"
160
161 # Experiment
162 echo ""
163 echo "#####"
164 echo "# STARTING EXPERIMENT $i"
165 echo "#####"
166 echo "TDD=${TDD_VALUE}, NR_TDD=${NR_TDD_VALUE}, N_RB_DL=${
    N_RB_DL_VALUE}, N_Antenna_DL=${N_Antenna_DL_VALUE},
    dl_earfcn_4G_TDD=${dl_earfcn_4G_TDD_VALUE}, dl_earfcn_4G_FDD=${
    dl_earfcn_4G_FDD_VALUE}"
167 echo "testname=${testname}"
168 echo "#####"
169 # Disconnect phone
170 ./starting.sh
171 ./iperf_server_stop.sh
172 ./select_preferred_network_type.sh -n $preferred_network_VALUE
173 ./disconnect_phone.sh -p $PHONE_TYPE
174
175 # Stop 4G/5G network, change network configuration, restart 4G/5G
    network
176 bash -c "$STOPNETWORK"
177 #echo "./change_amarisoft_configuration.sh -t $TDD_VALUE -T
    $NR_TDD_VALUE -c $NR_TDD_CONFIG_VALUE -r $N_RB_DL_VALUE -a
    $N_Antenna_DL_VALUE -d $dl_earfcn_4G_TDD_VALUE -D
    $dl_earfcn_4G_FDD_VALUE -p $PATH_CONFIG_FILE_SYMLINK"
178 ./change_amarisoft_configuration.sh -t $TDD_VALUE -T $NR_TDD_VALUE -
    c $NR_TDD_CONFIG_VALUE -r $N_RB_DL_VALUE -a $N_Antenna_DL_VALUE
    -d $dl_earfcn_4G_TDD_VALUE -D $dl_earfcn_4G_FDD_VALUE -p
    $PATH_CONFIG_FILE_SYMLINK
179 bash -c "$STARTNETWORK"
180 sleep $SLEEP_AFTER_RESTART
181
182 # Connect phone
183 ./connect_phone.sh -p $PHONE_TYPE
184 ./iperf_server_start.sh
185
186 # Start test
187 ./perform_test.sh -n $testname -t $REPETITIONS -s $SERVER
188
189 sleep $SLEEP_BETWEEN_EXPERIMENTS
190
191 done

```

```
192
193 bash -c "$STOPNETWORK"
```

Listing A.2: starting.sh

```
1 #!/bin/bash
2
3 sudo ufw disable
4 sudo service ufw stop
5
6 echo "Disable Firewall"
7
8 sudo mount /dev/sda1 /media/usb-drive
9
10 echo "USB Amarisoft mounted"
11
12 exit
13
14 exit
```

Listing A.3: disconnect_phone.sh

```
1 #!/bin/bash
2 # Jorge Navarro-Ortiz (jorgenavarro@ugr.es), Felix Delgado-Ferro (
3     felixdelgado@ugr.es), University of Granada 2021
4 #####
5 # Parse inputs parameters
6 #####
7
8 # Default values
9 PHONE=1
10
11 usage() {
12     echo "Usage: $0 [-p <phone type>]" 1>&2;
13     echo " E.g.: $0 -p 1";
14     echo "         phone type 1 ..... Huawei P40 (default value)"
15     echo "         phone type 2 ..... Xiaomi Mi Mix 2S (rooted)"
16     exit 1;
17 }
18
19 while getopts ":p:" o; do
20     case "${o}" in
21         p)
22             p=1
23             PHONE_TYPE=${OPTARG}
24             echo "PHONE_TYPE=${PHONE_TYPE}"
25             ;;
26         *)
27             usage
28             ;;
29     esac
30 done
31 shift $((OPTIND-1))
32
33
34 #if [ -z "${p}" ]; then
35 # usage
36 #fi
```

```
37
38 # Check ADB connectivity to phone
39 ADB_STATE='adb get-state'
40
41 CONNECTED=0
42 if [[ $ADB_STATE == "device"* ]]; then
43     CONNECTED=1
44 fi
45
46 while [[ $CONNECTED == 0 ]]; do
47     echo "Device not connected through ADB, waiting for connection..."
48     sleep 1
49     ADB_STATE='adb get-state'
50     if [[ $ADB_STATE == "device"* ]]; then
51         CONNECTED=1
52     fi
53 done
54
55 # Connect using the proper method depending on the phone type and
56 # whether it is rooted or not
57 if [[ $PHONE_TYPE == 1 ]]; then
58     # Huawei P40 (not rooted)
59     ./disconnect_phone_huawei.sh
60 elif [[ $PHONE_TYPE == 2 ]]; then
61     # Xiaomi Mi Mix 2S (rooted)
62     ./disconnect_phone_xiaomi.sh
63 fi
```

Listing A.4: disconnect_phone_huawei.sh

```
1 #!/bin/bash
2 # Jorge Navarro-Ortiz (jorgenavarro@ugr.es), Felix Delgado-Ferro (
3     felixdelgado@ugr.es), University of Granada 2021
4
5 ADB_STATE='adb get-state'
6
7 if [[ $ADB_STATE == "device"* ]]; then
8
9     CONNECTIVITY_MODE="ON"
10    AIRPLANE_MODE='adb shell "settings get global airplane_mode_on"'
11    #echo "AIRPLANE MODE: ${AIRPLANE_MODE}"
12    if [[ ${AIRPLANE_MODE} == "0"* ]]; then
13        CONNECTIVITY_MODE="ON" # Connectivity ON, i.e. AIRPLANE_MODE OFF
14    else
15        CONNECTIVITY_MODE="OFF" # Connectivity OFF, i.e. AIRPLANE_MODE ON
16    fi
17
18    # Go to home screen
19    #CONNECTIVITY_MODE='./switch_connectivity_huawei.sh'
20    while [[ $CONNECTIVITY_MODE != "OFF"* ]]; do
21        echo "Airplane mode disabled, trying to enable it..."
22        sleep 1
23        CONNECTIVITY_MODE='./switch_connectivity_huawei.sh'
24    done
25
26    echo "Device disconnected!"
27 else
28    echo "No device connected through ADB!"
29    exit 1
30 fi
```

Listing A.5: change_amarisoft_configuration.sh

