ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA

Trabajo Fin de Máster

Desarrollo de un entorno de análisis de rendimiento del core 5G con backhaul imperfecto

(Development of a performance analysis framework for the 5G core with imperfect backhaul)

Para acceder al Título de

Máster Universitario en Ingeniería de Telecomunicación

Autor: Jairo Suárez Rodríguez

Julio - 2024

UC | ETS de Ingenieros Industriales y de Telecomunicación

MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA DE TELECOMUNICACIÓN

CALIFICACIÓN DEL TRABAJO FIN DE MÁSTER

Realizado por: Jairo Suárez Rodríguez

Director del TFM: Luis Francisco Díez Fernández

Título: "Desarrollo de un entorno de análisis de rendimiento del core 5G con backhaul imperfecto"

Title: "Development of a performance analysis framework for the 5G core with imperfect backhaul"

Presentado a examen el día: 29 de Julio de 2024

para acceder al Título de

MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA DE TELECOMUNICACIÓN

Composición del Tribunal:

Presidente (Apellidos, Nombre): Agüero Calvo, Ramón

Secretario (Apellidos, Nombre): Sánchez González, Luis

Vocal (Apellidos, Nombre): Sánchez Espeso, Pablo Pedro

Este Tribunal ha resuelto otorgar la calificación de: .....

Fdo: El Presidente

Fdo: El Secretario

Fdo: El Vocal

Fdo: El director del TFM
(sólo si es distinto del Secretario)

VºBº del Subdirector

Trabajo Fin de Máster Nº
(a asignar por la Secretaría)

Agradecimientos

A mis profesores por la profesionalidad, la eficacia y el talento para enseñar. En especial a mi tutor Luis Diez por su paciencia y dedicación conmigo.

A mis amigos por apoyarme y ayudarme cuando lo he necesitado.

A mis padres, por ser mis ejemplos para seguir, por apoyarme en todas mis decisiones y por ser los pilares fundamentales de mi vida.

Y, por último, a las personas que ya no están aquí con nosotros, que están cuidándome desde donde estén y siempre me han apoyado y animado, en especial mi abuela Tina, mi tío Emilio y mi tía Mariví.

Resumen

Actualmente, las tecnologías 5G están siendo desplegadas y se está estudiando su rendimiento en entornos reales. Asimismo, cada vez es más frecuente encontrar propuestas de despliegues en entornos novedosos diferentes a los despliegues tradicionales de operadores, tales como drones desplazándose en vuelo o entornos industriales. A pesar de ser una tecnología relativamente madura e instaurada a nivel de telefonía móvil, todavía se están estudiando sus características y capacidades en este tipo de entornos para otorgarles cobertura celular en ambientes poco controlados y potencialmente más agresivos. Para poder brindar estos servicios, es necesario comprobar el rendimiento de la red bajo distintas condiciones mediante la realización de simulaciones y emulaciones que permitan aproximar el comportamiento de esta a la casuística real. Las redes 5G comprenden tanto tecnologías de estaciones base y dispositivos móviles encontrados en el entorno como tecnologías de comunicaciones para poder interconectar de manera eficaz estos dispositivos con el núcleo de la red o tecnologías de gestión de datos para poder procesar e interpretar los datos intercambiados a lo largo de la misma. Como se ha indicado, la red 5G agrupa toda la parte de dispositivos electrónicos y gestión de las comunicaciones, pero también está compuesta por la red de retorno ("*backhaul*", por su significado en inglés), componente clave en esta clase de comunicaciones para el intercambio de datos con el núcleo de la red alojado en los correspondientes servidores. En este sentido, resulta necesario estudiar los comportamientos de los diferentes segmentos de red en los nuevos entornos que se están estudiando, teniendo en cuenta parámetros de importancia para el correcto flujo de tráfico entre los usuarios y el núcleo de la red (p.ej. número de usuarios, ancho de banda del canal, tasas de pérdidas, etc.).

En este trabajo se ha acometido el despliegue de un núcleo 5G y se ha analizado el rendimiento esperado ante situaciones de *backhaul* imperfecto característico de algunas topologías propuestas. El objetivo es analizar con detalle el funcionamiento y los principales parámetros de comportamiento de las comunicaciones basadas en esta tecnología. Además, se busca evaluar la red bajo distintas condiciones de estudio previamente planificadas. También se busca medir parámetros de rendimiento como tasas binarias por usuario y tasas de errores por comunicación y su dependencia de aspectos como el ancho de banda de canal, la tasa de pérdidas asociada al mismo o el número de usuarios conectados en ese momento.

Abstract

5G technologies are currently being deployed and their performance in real environments is being studied. Likewise, it is increasingly common to find proposals for deployments in novel environments different from the traditional ones of operators, such as drones moving in flight or industrial environments. Despite being a relatively mature technology established at the mobile telephony level, its characteristics and capabilities in this type of environment are still being studied to provide cellular coverage in poorly controlled and potentially more aggressive environments. In order to provide these services, it is necessary to check the performance of the network under different conditions by carrying out simulations and emulations that allow its behavior to approximate the real situation. 5G networks comprise both base station technologies and mobile devices found in the environment, as well as communications technologies to be able to effectively interconnect these devices with the core of the network or data management technologies to be able to process and interpret the data exchanged through throughout it. As indicated, the 5G network brings together all the electronic devices and communications management, but it is also made up of the backhaul network, a key component in this type of communications for the exchange of data with the core of the network hosted on the corresponding servers. In this sense, it is necessary to study the behaviors of the different network segments in the new environments that are being studied, considering relevant parameters for the correct flow of traffic between users and the core of the network (e.g. number of users, channel bandwidth, loss rates, etc.).

In this work, the deployment of a 5G core has been undertaken and the expected performance in situations of imperfect backhaul conditions of some proposed topologies has been analyzed. The objective is to study in detail the operation and the main behavioral parameters of communications based on this technology. In addition, the aim is to evaluate the network under different conditions that may appear in new scenarios. It also seeks to measure performance parameters such as binary rates per user and error rates per communication and their dependence on aspects such as channel bandwidth, the loss rate associated with it or the number of users connected at that moment.

Índice general

Índice de figuras

Índice de tablas

Lista de acrónimos

3GPP – 3rd Generation Partnership Project
AF – Application Function
AMF – Access and Mobility Management Function
AUSF – Authentication Server Function
CoMP – Coordinated multiple point transmission and reception
eMBB – Enhanced Mobile Broadband
eNodeB – evolved NodeB
EPC – Evolved Packet Core
E-UTRAN – evolved UMTS Terrestrial Radio Access Network
FWA – Fixed Wireless Access
GHz – Gigaherzios
gNB – Next Generation Node B
GPRS – General Packet Radio Service
GTP – GPRS Tunnelling Protocol
HSS – Home Subscriber Server
ICMP – Internet Control Message Protocol
IE - Information Element
IoT – Internet of Things
ITU – International Telecommunications Union
JSON - JavaScript Object Notation
LTE – Long Term Evolution
M2M – Machine-to-Machine
MCC – Mobile Country Code
MIMO – Multiple Inputs Multiple Outputs
MME – Mobility Management Entity
mMTC – Massive Machine-Type Communication
mmWave – milimetric Wave
MNC – Mobile Network Code
MSISDN - Mobile Station Integrated Services Digital Network
NAS – Non-Access Stratum
NAS-MM – NAS Mobility Management
NAS-SM – NAS Session Management
NEF – Network Exposure Function
NF – Network Function
NGAP – New Generation Application Protocol
NG-RAN – New Generation Radio Access Network
NPN – Non-Public Network
NRF – Network Repository Function
NSA – Non-Standard Alone
OFDM – Orthogonal Frequency Division Multiplexing
PCF – Policy Control Function
PCRF – Policy and Charging Rules Function
PDN – Packet Data Network
PDU – Protocol Data Unit
PGW – Packet Gateway
PLMN – Public Land Mobile Network
PNI-NPN – Public Network Integrated NPN

QoS – Quality of Service
RAN – Radio Access Network
SA – Standard Alone
SBA – Service-Based Architecture
SCTP – Stream Control Transmission Protocol
SGW – Serving Gateway
SIM – Subscriber Identity Module
SMF – Session Management Function
SNPN – Standalone Non-Public Network
SON – Self-Optimizing Networks
TCP – Transmission Control Protocol
TEID – Tunnel Endpoint ID
UAS – Unmanned Aerial Systems
UAV – Unmanned Aerial Vehicles
UDM – Unified Data Management
UDP – User Datagram Protocol
UE – User Equipment
UMTS – Universal Mobile Telecommunications Systems
uRLLC – Ultrareliable and Low-Latency Communication
UWB – Ultra Wide Band

Capítulo 1

Introducción

1.1. Motivación

Las redes 5G están concebidas como infraestructuras extremadamente flexibles y altamente programables. Por ello, cada vez es más común encontrar esta tecnología en la vida diaria. Esto se debe principalmente a las capacidades y servicios que brinda, lo que le permite adaptarse a una amplia gama de situaciones en el campo de las telecomunicaciones. Por un lado, esto se está traduciendo en un crecimiento en el número de dispositivos conectados a las redes, lo que conlleva un aumento exponencial en el tráfico generado hacia la red y, por ello, su consecuente tratamiento. A su vez, se está dando un aumento de nuevos casos de uso, los cuales requieren de una red móvil con un rendimiento superior para un correcto funcionamiento.

Analizándolas, la experiencia demuestra que cada vez es mayor la cantidad de datos generada o consumida por los usuarios de las redes celulares (p. ej. descarga de contenido visual en alta definición) y que, en áreas escasamente pobladas o directamente inhabitadas, proporciona rendimiento muy inferior a los obtenidos en las ciudades. En este sentido, en el reporte anual sobre Internet realizado por Cisco entre 2018 y 2023 [1] se estimó que, en 2023, los dispositivos y conexiones 5G representaron más del 10% de los dispositivos móviles globales y conexiones y las velocidades 5G fueron 13 veces mayores que las conexiones móviles promedio. En la Figura 1 se muestran los resultados obtenidos de un estudio realizado por Cisco [1] que mide el número de dispositivos o conexiones celulares realizadas entre 2018 y 2023. Se puede observar el crecimiento de las tecnologías 5G a partir del año 2021, por lo que la implementación de la tecnología 5G está creciendo mientras que las otras tecnologías celulares decaen o su crecimiento se detiene.

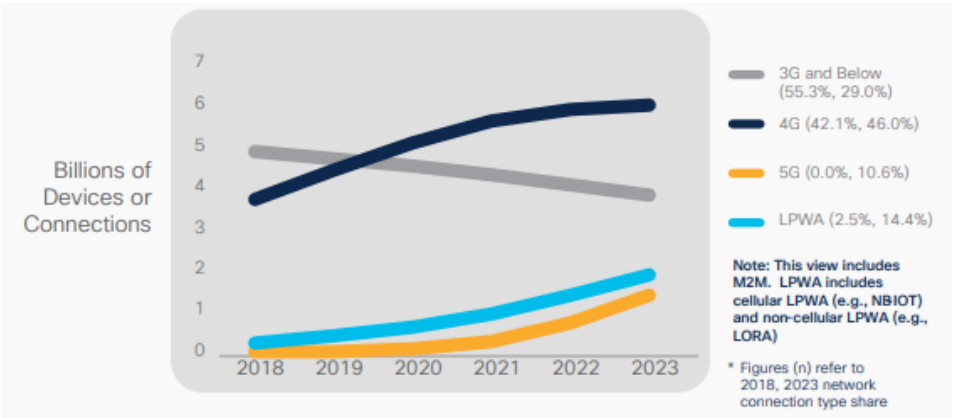

Figura 1. Crecimiento global de dispositivos y conexiones móviles entre 2018 y 2023. [1]

Además, en la Figura 2 también se adjunta una gráfica del mismo estudio que muestra la variación de las velocidades medias de los dispositivos celulares entre 2018 y 2023. A pesar de que se muestran varias tecnologías, destacan los sistemas 5G por las altas velocidades que están ofreciendo en comparación con las que existían hasta ese momento.

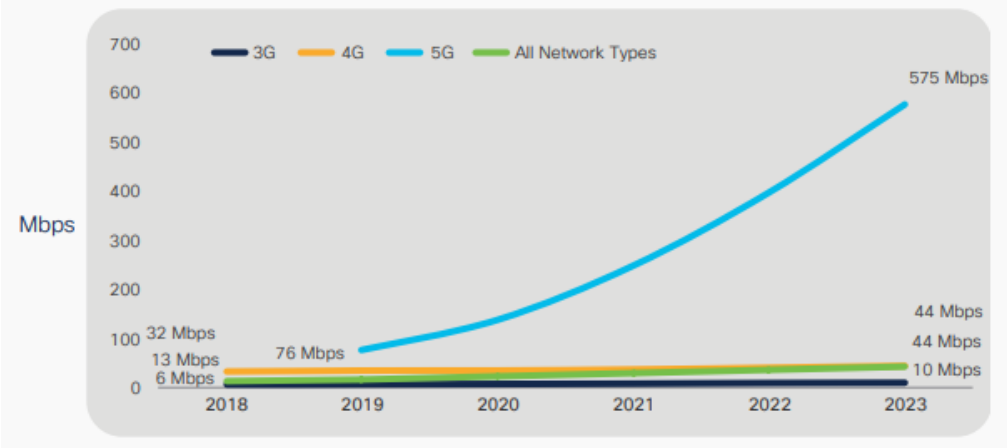

Figura 2. Velocidades promedio móviles globales por tipo de red. [1]

En definitiva, si se relacionan el primer caso (incremento de dispositivos y conexiones 5G) y el segundo (incremento de velocidades en 5G), se puede confirmar que la cantidad de datos transmitidos en las redes celulares está aumentando y que esta tendencia continuará en el futuro. La experiencia también demuestra que la calidad de un mismo servicio puede variar dependiendo del número de usuarios conectados a la red (p. ej. conciertos en estadios que agrupan una gran cantidad de personas conectadas simultáneamente). Esto se debe a la congestión de la red, donde los usuarios conectados comparten la capacidad de la red, la cual es limitada. El problema que acarrea esto es la insatisfacción de utilizar servicios ya establecidos a nivel global, pero que, a causa de la red, tienen una menor calidad. Una solución posible sería invertir y expandir la infraestructura de red ya desplegada, comprando equipamiento de red más caro. Sin embargo, esto provocaría un aumento en los costes para los usuarios, los cuales en su mayoría no están dispuestos a pagar unas tarifas mayores para compensar esta inversión. Además, la definición actual de calidad de servicio (QoS – Quality of Service) podría moldearse en la siguiente regla: mayores velocidades de transmisión equivalen a una calidad de servicio mejor. Sin embargo, esta no es la única regla para el caso del tráfico generado por los servicios emergentes, ya que se tienen en cuenta otros parámetros de importancia como lo son la latencia y la fiabilidad. Finalmente, la definición actual de calidad de servicio y comportamiento de la red dependerá exclusivamente del servicio específico al que dará cobertura, conociéndose esto como red orientada al servicio (“service-oriented”, por su significado en inglés), siendo la quinta generación de redes móviles la adecuada para llevar a cabo esta labor. [2]