```

1 #!/bin/bash
2 # Jorge Navarro-Ortiz (jorgenavarro@ugr.es), Felix Delgado-Ferro (
   felixdelgado@ugr.es), University of Granada 2021
3
4 #####
5 # Parse inputs parameters
6 #####
7
8 # Default values
9 TDD_VALUE=0
10 NR_TDD_VALUE=0
11 NR_TDD_CONFIG_VALUE=1
12 N_RB_DL_VALUE=50
13 N_Antenna_DL_VALUE=1
14 dl_earfcn_4G_TDD_VALUE=40620
15 dl_earfcn_4G_FDD_VALUE=300
16
17 usage() {
18     echo "Usage: $0 [-t <TDD>] [-T <NR_TDD>] [-c <NR_TDD_CONFIG>] [-r <
   N_RB_DL>] [-a <N_Antenna_DL>] [-d <dl_earfcn for 4G TDD>] [-D <
   dl_earfcn for 4G FDD>] -p <PATH TO CONFIG FILE SYMLINK>" 1>&2;
19     echo " E.g.: $0 -t 0 -T 0 -c 1 -r 50 -a 1 -d 40620 -D 300 -p \"/root
   /enb/config/enb.cfg\"";
20     echo "     Those are used as default values. Only path to the
   configuration file symlink is mandatory."
21     exit 1;
22 }
23
24 while getopts ":t:T:c:r:a:d:D:p:" o; do
25     case "${o}" in
26         t)
27             t=1
28             TDD_VALUE=${OPTARG}
29             echo "TDD_VALUE=\"$TDD_VALUE"
30             ;;
31         T)
32             T=1
33             NR_TDD_VALUE=${OPTARG}
34             echo "NR_TDD_VALUE=\"$NR_TDD_VALUE"
35             ;;
36         c)
37             c=1
38             NR_TDD_CONFIG_VALUE=${OPTARG}
39             echo "NR_TDD_CONFIG_VALUE=\"$NR_TDD_CONFIG_VALUE"
40             ;;
41         r)
42             r=1
43             N_RB_DL_VALUE=${OPTARG}
44             echo "N_RB_DL_VALUE=\"$N_RB_DL_VALUE"
45             ;;
46         a)
47             a=1
48             N_Antenna_DL_VALUE=${OPTARG}
49             echo "N_Antenna_DL_VALUE=\"$N_Antenna_DL_VALUE"
50             ;;
51         d)
52             d=1
53             dl_earfcn_4G_TDD_VALUE=${OPTARG}
54             echo "dl_earfcn_4G_TDD_VALUE=\"$dl_earfcn_4G_TDD_VALUE"
55             ;;
56         D)

```

```

57     D=1
58     dl_earfcn_4G_FDD_VALUE=${OPTARG}
59     echo "dl_earfcn_4G_FDD_VALUE=" $dl_earfcn_4G_FDD_VALUE
60     ;;
61     p)
62     p=1
63     PATH_CONFIG_FILE_SYMLINK=${OPTARG}
64     echo "PATH_CONFIG_FILE_SYMLINK=" $PATH_CONFIG_FILE_SYMLINK
65     ;;
66
67     *)
68     usage
69     ;;
70     esac
71 done
72 shift $((OPTIND-1))
73
74 if [ -z "${p}" ]; then
75     usage
76 fi
77
78 # Modify the parameters and create a new configuration file
79 rm fdf-enb-gnb-nsa.cfg 2> /dev/null
80 cp fdf-enb-gnb-nsa.cfg.GENERIC fdf-enb-gnb-nsa.cfg
81 # If one string contains another string, please change first the
82   bigger string (e.g. NR_TDD_VALUE and dl_earfcn_4G_TDD_VALUE before
83   TDD_VALUE). If not, the bigger strings will not be changed
84   correctly.
85 sed -i 's/NR_TDD_VALUE/'${NR_TDD_VALUE}'/' fdf-enb-gnb-nsa.cfg
86 sed -i 's/NR_TDD_CONFIG_VALUE/'${NR_TDD_CONFIG_VALUE}'/' fdf-enb-gnb-
87   nsa.cfg
88 sed -i 's/N_RB_DL_VALUE/'${N_RB_DL_VALUE}'/' fdf-enb-gnb-nsa.cfg
89 sed -i 's/N_Antenna_DL_VALUE/'${N_Antenna_DL_VALUE}'/' fdf-enb-gnb-nsa
90   .cfg
91 sed -i 's/dl_earfcn_4G_TDD_VALUE/'${dl_earfcn_4G_TDD_VALUE}'/' fdf-enb
92   -gnb-nsa.cfg
93 sed -i 's/dl_earfcn_4G_FDD_VALUE/'${dl_earfcn_4G_FDD_VALUE}'/' fdf-enb
94   -gnb-nsa.cfg
95 sed -i 's/TDD_VALUE/'${TDD_VALUE}'/' fdf-enb-gnb-nsa.cfg
96
97 echo ""
98 echo "File fdf-enb-gnb-nsa.cfg is created with these parameters!"
99 sudo ln -sfn `pwd`/fdf-enb-gnb-nsa.cfg ${PATH_CONFIG_FILE_SYMLINK}
100 echo "Symlink ${PATH_CONFIG_FILE_SYMLINK} created!"
101 echo ""

```

Listing A.6: connect_phone.sh

```

1 #!/bin/bash
2 # Jorge Navarro-Ortiz (jorgenavarro@ugr.es), Felix Delgado-Ferro (
3   felixdelgado@ugr.es), University of Granada 2021
4 #####
5 # Parse inputs parameters
6 #####
7
8 # Default values
9 PHONE=1
10
11 usage() {

```

```

12 echo "Usage: $0 [-p <phone type>]" 1>&2;
13 echo " E.g.: $0 -p 0";
14 echo "     phone type 1 ..... Huawei P40 (default value)"
15 echo "     phone type 2 ..... Xiaomi Mi Mix 2S (rooted)"
16 exit 1;
17 }
18
19 while getopts ":p:" o; do
20     case "${o}" in
21         p)
22             p=1
23             PHONE_TYPE=${OPTARG}
24             echo "PHONE_TYPE=$PHONE_TYPE"
25             ;;
26
27         *)
28             usage
29             ;;
30     esac
31 done
32 shift $((OPTIND-1))
33
34 #if [ -z "${p}" ]; then
35 # usage
36 #fi
37
38 # Check ADB connectivity to phone
39 ADB_STATE='adb get-state'
40
41 CONNECTED=0
42 if [[ $ADB_STATE == "device"* ]]; then
43     CONNECTED=1
44 fi
45
46 while [[ $CONNECTED == 0 ]]; do
47     echo "Device not connected through ADB, waiting for connection..."
48     sleep 1
49     ADB_STATE='adb get-state'
50     if [[ $ADB_STATE == "device"* ]]; then
51         CONNECTED=1
52     fi
53 done
54
55 # Connect using the proper method depending on the phone type and
56 # whether it is rooted or not
57 if [[ $PHONE_TYPE == 1 ]]; then
58     ./connect_phone_huawei.sh
59 elif [[ $PHONE_TYPE == 2 ]]; then
60     ./connect_phone_xiaomi.sh
61 fi

```

Listing A.7: connect_phone_huawei.sh

```

1 #!/bin/bash
2 # Jorge Navarro-Ortiz (jorgenavarro@ugr.es), Felix Delgado-Ferro (
3     felixdelgado@ugr.es), University of Granada 2021
4
5 ADB_STATE='adb get-state'
6
7 if [[ $ADB_STATE == "device"* ]]; then

```

```

7
8 CONNECTIVITY_MODE="OFF"
9 AIRPLANE_MODE='adb shell "settings get global airplane_mode_on"'
10 #echo "AIRPLANE_MODE: ${AIRPLANE_MODE}"
11 if [[ ${AIRPLANE_MODE} == "0"* ]]; then
12     CONNECTIVITY_MODE="ON" # Connectivity ON, i.e. AIRPLANE_MODE OFF
13 else
14     CONNECTIVITY_MODE="OFF" # Connectivity OFF, i.e. AIRPLANE_MODE ON
15 fi
16
17 #CONNECTIVITY_MODE='./switch_connectivity_huawei.sh'
18 while [[ $CONNECTIVITY_MODE != "ON"* ]]; do
19     echo "Airplane mode enabled, trying to disable it..."
20     sleep 1
21     CONNECTIVITY_MODE='./switch_connectivity_huawei.sh'
22 done
23
24 # Wi-Fi disconnected
25 adb shell "svc wifi disable"
26
27 echo "Device connected (and Wi-Fi turned off)! Waiting for network
28     connection..."
29
30 # Check mobile network interface ("rmnet_dataX", X is a number that
31     change from one connection to another)
32 CONNECTED=0
33 while [ $CONNECTED -eq 0 ]; do
34     MOBILECONNECTION='adb shell "ip a | grep 'scope global' | cut -d'
35         ' -f 9 | cut -c1-10"'
36     if [[ $MOBILECONNECTION == "rmnet_data"* ]]; then
37         CONNECTED=1
38         INTERFACENAME='adb shell "ip a | grep 'scope global' | cut -d' '
39             -f 9"'
40         IPADDRESS='adb shell "ip a | grep 'scope global' | cut -d' ' -f
41             6"'
42         echo "Mobile connected using interface ${INTERFACENAME} with IP
43             address ${IPADDRESS}"
44     fi
45     sleep 1
46 done
47 else
48     echo "No device connected!"
49     exit 1
50 fi

```

Listing A.8: switch_connectivity_huawei.sh

```

1 #!/bin/bash
2 # Jorge Navarro-Ortiz (jorgenavarro@ugr.es), Felix Delgado-Ferro (
3     felixdelgado@ugr.es), University of Granada 2021
4 adb shell "am start -a android.intent.action.MAIN -c android.intent.
5     category.HOME" > /dev/null 2>&1; sleep 1
6 adb shell "am start -a android.settings.AIRPLANE_MODE_SETTINGS" > /dev
7     /null 2>&1; sleep 1
8 # To check the position when you touch the mobile, use "adb shell
9     getevent -l" and see the values ABS_MT_POSITION_X and
10     ABS_MT_POSITION_Y
11 adb shell "input tap 950 390" > /dev/null 2>&1; sleep 1

```

```
8 AIRPLANE_MODE='adb shell "settings get global airplane_mode_on"'
9 #echo "AIRPLANE MODE: ${AIRPLANE_MODE}"
10 if [[ ${AIRPLANE_MODE} == "0"* ]]; then
11     echo "ON" # Connectivity ON, i.e. AIRPLANE_MODE OFF
12 else
13     echo "OFF" # Connectivity OFF, i.e. AIRPLANE_MODE ON
14 fi
15 adb shell "am start -a android.intent.action.MAIN -c android.intent.
    category.HOME" > /dev/null 2>&1; sleep 1
```

Listing A.9: select_preferred_network_type.sh

```
1 #!/bin/bash
2 # Jorge Navarro-Ortiz (jorgenavarro@ugr.es), Felix Delgado-Ferro (
    felixdelgado@ugr.es), University of Granada 2021
3
4 #####
5 # Parse inputs parameters
6 #####
7
8 # Default values
9 PHONE=1
10
11 usage() {
12     echo "Usage: $0 -n <preferred network type>" 1>&2;
13     echo " E.g.: $0 -n 4";
14     echo "     network type 2 ..... 2G only"
15     echo "     network type 3 ..... Prefer 3G"
16     echo "     network type 4 ..... Prefer 4G"
17     echo "     network type 5 ..... Prefer 5G"
18     exit 1;
19 }
20
21 while getopts ":n:" o; do
22     case "${o}" in
23         n)
24             n=1
25             NETWORK_TYPE=${OPTARG}
26             echo "NETWORK_TYPE=${NETWORK_TYPE}"
27             ;;
28         *)
29             usage
30             ;;
31     esac
32 done
33 shift $((OPTIND-1))
34
35 if [ -z "${n}" ]; then
36     usage
37 fi
38
39 if [[ $NETWORK_TYPE == 2 ]]; then
40     adb shell settings put global preferred_network_mode 1
41     adb shell settings put global preferred_network_mode1 1
42 elif [[ $NETWORK_TYPE == 3 ]]; then
43     adb shell settings put global preferred_network_mode 18
44     adb shell settings put global preferred_network_mode1 18
45 elif [[ $NETWORK_TYPE == 4 ]]; then
46     adb shell settings put global preferred_network_mode 9
```

```

48 adb shell settings put global preferred_network_mode0 9
49 adb shell settings put global preferred_network_mode1 9
50 elif [[ $NETWORK_TYPE == 5 ]]; then
51 adb shell settings put global preferred_network_mode 65
52 adb shell settings put global preferred_network_mode0 65
53 adb shell settings put global preferred_network_mode1 9
54 #echo "Not implemented!"
55 #echo "Execute 'adb shell settings list global | grep preferred' and
    check the value of the corresponding variables, and include
    them in this script!"
56 #exit
57 else
58 echo "Not implemented!"
59 exit
60 fi
61
62 echo "Please remember to put the phone in airplane mode and then in
    normal mode, so that changes take effect"

```

Listing A.10: perform_test.sh

```

1
2 # Perform test
3
4 # Initial test to compare as a function of time
5 echo ""; echo "Initial test"
6 #iperf3 -c ${SERVER} -P 10 -t 10 >> "./TestBackUp/iperf_comp_10-_${
    nombre}.txt"
7 #sleep 3
8 #iperf3 -c ${SERVER} -P 10 -t 50 >> "./TestBackUp/iperf_comp_50-_${
    nombre}.txt"
9
10 # Perform a number of iperf test repetitions
11 ./telegram.sh -m "Start Experiment"
12 for contador in $(seq 1 1 ${REPETITIONS})
13 do
14 echo "Starting test $contador"
15 ./telegram.sh -m "Starting test $contador"
16
17 iperf3 -c ${SERVER} -P 10 >> "./TestBackUp/iperf_${TEST_NAME}.txt"
18 sleep 5
19
20 ping ${SERVER} -c 15 >> "./TestBackUp/ping_${TEST_NAME}.txt"
21 sleep 5
22
23 done
24
25 echo "Test finished"; echo ""
26 ./telegram.sh -m "Experiment Finished"

```

Listing A.11: telegram.sh