Por otro lado, junto con el despliegue de las redes 5G, ha aparecido el concepto de redes no-públicas (NPN – Non-Public Networks) que está ganando una gran relevancia en varios entornos, tales como los industriales. Se tratan de redes orientadas al uso privado, y que, a pesar de que este concepto ya ha sido implementado en generaciones previas, las especificaciones 5G ofrecen varias configuraciones actualizadas de NPNs. [3]

Como se ha mencionado, una red NPN es una red cuya finalidad es el uso privado. Puede ser desplegada en una variedad de configuraciones donde tanto los elementos físicos como los virtuales pueden ser utilizados. Incluye el concepto de red privada, el cual es un despliegue de red aislado que no interactúa con una red pública, entendida como red que puede ser utilizada por el público (típicamente mediante un contrato). Mientras que existe una amplia variedad de configuraciones de NPNs, el estándar 3GPP TS 22.261 [4] define dos grandes categorías: red no pública independiente (SNPN – Standalone Non-Public Network) y red NPN integrada en red pública (PNI-NPN – Public Network Integrated NPN). Por un lado, se tiene la red SNPN, la cual consiste en una NPN que no depende de las funciones de red proporcionadas por una red móvil terrestre pública (PLMN – Public Land Mobile Network). Una SNPN desplegada de manera aislada se corresponde con el concepto de red de privada e indica que la SNPN conlleva más inversión y compromiso del propietario. Por otro lado, están las redes PNI-NPN, las cuales se refieren a NPNs que han sido desplegadas con el apoyo de una PLMN. Estas redes se pueden implementar como un segmento privado (un segmento de red dedicado por la PLMN para uso exclusivo del propietario), o puede implicar que parte de las redes sean desplegadas por la PLMN y otras por el propietario. [3]

Como se mencionó previamente, los sistemas 5G necesitan adaptarse a una gran variedad de casos de uso, cumpliendo una serie de requisitos que no ofrecían las generaciones celulares anteriores. Por ejemplo, varios casos de uso requieren que los datos utilizados permanezcan dentro de los límites de la organización para proteger la privacidad y resolver problemas de seguridad. En estos casos, varias de las entidades de la red necesitan residir localmente en las instalaciones de la organización y/o ser propiedad de esta. De hecho, los casos de uso no tradicionales (también conocidos como verticales) y las organizaciones que no han utilizado la conectividad móvil para su uso privado tienden a presentar estos requisitos para los que las NPNs pueden ser una solución. [3]

Para estos casos de uso, la NPN debe proveer tres beneficios en términos de rendimiento. En primer lugar, debe brindar una cobertura optimizada para el propietario, ya que la red se implementa para el propósito del propietario y no para el público en general. En segundo lugar, la presencia local de algunas entidades de red, ya que se reduce la distancia física y la cantidad de saltos de red necesarios para el caso de uso, lo que reduce la latencia de la NPN. Finalmente, la presencia local reduce la incertidumbre del funcionamiento de red, ya que la interrupción (p. ej. corte o falla) de las entidades correspondientes se puede gestionar/resolver internamente. Hay que tener en cuenta que los beneficios pueden no resultar significativos (o inexistentes) según la arquitectura de la implementación. En la Figura 3 se adjunta un diagrama esquemático de comparación de configuraciones NPN. En ella, se pueden observar los tipos de redes NPN anteriormente mencionados, así como los componentes que se encuentran en la red pública o en la red privada de cada uno de los esquemas de red.

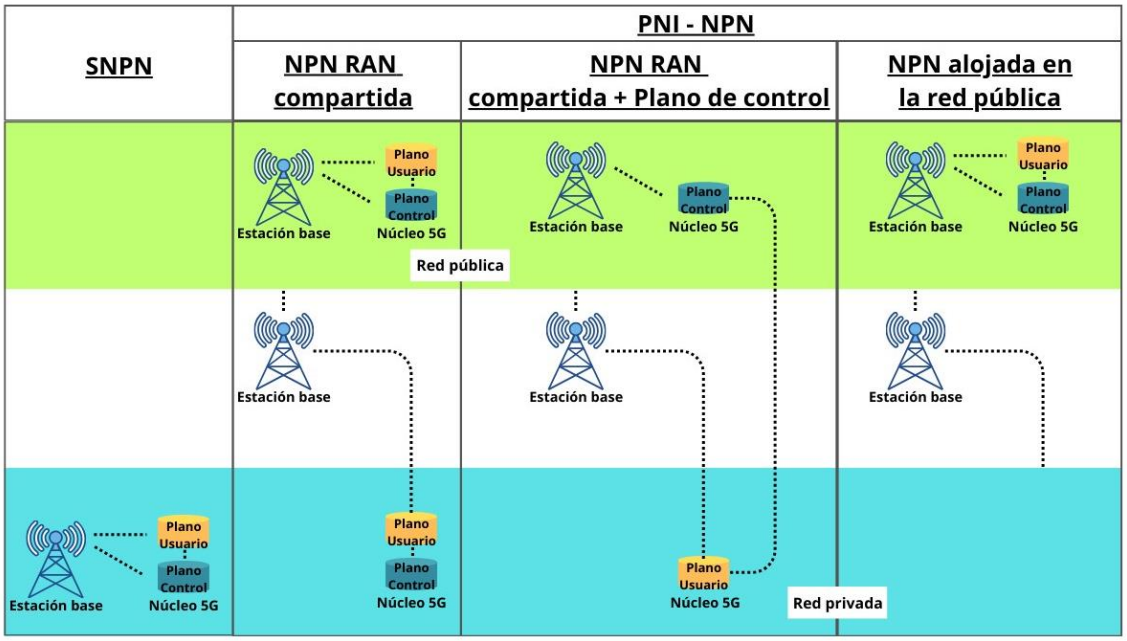

Figura 3. Diagrama esquemático de comparación de configuración NPN.

Como se puede observar en la figura anterior, lo que varía en las distintas topologías de red principalmente es la aparición o no aparición de la red pública, así como los componentes de la red que se sitúan en la parte privada y los que se comparten en la parte pública.

Otro campo donde la importancia de la tecnología 5G está creciendo exponencialmente es el relacionado con los drones. Entre otros, los vehículos aéreos no tripulados (UAV – Unmanned Aerial Vehicles) o sistemas aéreos no tripulados (UAS – Unmanned Aerial Systems) ya están utilizando la infraestructura de comunicaciones 5G y, en un futuro próximo, se pronostica que la utilizarán completamente. Actualmente, los sistemas 5G ya soportan una amplia variedad de aplicaciones diferentes, tales como la atención médica remota, vehículos terrestres automatizados, realidad virtual y/o aumentada, drones, vigilancia y muchas más. Dentro de ellas, destaca la vigilancia por vídeo de alta resolución usando drones para diferentes propósitos. [5]

Los avances en UAV han transformado esta tecnología en una herramienta omnipresente en la realización de diferentes tareas como son la observación, el rescate en situaciones de emergencia, agricultura, seguridad pública, detección de objetos, etc. Además, la aparición de la quinta generación celular amplía el alcance de sus aplicaciones y posibilidades. Gracias a 5G, se superan las limitaciones típicas relacionadas con las herramientas comunes de recopilación de datos de tráfico debidas a la vista aérea. Por otro lado, el análisis de visión y la detección de objetos es una tarea complicada en general, especialmente cuando se consideran vídeos o imágenes recibidas de una cámara acoplada en un UAV. [5]

Según la tecnología UAV propuesta con conexión celular en la Figura 4, nuevas tecnologías inalámbricas se están desarrollando para mejorar significativamente las comunicaciones dron-tierra. Varias ventajas atractivas de los vehículos aéreos no tripulados conectados a telefonía móvil tales como la accesibilidad ubicua, rendimiento mejorado, facilidad de seguimiento y gestión, navegación sólida y rentabilidad también son destacables. En términos de nuevas consideraciones de diseño, los autores exploraron la cobertura 3D, características de canal únicas, interferencias severas en el enlace aire-tierra y requisitos de tráfico asimétrico para los enlaces ascendente y descendente. De manera similar, en términos de tecnologías prometedoras que puedan habilitar de manera efectiva futuros sistemas inalámbricos, los autores investigaron la forma de haces 3D, la cooperación multicelular y el acceso múltiple no ortogonal aéreo-terrestre. Finalmente, Zeng et al. [6] esbozó algunas direcciones futuras tales como diseño de trayectoria consciente de la calidad del servicio, onda milimétrica UAV con conexión celular y enjambre de UAV con conexión celular. [7]

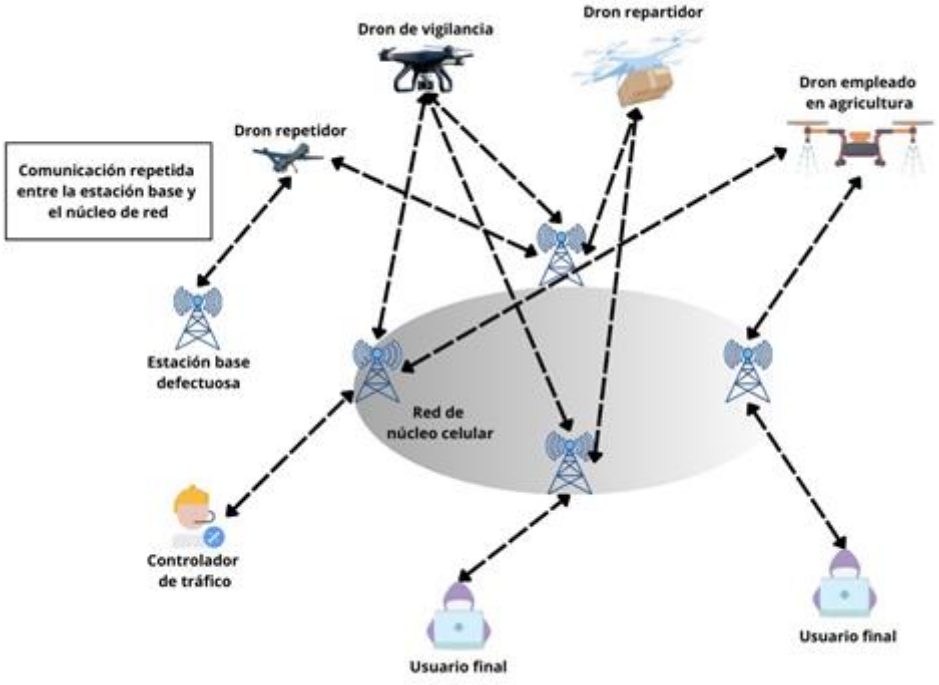

Figura 4. Una descripción general de los UAV conectados a redes celulares, representando diferentes casos de uso.

Por último, y a pesar de que en este trabajo no se profundiza en el tema, es importante destacar la técnica de *corte de red* (NS – Network Slicing) para comprender de una mejor manera la visión estructural de la tecnología 5G. Se trata de un concepto introducido en esta tecnología que permite la reserva de recursos en los diferentes segmentos de red para crear y mantener redes virtuales extremo a extremo para dar soporte a servicios específicos. [8] La introducción de NS permite a los operadores móviles soportar eficientemente las siguientes tres clases de servicios empleando la misma infraestructura física:

- *Banda ancha móvil mejorada* (eMBB – Enhanced Mobile Broadband): para aplicaciones que requieren tasas altas. [8]

- *Comunicaciones masivas tipo máquina* (mMTC – Massive Machine-Type Communication): pensadas para cubrir aplicaciones del internet de las cosas (IoT – Internet of Things) que requieran un soporte para un número masivo de dispositivos. [8]

- *Comunicaciones ultrafiables y de baja latencia* (uRLLC – Ultrareliable and Low-Latency Communication): para aplicaciones con requerimientos estrictos en temas de latencia y fiabilidad en las comunicaciones. [8]

Sin embargo, los servicios UAV no pertenecen a una sola clase de servicio. De hecho, las aplicaciones de los UAVs son consideradas aplicaciones uRLLC, mientras que los servicios ofrecidos (p. ej. streaming de vídeo en directo) también podrían requerir de una instancia de corte de red (NSI – Network Slice Instance) eMBB o mMTC. Por ello, los UAVs pueden necesitar una combinación de una instancia de segmento uRLLC y una función de corte eMBB o mMTC. [8]

1.2. Objetivos

Con la implementación cada vez más extendida de la tecnología 5G, es mayor el número de casos relacionados con ella. Entre ellos, destacan aquellos que suponen un cambio en la topología de la red o en su despliegue, lo cual puede dar lugar a limitaciones en ciertos segmentos de la red, tales como el *backhaul*. En este contexto, resulta necesario estudiar el impacto que los nuevos despliegues de red pueden tener en la calidad de las comunicaciones percibidas por los usuarios, para lo que es necesario desarrollar entornos que permitan este análisis. El objetivo de este TFM es desarrollar y desplegar un entorno de análisis capaz de replicar de forma realista estas topologías de red. Concretamente, se han fijado los siguientes objetivos:

- Analizar y comprender la estructura y el funcionamiento del núcleo de red 5G, especialmente en lo que respecta al plano de datos de usuario.

- Desplegar un núcleo 5G usando la solución *Open5GS* y validar su funcionamiento con el emulador de estaciones base y usuarios *UERANSIM*.

- Desarrollar un entorno que permita automatizar el despliegue de estaciones base y usuarios emulados, así como emular el segmento de *backhaul*.

- Analizar el rendimiento de las comunicaciones de usuario extremo a extremo ante diferentes configuraciones del *backhaul*.

1.3. Estructura del documento

Este documento se divide en cinco capítulos en los cuales se describe la metodología utilizada y el trabajo para alcanzar los objetivos deseados, así como el marco teórico y de estandarización en el que se ha basado y los resultados obtenidos.

En el Capítulo 1, se ha introducido la motivación y los objetivos de este TFM, mientras que en el Capítulo 2 se repasan las tecnologías celulares 4G y 5G para establecer una base teórica sobre el marco de desarrollo descrito en este trabajo.

En el Capítulo 3 se profundiza en el marco teórico relacionado con la implementación de la red 5G desplegada en este trabajo, incluyendo la interpretación y caracterización de los mensajes intercambiados, esquema de red, funcionamiento del núcleo de red, etc. Asimismo, se analizan las especificaciones de los interfaces involucrados y las plataformas empleadas en el TFM.

En el Capítulo 4 se describe el entorno de evaluación implementado y se presenta, así como la información que provee. En este capítulo también se realiza el estudio de rendimiento de servicios de usuario ante diferentes configuraciones de *backhaul* imperfecto.

En el quinto y último capítulo, se recogen la contribuciones y conclusiones del trabajo, explicando los hitos logrados y proponiendo líneas para futuros proyectos que pueden llevarse a cabo en base a éste.

Capítulo 2

Marco teórico redes celulares

En las últimas décadas, las nuevas generaciones de tecnologías celulares han buscado solventar las limitaciones de las generaciones anteriores y proporcionar nuevas funcionalidades capaces de dar soporte a nuevos tipos de servicio. En el caso de 4G y 5G, la última no solo busca sobrepasar las capacidades de red de 4G, sino que también busca alcanzar y superar las metas de 4G en aspectos relacionados con la tasa, latencia y densidad de usuarios. [9]

La era 4G vivió la innovación de varias tendencias de *networking*, como fue el desarrollo del IoT, crecimiento en el número de *smartphones*, y desarrollo de la automatización móvil y remota en los distintos ámbitos laborales. Estas tendencias se desarrollaron a lo largo de la década de 2010, lo que desarrolló una necesidad de obtener mayores velocidades y densidades de célula. Actualmente, se espera que las redes 5G resuelvan algunas de las limitaciones observadas en la generación anterior. [9]

A lo largo de este capítulo se va a presentar una descripción de las tecnologías 4G y 5G. Para ello, se describirán tanto las características de las comunicaciones inalámbricas en ambos tipos de redes, así como la arquitectura de red. Posteriormente, se presentarán las soluciones 5G que se utilizarán durante el TFM.

2.2. Entorno 4G

2.2.1. Características generales

La tecnología 4G nació como una mejora directa de 3G y es, en la actualidad, el servicio de red celular más extendido a lo largo del planeta. [10]

El núcleo de la red se basa en un sistema de conmutación de paquetes y su interfaz radio busca obtener un rango de cobertura y rendimiento superiores al de sus predecesoras. Fue diseñado para ser económico y ofrecer una alta eficiencia espectral. Este bajo costo se debe a la capacidad para reutilizar redes ya desplegadas sin necesidad de realizar reequipamientos o adquirir mayor espectro de frecuencia. Las principales características de las redes 4G celulares son las siguientes:

- Modulación de multiplexado por división de frecuencia ortogonal (OFDM – Orthogonal Frequency Division Multiplexing).

- Banda ultra ancha (UWB – Ultra Wide Band) en frecuencias mayores a 500 MHz.

- Velocidad de descarga de datos de hasta 100 Mbps.

- Velocidad de desplazamiento del usuario de hasta 200 km/h.

- Banda de frecuencia de 2 a 8 GHz.

2.2.2. Aspectos tecnológicos

Las redes celulares 4G se han estandarizado por el 3GPP bajo la denominación LTE (Long Term Evolution) con el objetivo de cumplir los requisitos IMT-Advanced de la Unión Internacional de Telecomunicaciones (ITU – International Telecommunications Union). De la misma manera, 4G permite la interoperabilidad entre tecnologías de red heterogéneas para dotar así de cobertura a un mayor número de zonas, respetando a su vez los requisitos de QoS.

En la Tabla 1 se muestran los requisitos de capacidad definidos por la ITU para las recomendaciones IMT-200 y IMT-Advanced, siendo esta última la conocida como 4G. Por su parte, LTE cumple con requisitos definidos para IMT-2000. Asimismo, es posible desplegar estaciones base con anchos de banda entre 1.4 y 20MHz, lo que dota a esta tecnología de gran adaptabilidad en el uso del espectro.

Downlink		**Uplink**	
IMT-2000	IMT-Advance	IMT-2000	IMT-Advance
5bps/Hz	15 bps/Hz	2.5 bps/Hz	6.75 bps/Hz

Tabla 1. Requisitos de capacidad IMT-2000 e IMT-Advance para los enlaces de bajada y subida.

Con el objetivo de cumplir con los requisitos de IMT-Advanced (4G), se propusieron mejoras a LTE, dando lugar de esta manera a LTE-Advanced. Entre otras, estas mejoras incluyen:

- *Extensión de ancho de banda (Carrier Aggregation)*: se emplea para utilizar en su totalidad todo el ancho de banda de hasta 100 MHz mediante la agregación de bandas de menor tamaño, como por ejemplo 20MHz. Esto permite aumentar las velocidades de transmisión de datos y mejorar el rango de cobertura para tasas binarias medias. Además, como no siempre es posible para un operador obtener 100 MHz contiguos de espectro, también se propone el uso de *carrier aggregation* de portadoras no continuas. En este caso, las portadoras de componentes que se van a agregar pueden ser no contiguas en la misma banda de espectro o no contiguas en diferentes bandas del espectro. En la Figura 5 se ilustra el caso de agregación de portadoras no contiguo en bandas diferentes, lo que resulta en el uso simultáneo de las bandas de espectro, donde dos dispositivos están usando anchos de banda superiores a 20 MHz, cada uno en una banda de espectro diferente, coexistiendo con un dispositivo 4G que está usando ancho de banda agregado no contiguo de diferentes bandas de espectro. [11]

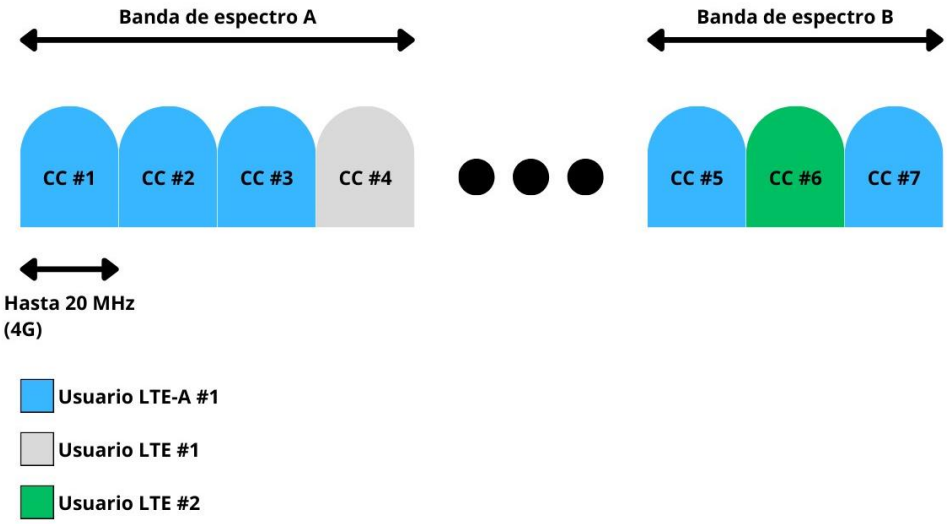

Figura 5. Agregación de portadora en ancho de banda no continuo y múltiples bandas.

- *MIMO en enlace ascendente y descendente*: MIMO (MIMO – Multiple Inputs Multiple Outputs) mejorado es considerado como uno de los aspectos principales de 4G/LTE ya que permite al sistema alcanzar los requerimientos de tasa establecidos por el estándar. Dentro de la tecnología MIMO destacan las técnicas de *beamforming*, multiplexación y diversidad espaciales. Sin embargo, se necesitan mejoras adicionales para alcanzar el rendimiento máximo de las celdas. Con LTE se incorporó la capacidad de implementar esquemas de antena MIMO tanto en el enlace descendente como en el ascendente. En el enlace descendente se pueden emplear hasta ocho antenas transmisoras, mientras que en el enlace de subida se pueden emplear cuatro. Además, se incorporó la posibilidad de combinar las diferentes tecnologías MIMO en lo que se conoció como precodificación extendida.

- *Extensión de acceso múltiple de enlace ascendente*: se incorporan dos nuevas mejoras:

    - *Desacoplamiento control-datos*: en las tecnologías anteriores, un usuario únicamente utilizaba el canal físico de control de enlace cuando no tenía datos para transmitir en el canal compartido. En el caso de que tuviera información para transmitir, multiplexaba la información a transmitir junto con los datos de control y los mandaba por el enlace compartido. Actualmente, esto ya no es válido, lo que significa que las transmisiones simultáneas tanto en el enlace de control como en el compartido de datos son posibles para ambas direcciones. [11]

    - *Transmisión de datos no contigua*: el enlace de subida ya no está restringido al uso de portadoras consecutivas, sino que pueden existir grupos de subportadoras reservados dentro del espectro. Esto permite la programación selectiva de frecuencia en el enlace ascendente y, en consecuencia, aumentará el rendimiento del enlace. Sin embargo, la relación pico a promedio de la señal de transmisión se verá aumentada en comparación con las tecnologías anteriores. [11]

- *Transmisión y recepción coordinada de múltiples puntos (CoMP – Coordinated multiple point transmission and reception)*: se trata de una técnica de ortogonalización tanto para el enlace de subida como el de bajada que permite mejorar la capacidad del sistema y el rendimiento del usuario del borde de la celda. La idea básica de esta tecnología es establecer una coordinación estrecha entre las transmisiones en diferentes lugares de la celda y, de este modo, lograr una mayor capacidad del sistema y mejores velocidades de datos. [11]

- *Relaying*: permite el reenvío de tráfico/señalización entre la estación base y el dispositivo de usuario (UE – User Equipment) para mejorar la cobertura, la movilidad del grupo, cobertura del borde de la celda y para extender la cobertura a áreas muy sombreadas en la celda o áreas más allá del rango de la celda. Hay tres tipos de retransmisores de acuerdo con las capas en las cuales su funcionalidad principal es realizada:

    - *Retransmisor L1*: también conocido como repetidor, recibe la señal, la amplifica y retransmite la información cubriendo así los agujeros negros dentro de las células. [11]

    - *Retransmisor L2*: realiza la operación de decodificar y reenviar y goza de mayor libertad para alcanzar la optimización de rendimiento. Los paquetes de datos son extraídos de las señales de radiofrecuencia, procesadosm regenerados y después enviados al siguiente salto. [11]

    - *Retransmisor L3*: es concebido para utilizar el acceso radio de 4G/LTE en la red de retorno conectando una estación base a otra que actúa como HUB central. Esta estación base ancla enruta los paquetes entre la red de retorno cableada y la inalámbrica, actuando como un enrutador IP. [11]

- *Despliegue de red heterogéneo*: la planificación de la red incluye el despliegue de celdas de diferente tamaño solapadas para mejorar la cobertura en puntos concretos. Para reducir la interferencia entre ellas se proponen nuevas técnicas de coordinación y asignación de recursos. [11]

- *Mejoras en las redes de optimización (SON – Self-Optimizing Networks) automáticas*: los costes de despliegue y operación pueden reducirse empleando tecnologías de autoorganización y optimización. Estas tecnologías permiten habilitar configuraciones automáticas, optimización de entregas, así como de otros parámetros radio de gestión de recursos. [11]

2.2.3. Arquitectura de la red

A continuación, se comentará la arquitectura de la red 4G, ya que es de la que parte la arquitectura 5G en la cual se basa este trabajo. En la Figura 6 se puede observar un modelo de despliegue de ésta, incluyendo sus componentes más importantes. [12]

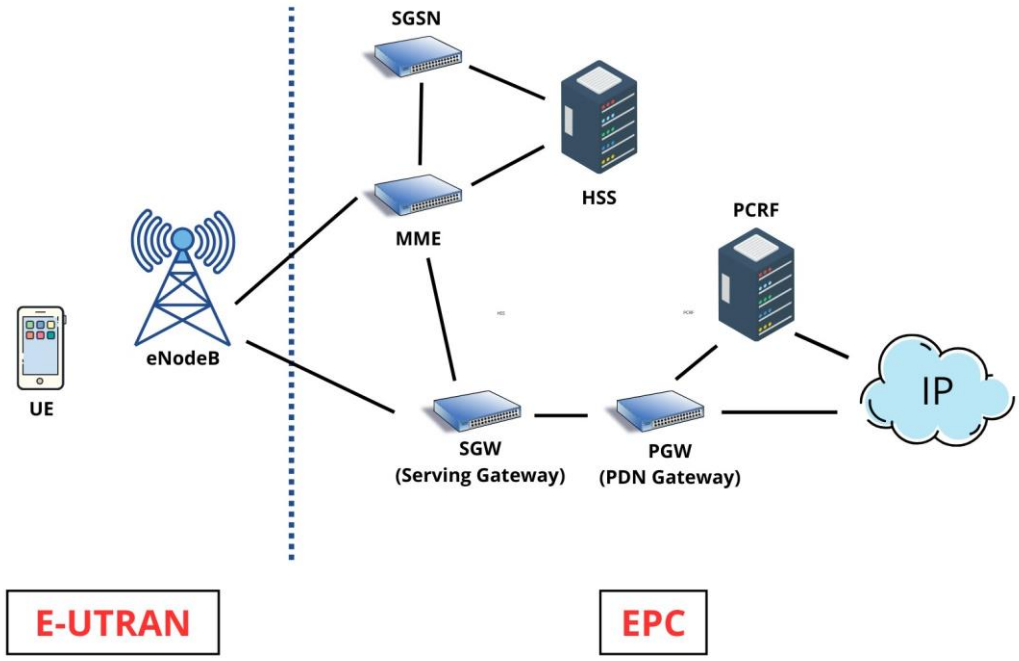

Figura 6. Estructura de red 4G.