```

1 #!/bin/bash
2 # Jorge Navarro-Ortiz (jorgenavarro@ugr.es), Felix Delgado-Ferro (
    felixdelgado@ugr.es), University of Granada 2021
3
4 # Default values
5 BOTINFO="botXXX"
6 CHATID="XXX"

```

```

7
8 usage() {
9     echo "Usage: $0 -m <message> [-b <bot info>] [-c <chat ID>]" 1>&2;
10    echo " E.g.: $0 -m \"test\"";
11    exit 1;
12 }
13
14 while getopts ":m:b:c:" o; do
15     case "${o}" in
16         m)
17             m=1
18             MESSAGE=${OPTARG}
19             echo "MESSAGE=\"$MESSAGE"
20             ;;
21         b)
22             b=1
23             BOTINFO=${OPTARG}
24             echo "BOTINFO=\"$BOTINFO"
25             ;;
26         c)
27             c=1
28             CHATID=${OPTARG}
29             echo "CHATID=\"$CHATID"
30             ;;
31         *)
32             usage
33             ;;
34     esac
35 done
36 shift $((OPTIND-1))
37
38 if [ -z "${m}" ]; then
39     usage
40 fi
41
42 # Send message
43 #MESSAGE="NOTIFICATION:%20Test%20message!!!"
44 wget -qO- --no-check-certificate "https://api.telegram.org/${BOTINFO}/
    sendMessage?chat_id=${CHATID}&text=${MESSAGE}" &> /dev/null

```

Listing A.12: iperf_start.sh

```

1 #!/bin/bash
2 # Jorge Navarro-Ortiz (jorgenavarro@ugr.es), Felix Delgado-Ferro (
   felixdelgado@ugr.es), University of Granada 2021
3
4 adb shell /data/local/tmp/iperf3 -s -D

```

Listing A.13: iperf_stop.sh

```

1 #!/bin/bash
2 # Jorge Navarro-Ortiz (jorgenavarro@ugr.es), Felix Delgado-Ferro (
   felixdelgado@ugr.es), University of Granada 2021
3
4 adb shell kill -9 `pgrep iperf3`

```


Apéndice B

Informe del Análisis

Este anexo presenta la información que la aplicación Perfyzer ofrece al realizar las pruebas de análisis.

```
#####  
#           Analysis IPERF3           #  
#####
```

```
[I] Loading iperf_parsed.csv ...  
[I] Features: Tecnologia,FDD,BW,MIMO,Banda,Camara,Polarizacion,Disp  
[I] Targets: Transf,Throughput,PcktRetr
```

That's all!

```
+++++-----
```

```
#####  
# EDA #  
#####
```

```
[R] Running Exploratory Data Analysis Test ...  
[I] Features have been filtered!  
[I] Targets have been filtered!  
[I] Describe Dataset
```

	BW	Banda	Transf	Throughput	PcktRetr
count	100793.000000	100793.000000	100793.000000	100793.000000	100793.000000
mean	11.954146	17.060203	15.534429	71.516439	177.872888
std	5.939232	16.331752	27.612289	44.743573	310.307289
min	1.400000	1.000000	1.000000	6.720000	0.000000
25%	5.000000	3.000000	4.750000	37.200000	23.000000
50%	10.000000	7.000000	8.500000	67.800000	72.000000
75%	15.000000	38.000000	12.500000	94.700000	169.000000
max	20.000000	41.000000	229.000000	344.000000	5027.000000

[I] Table of Head

	Tecnologia	FDD	BW	MIMO	Banda	Camara	Transf	Throughput	PcktRetr
0	4	1	10.0	2	1	1	24.1	202.0	1248
1	4	1	10.0	2	1	1	11.1	93.3	141
2	4	1	10.0	2	1	1	10.8	90.2	24
3	4	1	10.0	2	1	1	10.6	89.1	12
4	4	1	10.0	2	1	1	11.1	92.8	29

[I] Number of subcategories

Tecnologia	2
FDD	2
BW	5
MIMO	2
Banda	7
Camara	2
Polarizacion	3
Transf	1720
Throughput	1229
PcktRetr	2075

[I] List of Null + NaN

Tecnologia	0
FDD	0
BW	0
MIMO	0
Banda	0
Camara	0
Polarizacion	0
Transf	0
Throughput	0
PcktRetr	0

[I] Analysis of Transf

[I] Coef. Determination of Train: 0.1116917938796197

[I] Coef. Determination of Test: 0.11019249687621835

[I] R2 Score: 0.11019249687621835

[I] MSE: 674.1902492773802

[I] Params

const	15.556220
x1	0.681504
x2	-2.073195
x3	7.571222
x4	3.858265
x5	-0.004449

x6 -0.363335
 x7 -0.348357

[I] Summary

OLS Regression Results

```

=====
Dep. Variable:          Transf      R-squared:                0.099
Model:                  OLS         Adj. R-squared:           0.099
Method:                 Least Squares   F-statistic:              1272.
Date:                   Thu, 07 Jul 2022   Prob (F-statistic):       0.00
Time:                   07:52:53         Log-Likelihood:           -3.7782e+05
No. Observations:      80634           AIC:                      7.557e+05
Df Residuals:          80626           BIC:                      7.557e+05
Df Model:               7
Covariance Type:       nonrobust
=====

```

```

=====
              coef      std err          t      P>|t|      [0.025      0.975]
-----
const          15.5562      0.092     168.443      0.000      15.375      15.737
x1              0.6815      0.099       6.897      0.000       0.488       0.875
x2             -2.0732      0.296      -7.001      0.000      -2.654      -1.493
x3              7.5712      0.093     81.763      0.000       7.390       7.753
x4              3.8583      0.092     41.773      0.000       3.677       4.039
x5             -0.0044      0.292      -0.015      0.988      -0.576       0.567
x6             -0.3633      0.092     -3.932      0.000      -0.544      -0.182
x7             -0.3484      0.092     -3.770      0.000      -0.529      -0.167
=====

```

```

=====
Omnibus:                69366.877   Durbin-Watson:           1.999
Prob(Omnibus):          0.000     Jarque-Bera (JB):       1659908.118
Skew:                   4.250     Prob(JB):                0.00
Kurtosis:               23.538     Cond. No.:               6.29
=====

```

Notes:

[1] Standard Errors assume that the covariance matrix of the errors is specified.

[I] Analysis of Throughput

[I] Coef. Determination of Train: 0.9082467970620075

[I] Coef. Determination of Test: 0.9040798387223954

[I] R2 Score: 0.9040798387223954

[I] MSE: 191.27335716482952

[I] Params

const 71.622675
 x1 2.993209
 x2 -9.438335