El lado izquierdo de la red se conoce como E-UTRAN y está compuesta por las estaciones base llamadas nodeBs evolucionadas (eNodeB, o eNB, por sus siglas en inglés), las cuales se encargan de realizar la gestión de los recursos radio, control de movilidad de conexión, asignación dinámica de recursos a los UEs tanto en el enlace de subida de datos como en el de bajada, etc. Los eNBs también están involucrados en la compresión de las cabeceras IP y la selección de las entidades de gestión de movilidad (MME – Mobility Management Entity) para la conexión de los propios UEs cuando las rutas a los MME no aparecen en la información sobre el UE. [12]

Por otro lado, la parte derecha de la red se conoce como núcleo evolucionado de paquetes (EPC – Evolved Packet Core) y está compuesta por cinco elementos clave conocidos como MME, SGW, PDN, PGW, HSS y PCRF. Esta parte de la red provee la arquitectura de núcleo red IP, para prestar los servicios a los usuarios. Profundizando en ella, el MME gestiona la movilidad del UE, mantiene el contexto de este cuando se encuentra inactivo y realiza la señalización y seguridad NAS (NAS – Non Access Stratum). La puerta de enlace de señalización (SGW – Serving Gateway) es la referencia de movilidad para la portadora de datos y almacena los datos del enlace descendente cuando el UE está inactivo, mientras que el enlace de paquetes (PGW – Packet Gateway) se encarga de proveer las direcciones IP a los UE móviles, filtra los paquetes IP de los usuarios en el enlace de descarga basándose en diferentes indicadores de calidad de servicio, realiza el redireccionamiento del tráfico y aplica políticas de calidad de servicio. El servidor de abonado doméstico (HSS – Home Subscriber Server) cumple la función de autenticar e identificar a los usuarios, así como la gestión de sus credenciales. Finalmente, la función de políticas y reglas de cobro (PCRF - Policy and Charging Rules Function) controla los diferentes planos basándose en las políticas impuestas. [12] En la Figura 7 se puede observar el proceso de autenticación básico que realiza un usuario cuando desea identificarse en la red. En este proceso participan el eNodeB, el MME y el HSS, siendo este último el encargado de identificar al usuario en cuestión en base a los datos de autentificación retransmitidos por el MME desde el UE y el eNodeB. En concreto, se utiliza la identidad de abonado móvil internacional (IMSI - International Mobile Subscriber Identity) del usuario. [13]

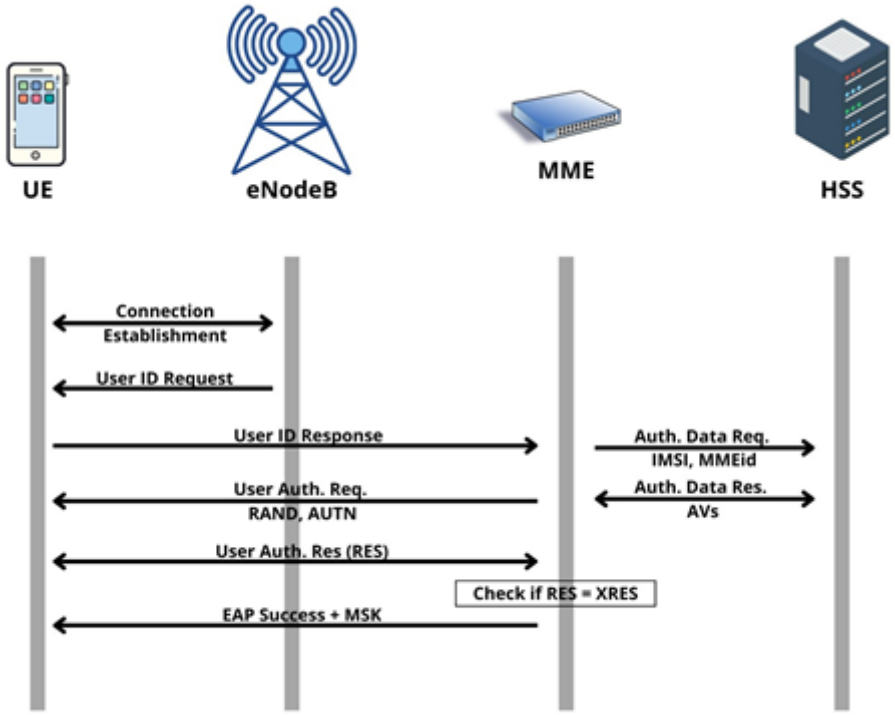

Figura 7. Autenticación de usuario en red 4G/LTE.

2.3. Entorno 5G

Para el estudio de la tecnología 5G, se ha variado la estructura de las secciones con respecto al caso de 4G. Esto se ha realizado ya que la arquitectura de la red se ha detallado junto con uno de los softwares empleados para la realización de este TFM. Además, se ha añadido una sección explicando las bandas de trabajo para profundizar en la tecnología y en cómo se comporta la misma dependiendo del espectro frecuencial en el que se trabaja.

2.3.1. Características generales

El tráfico móvil de banda ancha está creciendo exponencialmente, alimentado por la demanda del consumidor por los datos móviles, rendimiento mejorado y calidad de las redes móviles, nuevas tecnologías, dispositivos, aplicaciones y servicios que introducen métodos avanzados en el uso de las frecuencias de los servicios móviles. [14]. A lo largo de esta sección, se procede a detallar las características y requerimientos de los sistemas de comunicación móvil 5G, también conocido como IMT-2020.

Las metas a futuro para el desarrollo de las capacidades 5G se describen en la recomendación ITU-R M.2083-0, donde ocho son los parámetros de capacidad establecidos. Los requerimientos de rendimiento para 5G deben ser alcanzados, pero, al mismo tiempo, su ejecución depende del escenario de uso (p. ej. las comunicaciones militares en misiones críticas requieren una muy baja latencia de unos pocos milisegundos, por lo que en este caso la tasa de datos de pico sería mucho menor de 10 – 20 Gbit/s). Además, IMT-2020 también concibe términos como el IoT y las conexiones máquina a máquina (M2M – Machine-to-Machine) mediante la conexión de una amplia gama de electrodomésticos, máquinas y otros objetos inteligentes sin intervención humana, en adición a las comunicaciones convencionales entre humanos o humano con máquina. [14]

A continuación, en la Tabla 2 se comparan los ocho parámetros clave mencionados previamente tanto para la tecnología 4G como 5G para facilitar la comparación de estas y poder observar la mejoría existente con el avance de la tecnología.

	4G	**5G**
Velocidad máxima de datos	1 Gbit/s	10 – 20 Gbit/s
Tasa de datos obtenida	10 Mbit/s	100 Mbit/s
Latencia	60 – 70 ms	< 1 ms
Movilidad	350 km/h	500 km/h
Eficiencia energética	x1	x100
Eficiencia espectral	x1	x3
Capacidad de tráfico del área	0.1 Mbit/s/m^2	10 Mbit/s/m^2
Densidad de conexión	10^5 dispositivos/km^2	10^6 dispositivos/km^2

Tabla 2. Comparación de características 4G y 5G.

Para finalizar con esta sección, se procede a detallar el significado de cada uno de estos ocho parámetros mencionados en la Tabla 2 en relación a las tecnologías celulares:

- *Velocidad máxima de datos*: velocidad máxima alcanzable bajo condiciones ideales para cada usuario/dispositivo móvil (en Gbit/s). [15]

- *Tasa de datos obtenida*: velocidad de datos alcanzable que esté disponible de forma ubicua en el área de cobertura para un usuario/dispositivo móvil (en Mbit/s o Gbit/s). [15]

- *Latencia*: la contribución de tiempo de la red de radio desde que el origen envía un paquete a cuando el destino lo recibe (en ms). [15]

- *Movilidad*: velocidad máxima a la que se logra una QoS y transferencia fluida entre nodos de radio que pueden pertenecer a diferentes capas y/o tecnologías de acceso por radio (en km/h). [15]

- *Eficiencia energética*: la eficiencia energética tiene dos perspectivas: en el lado de la red, la eficiencia energética se refiere a la cantidad de bits de información transmitidos/recibidos de los usuarios, por unidad de consumo de energía de la red de acceso radio (en bit/julio); en el lado del dispositivo, la eficiencia energética se refiere a la cantidad de bits de información por unidad de energía consumida por el módulo de comunicación (en bit/julio). [15]

- *Eficiencia espectral*: rendimiento de datos promedio por recurso de unidad de espectro y por celda (en bit/s/Hz). [15]

- *Capacidad de tráfico del área*: rendimiento total del tráfico servido por área geográfica (en Mbit/s/$m^{2)}$. [15]

- *Densidad de conexión*: número total de dispositivos conectados y/o accesibles por unidad de área (por km^2). [15]

2.3.2. Espectros frecuenciales de trabajo

En cuanto a los rangos de frecuencias y bandas de uso, éstas se adaptan dependiendo de las necesidades del área que van a cubrir. En la Figura 8 se adjunta una imagen que resume brevemente las características que se mencionarán a continuación, así como las tecnologías celulares que comparten esas frecuencias. Actualmente, se pueden diferenciar tres bandas de frecuencias:

- *Espectro de banda baja (600 MHz – 1 GHz)*: también conocida como espectro Sub-1 GHz, se caracteriza por tener características de propagación robustas, siendo esencial en la cobertura de áreas poco pobladas y en la cobertura interior de zonas urbanizadas. A pesar de esto, el espectro necesario para 5G es mayor que la capacidad existente de forma natural por debajo de 1 GHz. Sin embargo, las velocidades de descarga de datos en áreas relacionadas a la banda baja de frecuencias -típicamente áreas rurales- se ven beneficiadas por la capacidad del espectro disponible. De esta forma, si se asegura la disponibilidad de la banda cercana a los 600 MHz, las velocidades de datos en las zonas rurales llegarían a incrementarse en un 30 – 50%. [16]

- *Espectro de banda media (1 GHz – 6 GHz)*: se considera la banda perfecta para proveer 5G de alta capacidad. Además, desempeña un papel clave en la investigación, en el diseño de Smart Cities, y en la comunicación entre los usuarios. Destaca sobre los otros dos rangos de frecuencias disponibles debido a su capacidad para transmitir gran cantidad de datos a largas distancias. [16]

- *Espectro de banda alta (24 GHz* – 40 GHz): también conocida como mmWave, juega un papel muy importante en las comunicaciones 5G. El despliegue en esta banda permite alcanzar velocidades ultra altas (múltiples gigabits) y muy bajas latencias. Sin embargo, presenta muchas limitaciones en lo referente a la propagación. Esto permite operar a ciertas aplicaciones con altos requisitos de ancho de banda (p. ej. streaming de vídeo de alta resolución) en hogares mediante tecnología de acceso inalámbrico fijo (FWA – Fixed Wireless Access) y en la calle mediante tecnología de eMBB. Otras aplicaciones emergentes como la realidad virtual o el metaverso también se beneficiarán de esta clase de conectividad en puntos con alta densidad de usuarios. [16]

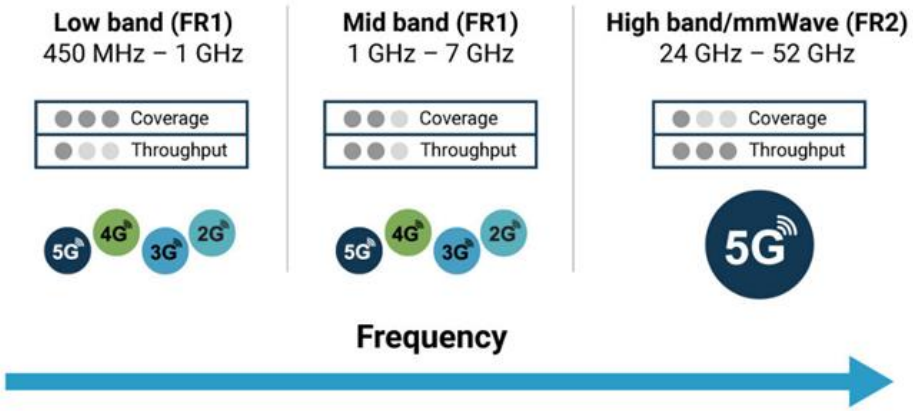

Figura 8. Rango de frecuencias de la red 5G. [17]

2.3.3. Casos de uso

Gracias a la innovación existente en las especificaciones que ofrece 5G, cada vez son más los casos de uso en los que aparece presente esta tecnología. A continuación, se procede a mencionar varios de ellos:

- *Vehículos autónomos*: desde taxis hasta drones, la tecnología 5G sustenta la mayoría de las capacidades de próxima generación en vehículos autónomos. Hasta que apareció el estándar correspondiente a esta tecnología, los vehículos completamente autónomos se veían como un paradigma muy lejano debido a las limitaciones en la transmisión de datos que ofrecían 3G y 4G. Actualmente, y gracias a las velocidades obtenidas con 5G, es posible diseñar e implementar sistemas automatizados de transporte para coches, trenes y más, transformando la manera en la que los sistemas y dispositivos se conectan, comunican y colaboran. [18]

- *Smart factories*: junto con la inteligencia artificial y el *machine learning*, 5G está preparado para ayudar a las fábricas no solo a ser más inteligentes, sino autómatas, eficientes y resilientes. Hoy en día, muchas tareas cotidianas pero necesarias que están asociadas con la reparación de equipos y la optimización están siendo delegadas a las máquinas gracias a la conectividad 5G, junto a las capacidades de otras tecnologías previamente citadas. Se prevé que esta área sea altamente influenciada por el 5G, impactando directamente en ella. Un ejemplo claro de esto sería el uso de drones mediante IoT en las fábricas para ayudar con la localización y el transporte de paquetes de una manera más eficiente y previendo el robo. A parte de ser favorable para el medio ambiente y los consumidores, también libera a los empleados para que dediquen su tiempo y energía a tareas que sean más acordes con sus capacidades. [18]

- *Smart cities*: 5G encaja perfectamente en el esquema de un ambiente urbano hiperconectado para su uso en diversas tareas como el cumplimiento de la ley, eliminación de residuos o mitigación de desastres gracias a las capacidades que ofrece y a los bajos retardos que maneja. Algunas ciudades ya están empleando sensores con tecnología 5G incorporada para monitorear patrones de tráficos en tiempo real y ajustar señales, ayudando a guiar el flujo de tráfico, minimizando la congestión en ciertas carreteras y mejorando la calidad del aire. En la Figura 9 se muestra lo que podría ser un despliegue de red 5G orientado a Smart City, donde los postes de la luz son aprovechados para desplegar los nodos y así captar la información recibida por parte tanto de los usuarios como de los sensores IoT desplegados en esa parte de la ciudad, para, posteriormente, enviar todos esos datos al núcleo de la red y poder procesar la información eficazmente. [18]

- *Smart healtcare*: el campo de la sanidad también se ve beneficiado por las capacidades y la fiabilidad que 5G ofrece. Un ejemplo cotidiano es el área de las cirugías remotas, donde se emplea robótica y un vídeo en directo a alta definición conectado a Internet vía 5G. Otro ejemplo sería el campo de la salud móvil, donde 5G permite a los trabajadores sanitarios la capacidad de acceder rápida y fácilmente a los datos de un usuario y su historial médico, permitiéndoles tomar mejores decisiones, más rápidas, y potencialmente salvando vidas. Para finalizar, y como se vivió durante la pandemia ocurrida en 2020, el seguimiento de contactos y el mapeo de brotes fueron críticos para mantener segura a la población. La capacidad de estas redes para transmitir grandes cantidades de datos a altas velocidades y de manera segura permitió a los expertos tomar mejores decisiones que tienen influencia hasta día de hoy. [18]