```

x3      35.330789
x4      17.818760
x5      -0.071937
x6      -1.695086
x7      -1.236197

```

[I] Summary

OLS Regression Results

```

=====
Dep. Variable:      Throughput      R-squared:      0.820
Model:              OLS              Adj. R-squared: 0.820
Method:             Least Squares    F-statistic:    5.238e+04
Date                Thu, 07 Jul 2022      Prob (F-statistic): 0.00
Time:               07:52:59        Log-Likelihood: -3.5186e+05
No. Observations:  80634           AIC:            7.037e+05
Df Residuals:      80626           BIC:            7.038e+05
Df Model:           7
Covariance Type:   nonrobust
=====

```

```

=====
              coef      std err          t      P>|t|      [0.025      0.975]
-----
const      71.6227      0.067     1070.018      0.000      71.491      71.754
x1          2.9932      0.072      41.797      0.000       2.853       3.134
x2         -9.4383      0.215     -43.978      0.000      -9.859     -9.018
x3         35.3308      0.067     526.425      0.000      35.199      35.462
x4         17.8188      0.067     266.178      0.000      17.688      17.950
x5         -0.0719      0.211      -0.340      0.734      -0.486       0.342
x6         -1.6951      0.067     -25.313      0.000      -1.826     -1.564
x7         -1.2362      0.067     -18.457      0.000      -1.367     -1.105
=====

```

```

=====
Omnibus:          4174.295      Durbin-Watson:      2.002
Prob(Omnibus):    0.000      Jarque-Bera (JB):    16508.976
Skew:             0.009      Prob(JB):            0.00
Kurtosis:         5.217      Cond. No.            6.29
=====

```

Notes:

```

[1] Standard Errors assume the covariance matrix of the errors is specified.
[I] Analysis of PcktRetr
[I] Coef. Determination of Train: 0.03324219330157652
[I] Coef. Determination of Test: 0.0342099286658476
[I] R2 Score: 0.0342099286658476
[I] MSE: 94387.72664061467
[I] Params

```

```

const    177.534576
x1       6.334180
x2      -5.916699
x3      41.485740
x4      12.420786
x5      19.121034
x6       1.427683
x7       1.722586

```

[I] Summary

OLS Regression Results

```

=====
Dep. Variable:          PcktRetr      R-squared:          0.023
Model:                  OLS          Adj. R-squared:     0.023
Method:                 Least Squares  F-statistic:        270.6
Date:                   Thu, 07 Jul 2022  Prob (F-statistic):  0.00
Time:                   07:53:05      Log-Likelihood:     -5.7597e+05
No. Observations:      80634      AIC:                1.152e+06
Df Residuals:          80626      BIC:                1.152e+06
Df Model:                7
Covariance Type:       nonrobust
=====

```

```

=====
              coef      std err          t      P>|t|      [0.025      0.975]
-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----
const         177.5346      1.078      164.660      0.000      175.421      179.648
x1              6.3342      1.154        5.491      0.000         4.073         8.595
x2            -5.9167      3.457       -1.712      0.087       -12.692         0.859
x3            41.4857      1.081      38.375      0.000         39.367        43.605
x4            12.4208      1.078      11.519      0.000         10.307        14.534
x5            19.1210      3.406        5.615      0.000         12.446        25.796
x6              1.4277      1.079        1.324      0.186        -0.686         3.542
x7              1.7226      1.079        1.597      0.110        -0.392         3.837
=====

```

```

=====
Omnibus:                56672.541      Durbin-Watson:          1.991
Prob(Omnibus):           0.000      Jarque-Bera (JB):      826701.103
Skew:                    3.314      Prob(JB):               0.00
Kurtosis:                 17.217      Cond. No.               6.29
=====

```

Notes:

[1] Standard Errors assume that the covariance matrix of the errors is specified.

That's all!


```
#####
# ANOVA - Throughput          #
#   Tecnologia - FDD          #
#   Tecnologia - BW          #
#   Tecnologia - MIMO        #
#   Tecnologia - Banda       #
#   Tecnologia - Camara     #
#   Tecnologia - Polarizacion #
#####
```

```
[R] Running ANOVA: Type Two-way ...
[I] Features have been filtered!
[I] Targets have been filtered!
[I]
```

	sum_sq	df	F	PR(>F)
C(Tecnologia)	1.783323e+06	1.0	921.977838	1.337501e-201
C(FDD)	5.531360e+06	1.0	2859.713204	0.000000e+00
C(Tecnologia):C(FDD)	4.734012e+05	1.0	244.748414	4.210468e-55
Residual	1.949497e+08	100789.0	NaN	NaN

```
[I] 0.8539115105012681
[I] 0.2487971149802055
[I]
```

	group1	group2	Diff	Lower	Upper	q-value	p-value
0	4	5	7.050608	6.383439	7.717777	29.29268	0.001

```
[I]
```

	group1	group2	Diff	Lower	Upper	q-value	p-value
0	(4, 1)	(4, 2)	13.369540	12.481565	14.257516	54.702164	0.001
1	(4, 1)	(5, 1)	15.393829	14.196921	16.590737	46.727756	0.001
2	(4, 1)	(5, 2)	8.880186	7.683182	10.077189	26.953527	0.001
3	(4, 2)	(5, 1)	28.763369	27.431555	30.095184	78.466644	0.001
4	(4, 2)	(5, 2)	4.489355	3.157454	5.821255	12.246196	0.001

```
[I] Param W: 0.9473541975021362
```

That's all!

```
+++++-----
```

```
[R] Running ANOVA: Type Two-way ...
[I] Features have been filtered!
[I] Targets have been filtered!
[I]
```

	sum_sq	df	F	PR(>F)
--	--------	----	---	--------

```

C(Tecnologia)      -5.226411e-05      1.0 -6.809246e-08  1.000000
C(BW)              5.724384e+07      4.0  1.864508e+04  0.000000
C(Tecnologia):C(BW) 5.581361e+03      4.0  1.817924e+00  0.177564
Residual           7.735560e+07  100783.0      NaN      NaN

```

```
[I] 0.8539115105012681
```

```
[I] 0.2487971149802055
```

```
[I]
```

```

      group1 group2      Diff      Lower      Upper      q-value p-value
0         4       5  7.050608  6.630333  7.470883  46.500923   0.001

```

```
[I]
```

```

      group1      group2      Diff      Lower      Upper      q-value      p-value
0 (4, 10.0) (4, 15.0)  28.527547  27.622144  29.432950  140.976039  0.001000
1 (4, 10.0) (4,  1.4)  50.245001  48.822126  51.667876  157.997013  0.001000
2 (4, 10.0) (4, 20.0)  56.310088  55.403769  57.216408  277.989048  0.001000
3 (4, 10.0) (4,  5.0)  31.274834  30.371557  32.178111  154.916152  0.001000
4 (4, 10.0) (5, 10.0)   1.250791  -0.114213   2.615796   4.099902  0.105802

```

```
[I] Param W: 0.957427442073822
```

That's all!