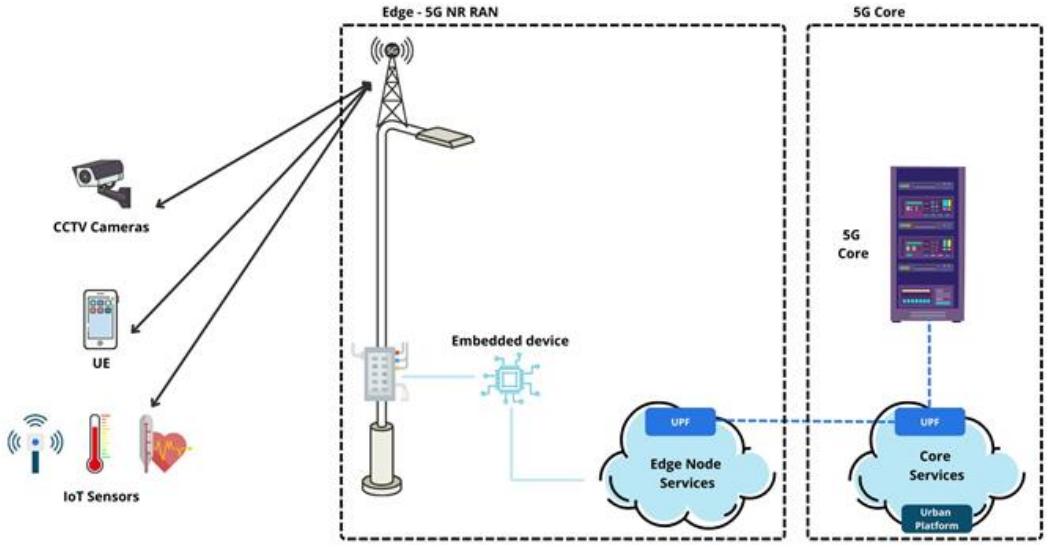

Figura 9. Ejemplo de despliegue 5G para Smart City.

2.4. Herramientas utilizadas

A continuación, se procede a presentar y explicar el software utilizado para la realización de este TFM. Se han combinado varias tecnologías, distintas pero compatibles entre sí, para desplegar la red 5G y, posteriormente, generar el flujo de datos entre los usuarios y el núcleo de esta.

2.4.1. Máquinas virtuales

Para comenzar, es importante destacar que se han utilizado dos máquinas virtuales con sistema operativo Ubuntu para realizar todas las simulaciones que se presentan en este TFM. Se ha realizado de esta manera ya que el software empleado para la simulación no soporta que el núcleo de la red se encuentre en la misma máquina virtual que emula la estación base de nueva generación (gNodeB, o gNB – Next Generation Node B) y los UEs. El entorno de virtualización se muestra en la Figura 10. Concretamente la máquina virtual con dirección IP 10.10.150.239 alberga el núcleo de red utilizado que se describirá posteriormente. Por otra parte, la máquina con dirección IP 10.10.150.238 se utilizará para la emulación de los usuarios y las estaciones base que se conectarán al núcleo de la red. En las siguientes secciones se explica con detalle el software desplegado en cada máquina.

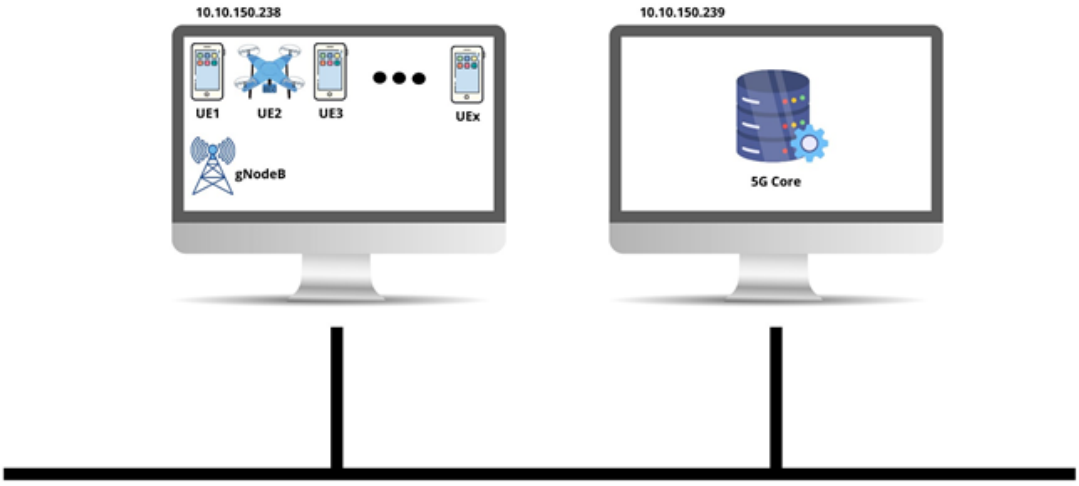

Figura 10. Topología de red de las máquinas virtuales.

2.4.2. Open5GS

El software principal en el cual se ha basado toda la implementación y la configuración de la red recibe el nombre de *Open5GS* [19]. Este software brinda la posibilidad de desplegar tanto un núcleo 5G junto a uno 4G (por su estándar conocido como 5G Non-Stand Alone-NSA), como un núcleo 5G independiente (por su estándar conocido como 5G Stand Alone-SA). Para la realización de este trabajo, se han centrado los esfuerzos en el estudio exclusivo de una red 5G, dejando de lado todo lo relacionado con 4G. *Open5GS* utiliza *MongoDB*, software de base de datos que permite almacenar los datos de los usuarios registrados en la red, así como los datos del usuario o usuarios administradores de la red. Además, y para facilitar el registro de los usuarios y la visualización de sus datos, *Open5GS* ofrece la posibilidad de instalar un servicio de interfaz web (denominado WebUI por el propio software) donde se puede manejar la base de datos de manera gráfica. En la Figura 11 se muestra una captura de pantalla donde se puede observar toda la estructura de núcleo de red ofrecida por *Open5GS*, incluyendo los componentes de red, los interfaces, los puertos utilizados y los servicios del núcleo de red 5G SA, así como la relación de este con las estaciones base. Cabe destacar que tanto el plano de control como el plano de usuario pueden encontrarse en distintas máquinas virtuales por razones de seguridad y rendimiento. Sin embargo, por simplicidad, en este trabajo ambos planos se encuentran en la misma máquina virtual.

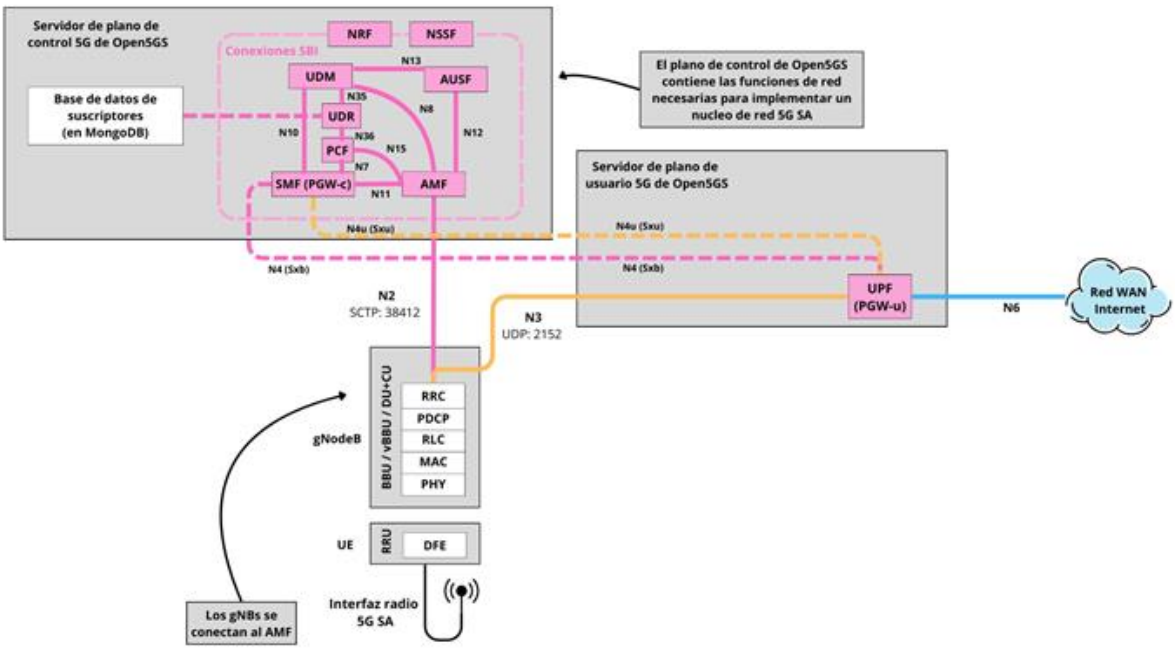

Figura 11. Esquema completo de red con Open5GS incorporado.

De acuerdo con los estándares definidos por el 3GPP, el núcleo de red implementado por Open5GS sigue una arquitectura basada en servicios (SBA – Service Based Architecture). De esta forma, cada una de las funciones del núcleo se identifica con un servicio que expone un interfaz claramente definido y que es utilizado (o consumido) por otros servicios. Al usar interfaces basados en IP, estos servicios se pueden desplegar en máquinas diferentes o mediante otros entornos de virtualización como contenedores. En secciones posteriores se profundiza en estos servicios y su función dentro de la red 5G.

2.4.3. UERANSIM

Para la simulación de los usuarios y la estación base se ha utilizado un software que recibe el nombre de *UERANSIM*[1]. Este software permite la emulación de UEs y gNBs, incluyendo así su comportamiento y sus funcionalidades en un escenario de red 5G. [20] Este entorno de emulación es independiente del núcleo de red con el que se conecta, lo que permite utilizarlo para validar diferentes soluciones. Además, contiene archivos de configuración específicos para diferentes implementaciones de núcleo 5G, incluyendo uno concreto para *Open5GS*.

En cuanto a las funciones que ofrece, *UERANSIM* emula las comunicaciones entre la red de acceso (estaciones base y usuarios) y el núcleo de red. Además, dentro de la red de acceso, esta solución permite simular la interfaz radio sobre el protocolo User Datagram Protocol (UDP).

Por encima de la red de acceso, *UERANSIM* emula tanto el plano de control como de usuario que se conectan con el núcleo de red. El plano de control, a su vez, se divide en la capa de no-acceso (NAS – Non-Access Stratum), que se encarga del control de los UEs, y el protocolo New Generation Application Protocol (NGAP), encargado del control de la red de acceso radio.

El plano de control se implementa por el protocolo GPRS Tunnelling Protocol (GTP), y actualmente, admite UDP, IPv4 e IPv6.

UERANSIM está implementado en lenguaje C++ y permite emular tanto los gNBs como los UEs que se deseen. Para ello la herramienta proporciona archivos de configuración básicos que se pueden adaptar y extender en función del escenario a emular. A continuación, se procede a detallar los programas que permiten instanciar los gNB y EUs y los parámetros de configuración más relevantes:

[1] https://github.com/aligungr/UERANSIM

- *nr-gnb*: este programa es el encargado de poner en funcionamiento la emulación del gNB en base a un archivo de configuración. En este TFM se ha analizado y extendido este archivo y, en secciones posteriores, se comentará con más detalle su interpretación y los mensajes intercambiados durante su generación. En la Figura 10 se muestran los parámetros más importantes de configuración, donde destacan:

    - *Código de país móvil (MCC – Mobile Country Code)*: es el código de móvil dependiente de cada país. Por defecto, su valor está puesto a '999' ya que es el valor de prueba.

    - *Código de red móvil (MNC – Mobile Network Code)*: es el código de operador de red y permite diferenciar operadores dentro de un mismo país. Por defecto, su valor es '7' ya que es el valor de prueba.

    - *linkIp*: indica la dirección IP local del gNB para la simulación del radioenlace.

    - *ngapIp*: indica la dirección IP del plano de control del gNB para comunicarse con el núcleo. Concretamente, se trata de la dirección IP dedicada al interfaz N2, tal como se muestra en la Figura 11, el cual se explicará más adelante en este trabajo. Como en el caso anterior, se ha sustituido el valor de *loopback* por la dirección IP de la máquina virtual anfitriona.

    - *gtpIp*: indica la dirección IP del plano de datos del gNB para comunicarse con el núcleo. Concretamente se trata de la dirección IP dedicada el interfaz N3, tal como se muestra en la Figura 11, el cual se explicará más adelante en este trabajo. Como ha ocurrido en los casos anteriores, se sustituyó el valor de *loopback* por la dirección de la máquina virtual anfitriona.

    - *amfConfigs*: contiene la información de la función de gestión de acceso y movilidad (Access and Mobility Management Function - AMF). Esta función es la entidad del núcleo de red que con la que se comunican las estaciones base para realizar el plano de control. Concretamente, la información de configuración contiene la dirección IP (en este caso, la dirección IP se ha sustituido por la de la otra máquina virtual, ya que es en la que se haya desplegado núcleo de la red, y, en su defecto, el servicio AMF) y el puerto (por defecto, 38412). Como se puede ver en la Figura 12, la configuración asume que se pueda configurar una lista de AMFs. Esto permitiría realizar configuraciones más complejas.

```
mcc: '999'          # Mobile Country Code value
mnc: '70'           # Mobile Network Code value (2 or 3 digits)

nci: '0x000000010'  # NR Cell Identity (36-bit)
idLength: 32        # NR gNB ID length in bits [22...32]
tac: 1              # Tracking Area Code

linkIp: 10.10.150.239   # gNB's local IP address for Radio Link Simulation
(Usually same with local IP)
ngapIp: 10.10.150.239   # gNB's local IP address for N2 Interface (Usually
same with local IP)
gtpIp: 10.10.150.239    # gNB's local IP address for N3 Interface (Usually
same with local IP)

# List of AMF address information
amfConfigs:
  - address: 10.10.150.238
    port: 38412
```

Figura 12. Parámetros de configuración del gNB.