```
+++++
```

```
[R] Running ANOVA: Type Two-way ...
```

```
[I] Features have been filtered!
```

```
[I] Targets have been filtered!
```

```
[I]
```

```

                                sum_sq      df      F      PR(>F)
C(Tecnologia)      7.940243e+05      1.0    479.040602  6.108847e-106
C(MIMO)            3.326767e+07      1.0  20070.623905  0.000000e+00
C(Tecnologia):C(MIMO) 6.259770e+05      1.0    377.656474  5.744554e-84
Residual           1.670608e+08  100789.0      NaN      NaN

```

```
[I] 0.8539115105012681
```

```
[I] 0.2487971149802055
```

```
[I]
```

```

      group1 group2      Diff      Lower      Upper      q-value p-value
0         4       5  7.050608  6.433002  7.668215  31.643396   0.001

```

```
[I]
```

```

      group1      group2      Diff      Lower      Upper      q-value      p-value
0 (4,  2) (4,  1)  33.769898  33.028777  34.511018  165.550246  0.001000
1 (4,  2) (5,  2)  13.030724  11.884907  14.176540   41.318307  0.001000
2 (4,  2) (5,  1)  32.986468  31.840566  34.132370  104.586914  0.001000
3 (4,  1) (5,  2)  46.800621  45.656813  47.944429  148.657715  0.001000
4 (4,  1) (5,  1)   0.783430  -0.360464   1.927324   2.488303  0.293283

```

```
[I] Param W: 0.9816075563430786
```

That's all!

+++++

[R] Running ANOVA: Type Two-way ...

[I] Features have been filtered!

[I] Targets have been filtered!

[I]

	sum_sq	df	F	PR(>F)
C(Tecnologia)	NaN	1.0	NaN	NaN
C(Banda)	3.478487e+07	6.0	3017.512414	0.000000
C(Tecnologia):C(Banda)	2.677654e+05	6.0	23.228069	0.000001
Residual	1.936340e+08	100784.0	NaN	NaN

[I] 0.8539115105012681

[I] 0.2487971149802055

[I]

	group1	group2	Diff	Lower	Upper	q-value	p-value
0	4	5	7.050608	6.385678	7.715538	29.391301	0.001

[I]

	group1	group2	Diff	Lower	Upper	q-value	p-value
0	(4, 1)	(4, 20)	3.089155	1.131036	5.047275	7.482685	0.001
1	(4, 1)	(4, 3)	4.978465	3.019388	6.937542	12.053158	0.001
2	(4, 1)	(4, 5)	11.497660	9.539291	13.456029	27.846579	0.001
3	(4, 1)	(4, 7)	12.384184	10.424982	14.343386	29.980928	0.001
4	(4, 1)	(4, 38)	20.205010	18.224031	22.185990	48.376675	0.001

[I] Param W: 0.9522644281387329

That's all!

+++++

[R] Running ANOVA: Type Two-way ...

[I] Features have been filtered!

[I] Targets have been filtered!

[I]

	sum_sq	df	F	PR(>F)
C(Tecnologia)	8.348292e+05	1.0	419.188517	5.672095e-93
C(Camara)	2.048242e+05	1.0	102.847313	3.718055e-24
C(Tecnologia):C(Camara)	2.466403e+04	1.0	12.384425	4.331207e-04
Residual	2.007250e+08	100789.0	NaN	NaN

[I] 0.8539115105012681

[I] 0.2487971149802055

[I]

	group1	group2	Diff	Lower	Upper	q-value	p-value
0	4	5	7.050608	6.373629	7.727587	28.868198	0.001

[I]

	group1	group2	Diff	Lower	Upper	q-value	p-value
0	(4, 1)	(4, 2)	3.360747	2.548319	4.173175	15.029343	0.001
1	(4, 1)	(5, 1)	5.860018	4.606988	7.113049	16.991289	0.001
2	(4, 1)	(5, 2)	4.930355	3.677418	6.183291	14.296776	0.001
3	(4, 2)	(5, 1)	9.220765	7.963837	10.477694	26.652958	0.001
4	(4, 2)	(5, 2)	8.291101	7.034267	9.547936	23.967519	0.001

[I] Param W: 0.9348531365394592

That's all!

+++++

[R] Running ANOVA: Type Two-way ...

[I] Features have been filtered!

[I] Targets have been filtered!

[I]

	sum_sq	df	F	PR(>F)
C(Tecn)	8.290566e+05	1.0	416.728869	1.936038e-92
C(Polarizacion)	3.494525e+05	2.0	87.826899	7.770730e-39
C(Tecn):C(Polarizacion)	9.543040e+04	2.0	23.984249	3.857010e-11
Residual	2.005096e+08	100787.0	NaN	NaN

[I] 0.8539115105012681

[I] 0.2487971149802055

[I]

	group1	group2	Diff	Lower	Upper	q-value	p-value
0	4	5	7.050608	6.373986	7.72723	28.883413	0.001

[I]

	group1	group2	Diff	Lower	Upper	q-value	p-value
0	(4, 1)	(4, 2)	2.772045	1.672358	3.871731	10.158955	0.001
1	(4, 1)	(4, 3)	3.001832	1.902649	4.101015	11.006117	0.001
2	(4, 1)	(5, 1)	6.101287	4.402150	7.800424	14.471411	0.001
3	(4, 1)	(5, 2)	7.481895	5.782854	9.180936	17.747025	0.001
4	(4, 1)	(5, 3)	7.336873	5.637736	9.036010	17.402050	0.001

[I] Param W: 0.9357928037643433

That's all!

+++++

```
#####
# Análisis Ping      #
#####
```

```
[I] Loading rtt_parsed.csv ...
[I] Features: Tecnologia,FDD,BW,MIMO,Banda,Camara,Polarizacion,Disp
[I] Targets: Ptx,Prx,Pl,Time,RTTmin,RTTavg,RTTmax,RTTmdev
```

That's all!

```
+++++-----
```

```
#####
# EDA      #
#####
```

```
[R] Running Exploratory Data Analysis Test ...
[I] Features have been filtered!
[I] Targets have been filtered!
[I] Describe Dataset
```

	BW	Banda	Polarizacion	Pl	RTTmin
count	9990.000000	9990.000000	9990.000000	9990.000000	9990.000000
mean	11.156156	16.207207	1.984985	0.117017	19.542557
std	6.366272	16.013062	0.819459	1.578849	3.043410
min	1.400000	1.000000	1.000000	0.000000	11.385000
25%	5.000000	3.000000	1.000000	0.000000	18.905000
50%	10.000000	7.000000	2.000000	0.000000	19.085000
75%	15.000000	38.000000	3.000000	0.000000	20.950000
max	20.000000	41.000000	3.000000	66.000000	39.972000

```
[I] Table of Head
```

	Tecnologia	FDD	BW	MIMO	Banda	Camara	Polarizacion	Pl	RTTmin	RTTavg	RTTmax
0	4	1	10.0	2	1	1	1	6	24.979	30.097	36.568
1	4	1	10.0	2	1	1	1	0	15.982	25.526	36.992
2	4	1	10.0	2	1	1	1	0	17.946	23.296	36.756
3	4	1	10.0	2	1	1	1	0	15.975	23.839	37.017
4	4	1	10.0	2	1	1	1	13	18.023	24.679	37.045

```
[I] Number of subcategories
```

Tecnologia	2
FDD	2
BW	5
MIMO	2
Banda	7
Camara	2
Polarizacion	3

Covariance Type:		nonrobust				
	coef	std err	t	P> t	[0.025	0.975]
const	0.1204	0.018	6.510	0.000	0.084	0.157
x1	-0.0331	0.020	-1.671	0.095	-0.072	0.006
x2	0.0970	0.056	1.723	0.085	-0.013	0.207
x3	0.0265	0.019	1.413	0.158	-0.010	0.063
x4	-0.0046	0.018	-0.248	0.804	-0.041	0.032
x5	-0.1397	0.055	-2.530	0.011	-0.248	-0.031
x6	-0.0635	0.018	-3.435	0.001	-0.100	-0.027
x7	-0.0523	0.018	-2.829	0.005	-0.089	-0.016
Omnibus:		18701.437	Durbin-Watson:		1.992	
Prob(Omnibus):		0.000	Jarque-Bera (JB):		150495323.260	
Skew:		23.310	Prob(JB):		0.00	
Kurtosis:		673.645	Cond. No.		6.00	

Notes:

[1] Standard Errors assume that the covariance matrix of the errors is specified.

[I] Analysis of RTTmin

[I] Coef. Determination of Train: 0.3107346384138895

[I] Coef. Determination of Test: 0.2785624539332793

[I] R2 Score: 0.2785624539332793

[I] MSE: 7.011696685282306

[I] Params

const	19.519613
x1	-0.091556
x2	0.806585
x3	0.986232
x4	0.198878
x5	-0.122212
x6	0.047103
x7	0.037162

[I] Summary

OLS Regression Results

Dep. Variable:	RTTmin	R-squared:	0.180
Model:	OLS	Adj. R-squared:	0.180
Method:	Least Squares	F-statistic:	250.9
Date:	Thu, 07 Jul 2022	Prob (F-statistic):	0.00
Time:	08:46:33	Log-Likelihood:	-19389.

No. Observations: 7992 AIC: 3.879e+04
 Df Residuals: 7984 BIC: 3.885e+04
 Df Model: 7
 Covariance Type: nonrobust

	coef	std err	t	P> t	[0.025	0.975]
const	19.5196	0.031	637.070	0.000	19.460	19.580
x1	-0.0916	0.033	-2.793	0.005	-0.156	-0.027
x2	0.8066	0.093	8.645	0.000	0.624	0.989
x3	0.9862	0.031	31.777	0.000	0.925	1.047
x4	0.1989	0.031	6.490	0.000	0.139	0.259
x5	-0.1222	0.091	-1.336	0.182	-0.302	0.057
x6	0.0471	0.031	1.537	0.124	-0.013	0.107
x7	0.0372	0.031	1.212	0.225	-0.023	0.097

Omnibus: 3057.194 Durbin-Watson: 1.990
 Prob(Omnibus): 0.000 Jarque-Bera (JB): 26154.198
 Skew: 1.598 Prob(JB): 0.00
 Kurtosis: 11.266 Cond. No. 6.00

Notes:

[1] Standard Errors assume the covariance matrix of the errors is specified.

That's all!

+++++

 # FI -P1 #
 #####

+++++

[R] Running Feature Importance Analysis: Type SHAP ...
 [I] Features have been filtered!
 [I] Targets have been filtered!
 [I] -- Global Interpretability --
 [I] -- Local Interpretability --

That's all!

+++++

 # FI - RTTmin #

#####

```

+-----+
[R] Running Feature Importance Analysis: Type SHAP ...
[I] Features have been filtered!
[I] Targets have been filtered!
[I] -- Global Interpretability --
[I] -- Local Interpretability --
    
```

That's all!

+-----+

#####

```

# ANOVA - RTTmin #
# Tecnologia - FDD #
# Tecnologia - BW #
# Tecnologia - MIMO #
# Tecnologia - Banda #
# Tecnologia - Camara #
# Tecnologia - Polarizacion #
#####
    
```

```

[R] Running ANOVA: Type Two-way ...
[I] Features have been filtered!
[I] Targets have been filtered!
[I]
    
```

	sum_sq	df	F	PR(>F)
C(Tecnologia)	0.342373	1.0	0.039640	8.421905e-01
C(FDD)	5876.207687	1.0	680.345749	3.794301e-145
C(Tecnologia):C(FDD)	142.034042	1.0	16.444663	5.047156e-05
Residual	86249.984033	9986.0	NaN	NaN

```

[I] 0.8704503949814597
[I] 5.666684761619981
[I]
    
```

	group1	group2	Diff	Lower	Upper	q-value	p-value
0	4	5	0.404134	0.257856	0.550412	7.658813	0.001

```

[I]
    