- *nr-ue*: este programa es el encargado de poner en funcionamiento la emulación de los UEs en base a un archivo de configuración predefinido por defecto, al cual se le han realizado ciertas modificaciones para el correcto funcionamiento de la red. Además, es importante que los valores que aparecen en este archivo de configuración coincidan con los valores registrados en la base de datos de la red para cada usuario, ya que de esta forma los UEs podrán autenticarse correctamente en la misma. Más adelante en este trabajo se mostrarán los resultados de su ejecución y la interpretación de los mensajes intercambiados en su conexión. En la Figura 13 se muestran los parámetros más importantes de configuración, donde destacan:

    - *supi*: el Subscription Permanent Identifier (SUPI) es equivalente al International Mobile Subscriber Identifier (IMSI) en las generaciones anteriores y permite identificar al UE. El SUPI está compuesto por la concatenación del MCC, MNC y el Mobile Subscriber Identification Number (MSIN), estando este último compuesto por 10 dígitos a elección del proveedor y siendo único para cada usuario dentro de la red de un operador.

    - *key*: este campo incluye la clave de suscripción del UE correspondiente en la red. Debe incluirse para registrar el UE en la base de datos para que, a la hora de que el UE quiera conectarse a la red, pueda autenticarse frente a esta.

    - *op*: es el código de operador para el UE. Este código es diferente para cada operador de red. Por defecto, es un código de prueba. También es necesario incluirlo a la hora de registrar el usuario en la base de datos para que la red pueda autenticarse frente al UE.

```
# IMSI number of the UE. IMSI = [MCC|MNC|MSISDN] (In total 15 digits)
supi: 'imsi-999700000000001'
# Mobile Country Code value of HPLMN
mcc: '999'
# Mobile Network Code value of HPLMN (2 or 3 digits)
mnc: '70'
# SUCI Protection Scheme : 0 for Null-scheme, 1 for Profile A and 2 for
Profile B
protectionScheme: 0
# Home Network Public Key for protecting with SUCI Profile A
homeNetworkPublicKey:
'5a8d38864820197c3394b92613b20b91633cbd897119273bf8e4a6f4eec0a650'
# Home Network Public Key ID for protecting with SUCI Profile A
homeNetworkPublicKeyId: 1
# Routing Indicator
routingIndicator: '0000'

# Permanent subscription key
key: '465B5CE8B199B49FAA5F0A2EE238A6BC'
# Operator code (OP or OPC) of the UE
op: 'E8ED289DEBA952E4283B54E88E6183CA'
```

Figura 13. Parámetros de configuración del UE.

2.4.4. Comando iperf3

Para medir el ancho de banda de las comunicaciones establecidas durante el TFM, se ha empleado este programa en su última versión. Dentro de todas sus utilidades, esta herramienta permite ajustar varios parámetros de manera muy avanzada en lo relacionado con los protocolos Stream Control Transmission Protocol (SCTP), TCP y UDP, compatible tanto con redes IPv4 como IPv6. [16] Se trata de una herramienta que permite instanciar clientes y servidores de tráfico sintético mediante un comando específico para cada uno. Además, este comando acepta varios campos que pueden ser de utilidad para el estudio de estas (p. ej. variar el tamaño de los paquetes enviados, modificar la tasa binaria, extraer la información a un archivo de texto, etc.). Una vez finalizado el envío de tráfico el programa también devuelve resultados de rendimiento. En el TFM, se ha empleado este programa ya que permite extraer la información en formato JSON, lo que posteriormente facilitaría el análisis de la información por varios de los scripts que se mencionarán en los puntos posteriores. Además, en secciones posteriores de este TFM se entrará más en profundidad en la utilización de este *software*. En el Anexo 1, se adjuntan los comandos más comunes utilizados durante la realización de este trabajo, para tener un mayor contexto del uso y funcionamiento de los campos que utilizan, así como una breve explicación de los resultados obtenidos para los mismos.

2.4.5. Comando trafficcontrol

Permite configurar ciertos parámetros de la red (p. ej. ancho de banda, latencia, paquetes perdidos, etc.) asignados a un interfaz de red [21]. Además, permite modificar estos parámetros tanto para el enlace de subida como para el de bajada, o incluso para ambos al mismo tiempo. Este programa se ha utilizado en la realización de los experimentos para emular condiciones de comunicación del *backhaul*. En el Anexo 2 se adjuntan los comandos utilizados durante este trabajo, así como una breve descripción de los campos que utilizan y los resultados obtenidos tras su ejecución.

2.4.6. Scripts de automatización

Por otra parte, se han desarrollado cuatro scripts propios en Python para la realización de las simulaciones, así como para el posterior análisis de los datos obtenidos. Se han empleado librerías para facilitar la obtención de las funciones deseadas. Además, se ha utilizado un script adicional existente para facilitar el registro de usuarios en la base de datos de la red. A continuación, se explicarán brevemente estos códigos, así como las librerías empleadas en cada uno:

- *regSubsVariandoUsuarios*: este script se ejecuta en la máquina que genera los UEs y el gNB. Permite automatizar uno de los experimentos que se explicarán más adelante en este trabajo, permitiendo variar el número de UEs que se conectan al gNB en una sola ejecución. El script hace uso de *multi-threading* para ejecutar varias consolas de Linux al mismo tiempo, permitiendo la ejecución de comandos con varios UEs al mismo tiempo. Además, está programado para facilitar la variación de ciertos parámetros de interés (p. ej. tasa de pérdidas del canal, número de UEs conectados, retardo del canal, etc.). En cuanto al almacenamiento de los datos, toda la información obtenida de los experimentos se almacena en archivos JavaScript Object Notation (JSON), ordenados por carpetas en base a las condiciones de estudio para facilitar su posterior tratamiento.

- *regSubsVariandoBR*: es similar al anterior, pero en este caso permite variar la tasa binaria a la que transmiten los UEs. Al igual que en el caso anterior, hace uso de *multi-threading* para paralelizar la emulación de los UEs y permitirles establecer conexión con el núcleo de red al mismo tiempo.

- *filtrarJsonUsers*: este script se ha diseñado con la finalidad de tratar toda la información generada por uno de los scripts anteriores. Además de leer los archivos generados previamente, se encarga de filtrarlos para obtener ciertos parámetros de estudio que se mencionarán posteriormente en este TFM, almacenándolos en *dataframes* y organizándolos en base al número de usuarios que se conectan y la tasa binaria a la que transmiten, e implementándolos en gráficas para su correcta visualización. Además, a la hora de realizar la lectura de los archivos, realiza un conteo de los errores de usuario para plasmarlos posteriormente en una gráfica.

- *filtrarJsonBR*: es similar al anterior, pero en el caso de estudio para la variación de tasas de usuario.

- *iperf-parallel-servers*: este script, a diferencia de los mencionados anteriormente, se ejecuta en el lado del servidor. La finalidad de éste es generar tantos servidores que se mantienen a la escucha como usuarios se desean simular, para que todos puedan establecer una conexión a través del núcleo de red a través de un único puerto, exclusivo para él. A la hora de ejecutarlo, se puede elegir el número de puertos de escucha.

En la Figura 14 se adjunta el flujo de ejecución de scripts establecido para los distintos experimentos, mostrando en verde los programas utilizados en cada momento, así como los resultados de su ejecución. Mientras que en la máquina virtual que contiene el núcleo de red se abren los puertos de escucha de *iperf3* para que el número de usuarios que van a conectarse puedan establecer conexión con el mismo, en la otra máquina virtual se generan el gNB y el número de UEs requeridos mediante *UERANSIM* y se procede a establecer las condiciones de canal establecidas por el escenario de estudio con ayuda de *trafficontrol*. Una vez realizado esto, se generan transmisiones hacia el núcleo de red de parte de cada uno de los UEs mediante comandos *iperf3* que establecen la comunicación entre los puertos de ambas máquinas virtuales. Tras realizar esto, y haciendo uso de los *scripts* necesarios, se filtran los archivos JSON generados durante el paso anterior y se obtienen los parámetros de estudio establecidos con los que se diseñarán las gráficas y tablas correspondientes a cada escenario de estudio.

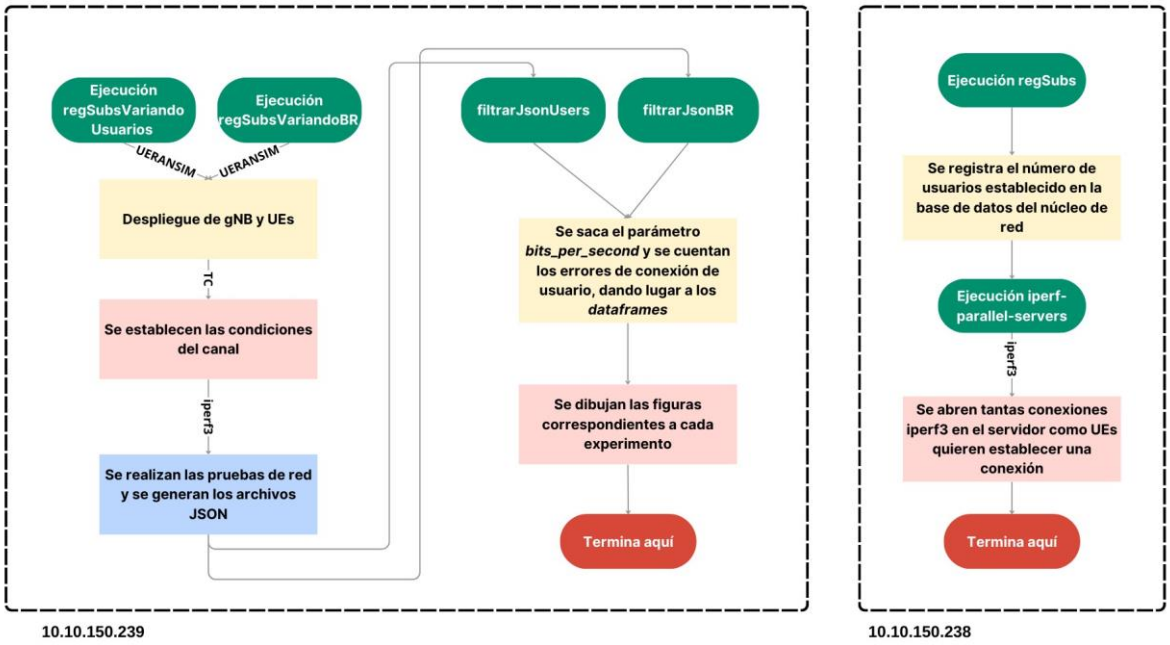

Figura 14. Flujo de ejecución de scripts.

Capítulo 3

Funcionamiento y caracterización de la red 5G

En este capítulo se van a describir los aspectos más relevantes del núcleo de red 5G en lo referente al plano de datos y de control. Asimismo, se analizará el funcionamiento de los protocolos involucrados comparando la especificación de dichos protocolos con su implementación en Open5GS.

3.1. Estructura de la red

Esquemáticamente, los sistemas 5G emplean la misma clase de elementos que las generaciones previas: UEs conformados por una estación móvil y un módulo de identificación del abonado (SIM, por sus siglas en inglés), el cual se trata de una tarjeta que contiene un pequeño chip integrado insertado en teléfonos móviles u otros dispositivos para permitirle realizar transmisiones de datos; [22] una red de acceso radio de nueva generación (NG-RAN – New Generation Radio Access Network) y el núcleo de red (5GC – 5G Core).

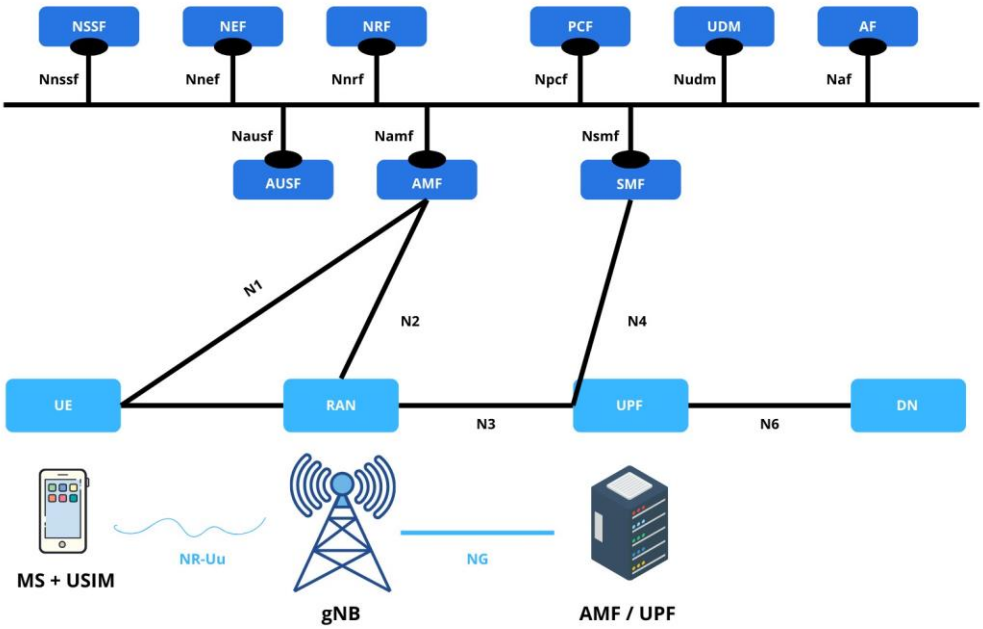

Figura 15. Esquema de red con interfaces y funciones de red.

En la Figura 15, el plano de usuario, compuesto por NFs involucradas en el transporte de los datos de usuario, se muestran en la parte inferior, mientras que en la parte superior aparecen las NFs esenciales dentro de plano de control. Tras realizar esta primera aproximación, se procede a describir las diferentes funciones:

- *User Plane Function* (UPF): se encarga de transmitir los paquetes de usuario entre el gNB y la red externa (en la mayoría de los casos, una red de tipo WAN). Además, también se conecta con el SMF. [23]

- *Access and Mobility Management Function* (AMF): se encarga de realizar la conexión de los usuarios y gestionar la movilidad. Está conectado directamente con los gNBs. [23]

- *Application Function* (AF): controla las aplicaciones, pudiendo participar también en el plano de usuario en caso de ser necesario. [24]

- *Session Management Function* (SMF): controla las llamadas y las sesiones, comunicándose con el UPF en base a ellas. [24]

- *Unified Data Management* (UDM): al igual que los HSS de 4G, centraliza el procesamiento de datos de los usuarios a través de sus interfaces para proporcionar servicios al resto de NFs, como puede ser la autorización de acceso, registro, servicios ininterrumpidos, etc. [25]

- *Policy Control Function* (PCF): controla que el tráfico de datos de los usuarios no exceda las capacidades contratadas. [24]

- *Network Repository Function* (NRF): gestiona el resto de NFs dando soporte al registro, eliminación y actualización de estos y sus servicios. [24]

- *Network Exposure Function* (NEF): utiliza el UDM para controlar la exposición de datos de control de los usuarios a funciones externas a la red 5G. [26]

- *Authentication Server Function* (AUSF): verifica las credenciales de los usuarios con el UDM durante el proceso de autenticación. [26]

Existen otras NFs dentro de la red, pero su impacto en ella es tan bajo (muchas son parte de otras NFs) que no se mencionarán en este trabajo. De entre todas las funciones, en este TFM se ha prestado atención a aquellas que se comunican directamente con la red de acceso, siendo estas el UPF y el AMF.

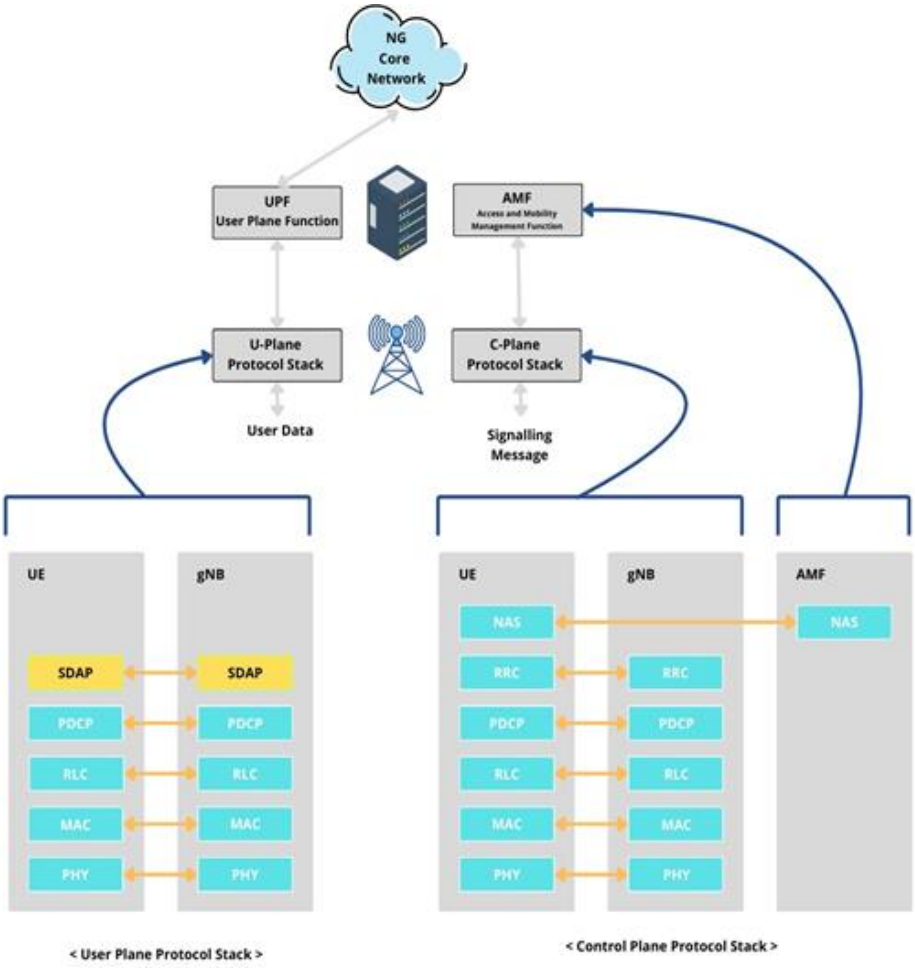

Figura 16. Diagrama de bloques de las pilas de protocolos.

3.2. Pila de protocolos

Existen dos pilas de protocolos en los sistemas 5G: una para el plano de usuario y otra para el plano de control. Su función es establecer las comunicaciones entre la mayoría de las NFs presentadas anteriormente y otras secundarias. Además, están recogidas en el estándar TS 23.501. [23] En la Figura 16 se adjunta un diagrama donde pueden visualizarse ambas para facilitar la comprensión, mostrando también la comunicación capa a capa que realizan con algunas de las NFs. Como se puede observar en la red de acceso, el UE y el gNB se comunican utilizando una pila de protocolos dedicada. En paralelo, el UE se comunica con el AMF (siempre a través del gNB).

3.2.1. Plano de control

Profundizando en la pila de protocolos del plano de control, en la Figura 17 se pueden observar las distintas capas de esta en detalle, además de los componentes de la red que participan, así como los interfaces que realizan tal tarea.

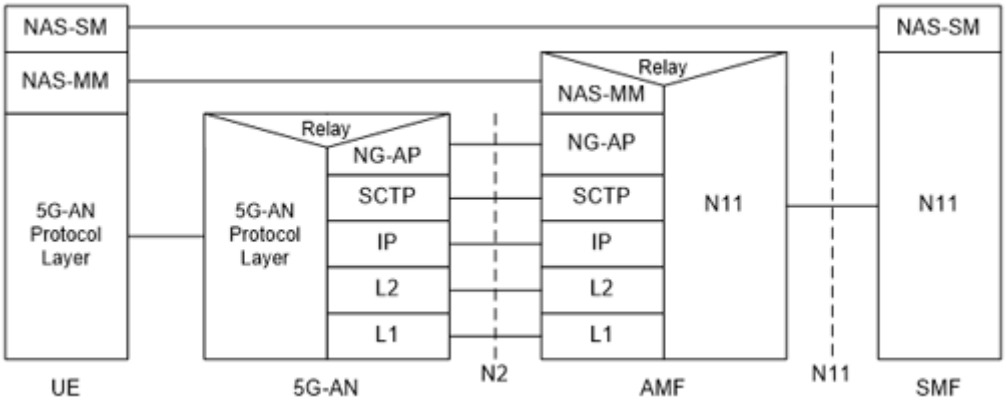

Figura 17. Pila de protocolos del plano de control.

A continuación, se procede a profundizar en cada una de las capas y en sus funciones dentro de la red:

- *Protocolo de gestión de sesión NAS* (NAS-SM – NAS Session Management): forma parte en el manejo de la gestión de sesiones entre el UE y el SMF. También controla el correcto establecimiento de la sesión de Protocol Data Unit (PDU) en el plano de usuario, así como su modificación y su liberación. Se transfiere a través del AMF. [24]

- *Protocolo de gestión de movilidad NAS* (NAS-MM – NAS Mobility Management): forma parte en el proceso de gestión de registros, de conexiones y activación y desactivación del plano de control. También es responsable del cifrado y la protección integral de la señalización NAS. [24]

- *Capa de protocolo 5G-AN*: esta pila de protocolos depende de las capas que sitúan por debajo en el esquema de conexión y establece las comunicaciones entre los UEs y el gNB. En este TFM no se profundizará en el protocolo radio.

- *Protocolo de aplicación de nueva generación* (NGAP – New Generation Application Protocol): se corresponde con la capa de aplicación entre el gNB y el AMF. Los paquetes NGAP están encapsulados en IP y SCTP. El protocolo SCTP se encarga de garantizar la entrega de los mensajes de señalización entre el AMF y el gNB vía interfaz N2, del cual se hablará en profundidad más adelante en este capítulo. [24] Posteriormente en este capítulo se detallará en profundidad este protocolo, así como el intercambio de paquetes de este.

3.2.2. Plano de usuario

A continuación, se procede a detallar la pila de protocolos empleada en el plano de usuario y relacionada con las sesiones PDU. En la Figura 18, como en el caso del plano de control, se muestran las capas de protocolo correspondientes al plano de usuario, así como los componentes que participan en la comunicación y los interfaces que la realizan.

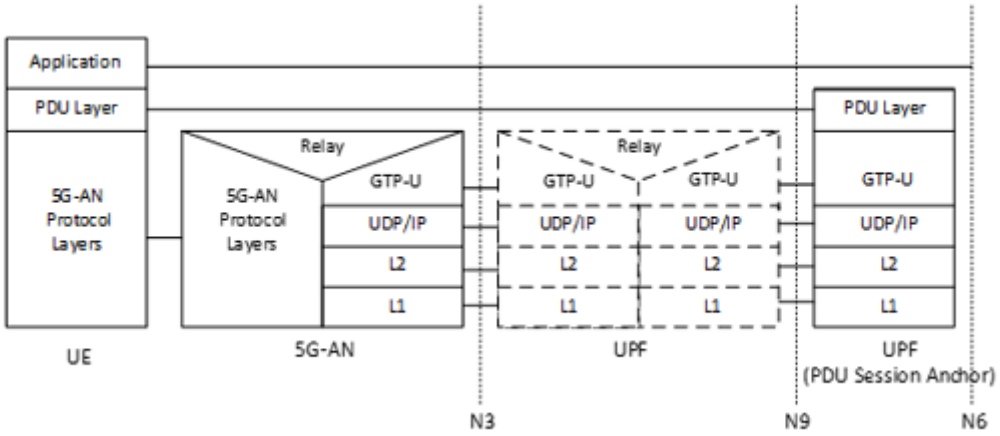

Figura 18. Pila de protocolos del plano de usuario.

- *Capa PDU*: esta capa se corresponde con las PDUs transmitidas entre los UEs y la red externa durante la sesión PDU. Cuando el tipo de la sesión PDU es IPv4 o IPv6, se corresponde con paquetes IPv4 o IPv6. [24]

- *Protocolo de tunelado GPRS* (GTP): se encarga de realizar el tunelado de la información de los usuarios sobre el interfaz N3 (en el cual se profundizará más adelante en este capítulo) entre el gNB y el UPF, mientras que en el interfaz N9 lo hace entre los distintos UPFs que pudieran existir en el núcleo de red. La finalidad de GTP es encapsular todas las PDUs de los usuarios a nivel de sesión. Esta capa también transmite el campo asociado al flujo QoS. [24] El protocolo GTP se transporta sobre datagramas IP usando como transporte UDP. Como se observará más adelante, esto supone que los datos de usuario se transportan desde la estación base hasta el UPF en un encapsulamiento de IP sobre IP.

3.3. Interfaces de la red

Los interfaces de red permiten la comunicación entre los distintos componentes de la red, ya sean NFs, dispositivos de la red u otras redes externas. Aunque hay un número extenso de estos, en las secciones consecuentes se procede a detallar los más destacables dentro de la red y/o los que cumplen una tarea más importante.

3.3.1. N2 – NGAP

El interfaz N2 comunica los distintos UEs y gNBs con el AMF en el plano de control. Dentro de sus funciones destaca el establecimiento, mantenimiento y liberación de la parte radio en las sesiones PDU, así como la transferencia de mensajes de señalización NAS entre los dos extremos. [27] Todo el intercambio de información en este interfaz se realiza mediante paquetes NGAP, los cuales tienen la estructura mostrada en la Figura 19.

Figura 19. Estructura de paquete NGAP.

Se puede observar que estos paquetes siempre están encapsulados en SCTP e IP. Como se mencionó en la introducción de este apartado, estos mensajes aparecen principalmente a la hora de establecer la conexión. En la Figura 20 se muestra, mediante una captura de Wireshark, el intercambio de mensajes realizado durante este procedimiento.

Time	Source	Destination	Protocol	Length	Info
17.612827887	10.0.0.185	10.0.0.162	SCTP	(a) 82	INIT
17.612877198	10.0.0.162	10.0.0.185	SCTP	(b) 306	INIT_ACK
17.617638646	10.0.0.185	10.0.0.162	SCTP	(c) 278	COOKIE_ECHO
17.617653624	10.0.0.162	10.0.0.185	SCTP	(d) 50	COOKIE_ACK
17.743601947	10.0.0.185	10.0.0.162	NGAP	(1) 122	NGSetupRequest
17.743633955	10.0.0.162	10.0.0.185	SCTP	62	SACK
17.743765481	10.0.0.162	10.0.0.185	NGAP	(2) 154	NGSetupResponse
17.748321631	10.0.0.185	10.0.0.162	SCTP	62	SACK
54.169937734	10.0.0.185	10.0.0.162	SCTP	98	HEARTBEAT
54.169966930	10.0.0.162	10.0.0.185	SCTP	98	HEARTBEAT_ACK
54.263189889	10.0.0.162	10.0.0.185	SCTP	98	HEARTBEAT
54.271443847	10.0.0.185	10.0.0.162	SCTP	98	HEARTBEAT_ACK
85.913728666	10.0.0.185	10.0.0.162	SCTP	98	HEARTBEAT
85.913757292	10.0.0.162	10.0.0.185	SCTP	98	HEARTBEAT_ACK
86.007300473	10.0.0.162	10.0.0.185	SCTP	98	HEARTBEAT
86.011339186	10.0.0.185	10.0.0.162	SCTP	98	HEARTBEAT_ACK
116.727282133	10.0.0.162	10.0.0.185	SCTP	98	HEARTBEAT
116.733572662	10.0.0.185	10.0.0.162	SCTP	98	HEARTBEAT_ACK
117.146247156	10.0.0.185	10.0.0.162	SCTP	98	HEARTBEAT
117.146277061	10.0.0.162	10.0.0.185	SCTP	98	HEARTBEAT_ACK
133.024439486	10.0.0.185	10.0.0.162	NGAP/NAS-5GS/NAS-5GS	(3) 202	InitialUEMessage, Registration request,
133.024559456	10.0.0.162	10.0.0.185	NGAP/NAS-5GS	(4) 130	DownlinkNASTransport, Security mode com
133.070702859	10.0.0.185	10.0.0.162	NGAP/NAS-5GS	(5) 146	UplinkNASTransport
133.071072917	10.0.0.162	10.0.0.185	NGAP/NAS-5GS	(6) 230	InitialContextSetupRequest
133.202769494	10.0.0.185	10.0.0.162	SCTP	1514	SACK DATA (Message Fragment)
133.203780489	10.0.0.185	10.0.0.162	NGAP	(7)1270	UERadioCapabilityInfoIndication
133.203821235	10.0.0.162	10.0.0.185	SCTP	62	SACK
133.230526533	10.0.0.185	10.0.0.162	NGAP	(8) 82	InitialContextSetupResponse
133.230884805	10.0.0.185	10.0.0.162	NGAP/NAS-5GS	(9) 118	UplinkNASTransport
133.230903080	10.0.0.162	10.0.0.185	SCTP	62	SACK
133.230965715	10.0.0.162	10.0.0.185	NGAP/NAS-5GS	(10) 138	DownlinkNASTransport
133.530039338	10.0.0.185	10.0.0.162	SCTP	62	SACK
134.042022139	10.0.0.185	10.0.0.162	NGAP/NAS-5GS	(11) 242	UplinkNASTransport
134.042163135	10.0.0.162	10.0.0.185	NGAP/NAS-5GS	(12) 306	PDUSessionResourceSetupRequest
134.077822092	10.0.0.185	10.0.0.162	NGAP	(13) 118	PDUSessionResourceSetupResponse
134.279258321	10.0.0.162	10.0.0.185	SCTP	62	SACK
134.451180277	192.168.3.2	8.8.8.8	GTP <DNS>	118	Standard query 0xb078 A www.google.com

Figura 20. Mensajes NGAP intercambiados durante el establecimiento de la conexión.