```

	group1	group2	Diff	Lower	Upper	q-value	p-value
0	(4, 1)	(4, 2)	1.857845	1.664898	2.050791	34.988685	0.001000
1	(4, 1)	(5, 1)	0.260009	-0.002439	0.522456	3.599982	0.053271
2	(4, 1)	(5, 2)	1.494448	1.232000	1.756896	20.691571	0.001000
3	(4, 2)	(5, 1)	1.597836	1.302629	1.893043	19.668052	0.001000
4	(4, 2)	(5, 2)	0.363396	0.068190	0.658603	4.473112	0.008521

[I] Param W: 0.7543556094169617

That's all!

+++++

[R] Running ANOVA: Type Two-way ...

[I] Features have been filtered!

[I] Targets have been filtered!

[I]

	sum_sq	df	F	PR(>F)
C(Tecnologia)	-4.016050e-10	1.0	-5.071118e-11	1.000000e+00
C(BW)	5.789798e+03	4.0	1.827713e+02	2.115067e-151
C(Tecnologia):C(BW)	3.022176e+00	4.0	9.540353e-02	7.574234e-01
Residual	7.904409e+04	9981.0	NaN	NaN

[I] 0.8704503949814597

[I] 5.666684761619981

[I]

	group1	group2	Diff	Lower	Upper	q-value	p-value
0	4	5	0.404134	0.264065	0.544204	7.998297	0.001

[I]

	group1	group2	Diff	Lower	Upper	q-value	p-value
0	(4, 10.0)	(4, 15.0)	0.427662	0.123464	0.731860	6.291521	0.001000
1	(4, 10.0)	(4, 1.4)	2.717969	2.383018	3.052920	36.314098	0.001000
2	(4, 10.0)	(4, 20.0)	0.668080	0.364238	0.971922	9.839930	0.001000
3	(4, 10.0)	(4, 5.0)	1.551458	1.248056	1.854859	22.884119	0.001000
4	(4, 10.0)	(5, 10.0)	0.394952	-0.064744	0.854648	3.844897	0.166326

[I] Param W: 0.8881739377975464

That's all!

+++++

[R] Running ANOVA: Type Two-way ...

[I] Features have been filtered!

[I] Targets have been filtered!

[I]

	sum_sq	df	F	PR(>F)
C(Tecnologia)	252.099865	1.0	27.411707	1.677761e-07
C(MIMO)	382.164774	1.0	41.554122	1.199494e-10
C(Tecnologia):C(MIMO)	46.859446	1.0	5.095193	2.401376e-02
Residual	91839.201543	9986.0	NaN	NaN

[I] 0.8704503949814597

[I] 5.666684761619981

[I]

	group1	group2	Diff	Lower	Upper	q-value	p-value
--	--------	--------	------	-------	-------	---------	---------

```
0      4      5  0.404134  0.253191  0.555078  7.422102  0.001
```

```
[I]
```

	group1	group2	Diff	Lower	Upper	q-value	p-value
0	(4, 2)	(4, 1)	0.457995	0.284511	0.631478	9.593088	0.001000
1	(4, 2)	(5, 2)	0.229181	-0.050767	0.509129	2.974796	0.152048
2	(4, 2)	(5, 1)	0.118823	-0.161125	0.398770	1.542332	0.673014
3	(4, 1)	(5, 2)	0.687176	0.407494	0.966857	8.928119	0.001000
4	(4, 1)	(5, 1)	0.576817	0.297136	0.856498	7.494290	0.001000

```
[I] Param W: 0.8627219796180725
```

```
That's all!
```

```
+++++
```

```
[R] Running ANOVA: Type Two-way ...
```

```
[I] Features have been filtered!
```

```
[I] Targets have been filtered!
```

```
[I]
```

	sum_sq	df	F	PR(>F)
C(Tecnologia)	NaN	1.0	NaN	NaN
C(Banda)	13239.724018	6.0	256.545648	4.976341e-57
C(Tecnologia):C(Banda)	46.381513	6.0	0.898733	3.431446e-01
Residual	85849.364585	9981.0	NaN	NaN

```
[I] 0.8704503949814597
```

```
[I] 5.666684761619981
```

```
[I]
```

	group1	group2	Diff	Lower	Upper	q-value	p-value
0	4	5	0.404134	0.258159	0.550109	7.67474	0.001

```
[I]
```

	group1	group2	Diff	Lower	Upper	q-value	p-value
0	(4, 1)	(4, 20)	0.307018	-0.093388	0.707424	3.637618	0.360338
1	(4, 1)	(4, 3)	0.594759	0.194352	0.995165	7.046840	0.001000
2	(4, 1)	(4, 5)	0.013044	-0.387363	0.413450	0.154543	0.900000
3	(4, 1)	(4, 7)	0.157135	-0.243271	0.557541	1.861775	0.900000
4	(4, 1)	(4, 38)	1.408213	0.988145	1.828281	15.903884	0.001000

```
[I] Param W: 0.7652291059494019
```

```
That's all!
```

```
+++++
```

```
[R] Running ANOVA: Type Two-way ...
```

```
[I] Features have been filtered!
```

```
[I] Targets have been filtered!
```

```
[I]
```

	sum_sq	df	F	PR(>F)
C(Tecnologia)	252.765686	1.0	27.367534	1.716418e-07
C(Camara)	5.279554	1.0	0.571630	4.496299e-01
C(Tecnologia):C(Camara)	32.564473	1.0	3.525832	6.044862e-02
Residual	92230.381736	9986.0	NaN	NaN

[I] 0.8704503949814597

[I] 5.666684761619981

[I]

	group1	group2	Diff	Lower	Upper	q-value	p-value
0	4	5	0.404134	0.25287	0.555399	7.406346	0.001

[I]

	group1	group2	Diff	Lower	Upper	q-value	p-value
0	(4, 1)	(4, 2)	0.101699	-0.072182	0.275579	2.125300	0.437285
1	(4, 1)	(5, 1)	0.548093	0.268177	0.828010	7.115099	0.001000
2	(4, 1)	(5, 2)	0.359983	0.080066	0.639900	4.673136	0.005283
3	(4, 2)	(5, 1)	0.446395	0.165476	0.727314	5.774225	0.001000
4	(4, 2)	(5, 2)	0.258285	-0.022634	0.539204	3.340972	0.084649

[I] Param W: 0.8553464412689209

That's all!

+++++

[R] Running ANOVA: Type Two-way ...

[I] Features have been filtered!

[I] Targets have been filtered!

[I]

	sum_sq	df	F	PR(>F)
C(Tecn)	252.884071	1.0	27.391681	1.695184e-07
C(Polarizacion)	12.953317	2.0	0.701533	4.958490e-01
C(Tecn):C(Polarizacion)	81.499122	2.0	4.413876	1.213179e-02
Residual	92173.773324	9984.0	NaN	NaN

[I] 0.8704503949814597

[I] 5.666684761619981

[I]

	group1	group2	Diff	Lower	Upper	q-value	p-value
0	4	5	0.404134	0.252901	0.555367	7.407878	0.001

[I]

	group1	group2	Diff	Lower	Upper	q-value	p-value
0	(4, 1)	(4, 2)	0.057915	-0.177225	0.293055	0.992797	0.900000
1	(4, 1)	(4, 3)	0.134355	-0.100785	0.369495	2.303151	0.568387
2	(4, 1)	(5, 1)	0.446624	0.067060	0.826188	4.742972	0.010383
3	(4, 1)	(5, 2)	0.603033	0.223469	0.982598	6.403979	0.001000
4	(4, 1)	(5, 3)	0.237765	-0.141800	0.617329	2.524967	0.476255

[I] Param W: 0.8565791845321655

That's all!

+++++