El proceso de establecimiento de conexión consta de 10 tipos distintos de mensajes (14, si contamos los mensajes SCTP de inicio de conexión). En la Figura 21 se muestra un diagrama de flujo de tráfico que caracteriza el intercambio de los mensajes y paquetes mostrados en la captura anterior, diferenciando entre tráfico SCTP y NGAP/NAS.

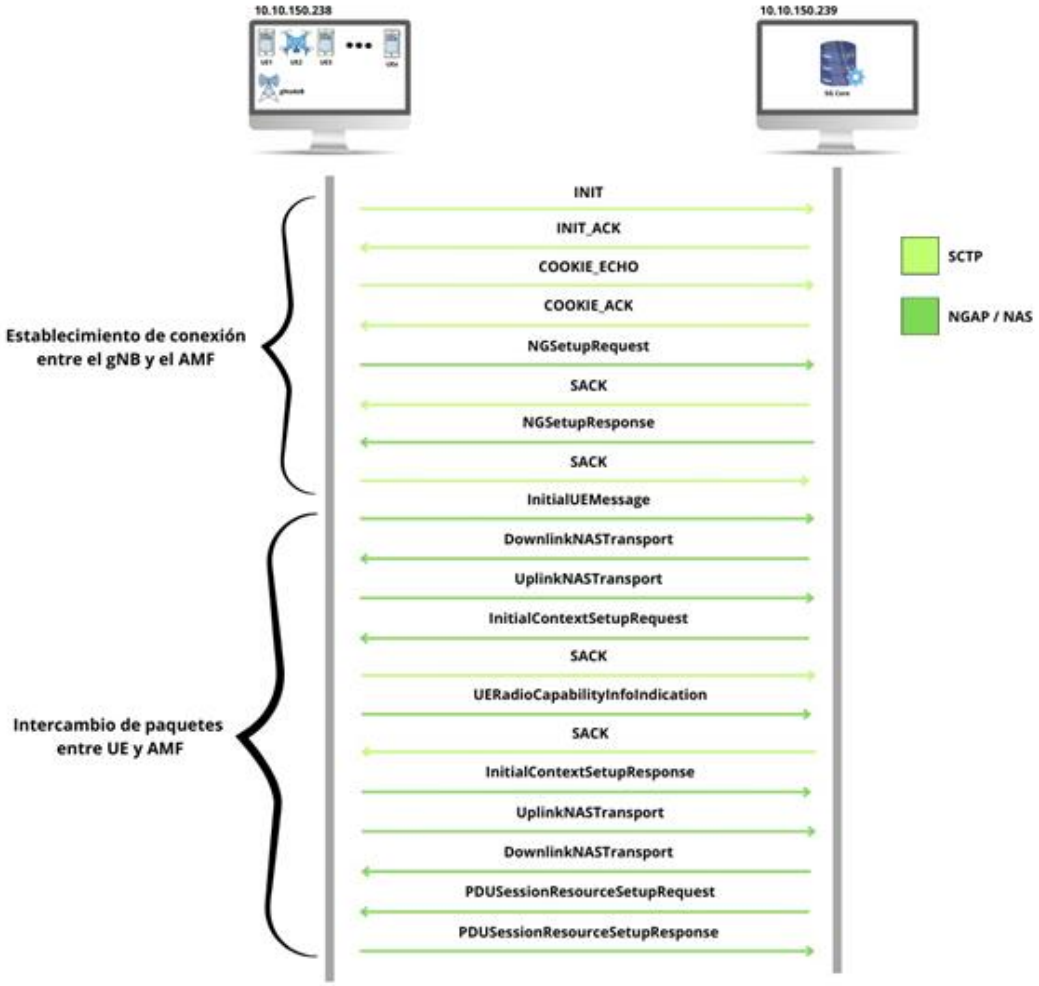

Figura 21. Intercambio de tráfico SCTP y NGAP entre las máquinas virtuales.

A continuación, y una vez establecido el orden de aparición de los mensajes, se procede a profundizar en cada uno de ellos, así como en sus características y funciones dentro del intercambio de paquetes [27]:

1) *NGSetupRequest*: es el mensaje inicial, utilizado por el gNB para establecer un contexto de conexión inicial con el núcleo de la red. Contiene varios elementos de información (IE – Information Element), cada uno de ellos con un ID, criticalidad y valor, ofreciendo detalles específicos sobre el gNB y sus capacidades.

2) *NGSetupResponse*: este mensaje es parte de la señalización entre el gNB y el AMF. Indica una correcta finalización del proceso de configuración NG que fue iniciado por el mensaje anterior.

3) *InitialUEMessage*: es una PDU de tipo NGAP cuya función es establecer un contacto inicial con la red entre el UE y la misma a través del gNB, transmitiendo el primer mensaje de tipo NAS, el cual transmite esencialmente información sobre la seguridad y la capacidad que la red necesita para autenticar al UE y proveer los servicios apropiados. Este mensaje tiene alta importancia ya que permite comunicar al UE sobre su presencia e iniciar los procedimientos necesarios para recibir servicios dentro de la red 5G, como son el registro o la petición de servicio.

4) *DownlinkNasTransport*: este mensaje, a pesar de ser simple, transmite información relacionada con las funciones de seguridad soportadas.

5) *UplinkNasTransport*: se trata de un mensaje esencial en escenarios donde el UE necesita enviar información al núcleo de la red que requiera un transporte seguro, como puede ser señalización para la petición de un servicio, respuesta a la autenticación, o cualquier señalización NAS relacionada a la gestión de la movilidad o de sesión en 5G.

6) *InitialContextSetupRequest*: se utiliza para establecer los contextos necesarios tanto en el plano de usuario como de control para un UE. Este mensaje inicia el proceso de configuración del contexto inicial después de que un usuario se autentique correctamente y esté autorizado a acceder a los servicios de la red. Además, es un paso crítico en el flujo de llamada, ya que prepara el escenario para todas las comunicaciones subsecuentes dentro de la red 5G.

7) *UERadioCapabilityInformation*: Se trata de un mecanismo de señalización radio gracias al cual los UEs pueden informar acerca de sus capacidades al gNB. Algunos de los datos más importantes en este mensaje sería información sobre el ancho de banda, ancho de banda para una sola portadora, ancho de banda combinado para *carrier aggregation*, MIMO, espaciado subportadora, etc. [28] No se profundizará en estos mensajes en este trabajo ya que forma parte de la comunicación radio, aspecto que no se ha planteado en la realización de este TFM.

8) *InitialContextSetupRequest*: es enviado desde el UE hacia el AMF como parte del proceso de configuración del contexto inicial del UE. Este mensaje indica el éxito en la configuración requerida por el UE. Esta configuración incluye la reserva de los recursos y configuraciones necesarios para facilitar la comunicación con el UE, tal como portadoras radio y configuraciones de seguridad. El éxito de este proceso permite al UE proceder con otras comunicaciones y transferencia de datos sobre la red 5G.

9) *PDUSessionResourceSetupRequest*: se trata de un mensaje utilizado por NGAP para establecer sesiones PDU, siendo estas las conexiones por las que se transmiten los datos de usuario entre el UE y la red. Esta petición es enviada desde el AMF al gNB. Además, este mensaje es crítico en la configuración de la sesión PDU, lo que incluye la configuración de la capa de transporte para los datos de plano de usuario y establecer los flujos QoS necesarios para que el UE envíe y reciba datos dentro de las condiciones de calidad de servicio especificadas.

10) *PDUSessionResourceSetupResponse*: este mensaje es enviado desde el gNB al AMF como respuesta al mensaje anterior, indicando que los recursos requeridos para la sesión PDU han sido correctamente configurados, o, en su defecto, que ha ocurrido un problema con la configuración. El éxito de este proceso significa que el gNB ha reservado los recursos necesarios para la sesión PDU y que está preparado para el intercambio de datos relacionados a esa sesión específica. La información de capa de transporte incluida en la respuesta es crítica para el enrutado de los paquetes recibidos y enviados por el UE.

3.3.2. N3 – GTPU

El interfaz N3 se caracteriza principalmente por el uso de túneles GTP, los cuales transportan T-PDUs (PDUs tuneladas) encapsuladas en paquetes IPv4 y mensajes de señalización entre el gNB y el UPF. Estos *endpoints* pueden identificarse mediante la identificación de punto final de túnel (TEID – Tunnel Endpoint ID), el cual está presente en la cabecera GTP e indica el túnel en particular al que pertenece. Una T-PDU es básicamente un paquete IP enviado por el UE (si es en sentido ascendente) o por el UPF (si es en sentido descendente) sobre uno o más túneles desde la red externa. Además, un paquete T-PDU debe ser encapsulado por el remitente con una cabecera GTP, otra UDP y otra IP. En la Figura 22 se adjunta una captura de un comando *ping* en dirección a los servidores de Google en el interfaz N3, donde se puede visualizar claramente el tunelado realizado de los datos entre N3 y el UPF.

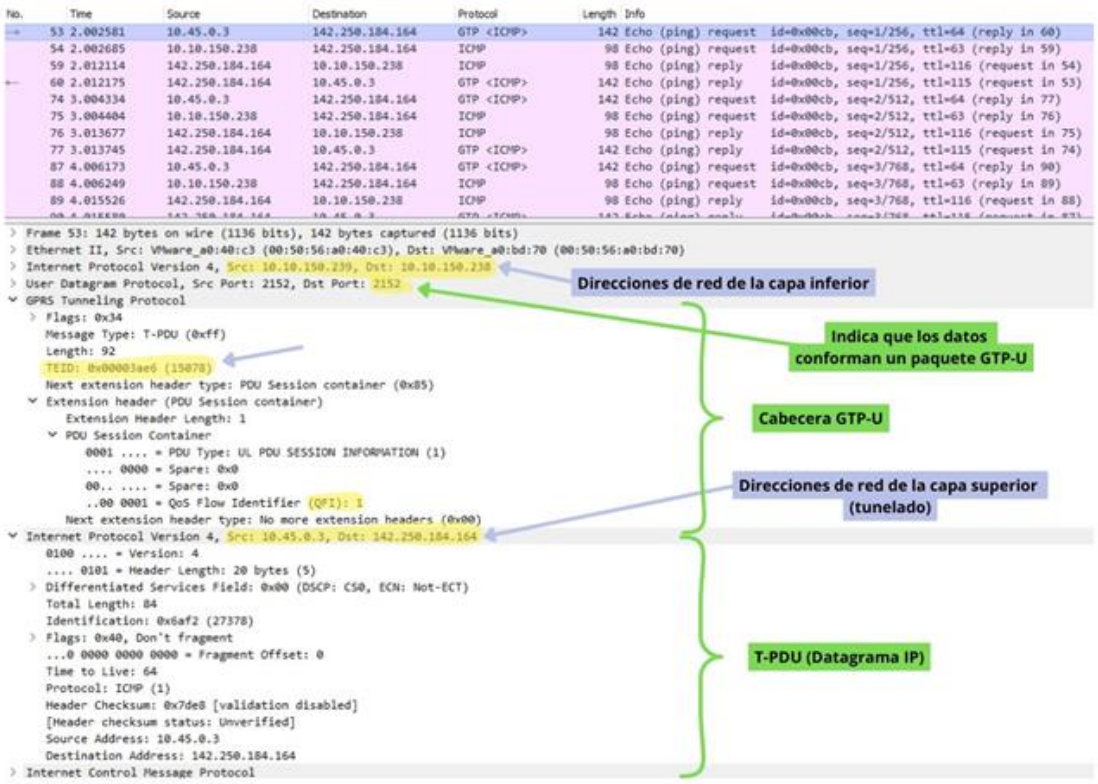

Figura 22. Captura intercambio de datos en interfaz N3.

La dirección 10.45.0.3 (interfaz *uesimtun0*, por el nombre que le otorga *UERANSIM* al generarlo) representa el tunelado establecido entre el gNB y el UPF para ese usuario. En la Figura 23 se ilustran las cabeceras que se añaden a esta PDU.

Figura 23. Estructura de paquete T-PDU.

La primera cabecera IP se correspondería con la comunicación establecida entre las máquinas virtuales, como se puede observar por las direcciones IP de origen (10.10.150.239) y de destino (10.10.150.238). Después, se tendría la cabecera UDP, en la cual se destaca el puerto de conexión (2152), el cual es el puerto por defecto para la transmisión de paquetes GTPU. A continuación, se tiene la cabecera GTP, la cual contiene información sobre el gNB, así como de la calidad de servicio establecida para la conexión. Por debajo, se encontraría la segunda cabecera IP, correspondiente los datos de usuario. Como se puede observar en la Figura 21, esta cabecera tiene como dirección IP de origen 10.45.0.3 y destino 142.250.184.164 (dirección IP de servidor Google). Por último, se tendría el payload, que en este caso sería ICMP ya que se está realizando un comando *ping*. Una vez que el datagrama llega al UPF, este se encarga de eliminar las cabeceras GTP ý redireccionar el tráfico al exterior. En este sentido, y a nivel IP, el UPF provee funcionalidades de servidor DHCP para proporcionar direcciones IP a los usuarios (en este caso dentro de la red 10.45.0.0) y de NAT para traducir de direcciones locales a globales y viceversa.

En la práctica, con *UERANSIM* se genera un interfaz virtual por cada UE que se instanciado recibiendo el nombre de *uesimtun0*, *uesimtun1*, *uesimtun2*, etc. de forma consecutiva. Posteriormente, en el gNB se crea un túnel con el UPF para el tráfico de cada UE. Cabe destacar que estos túneles comparten la capacidad total del canal por el que se transmite la información (en este caso, comparten la capacidad del interfaz de la máquina virtual cliente). En la Figura 24 se adjunta un esquema de red indicando los túneles y direcciones IP obtenidas en una ejecución.

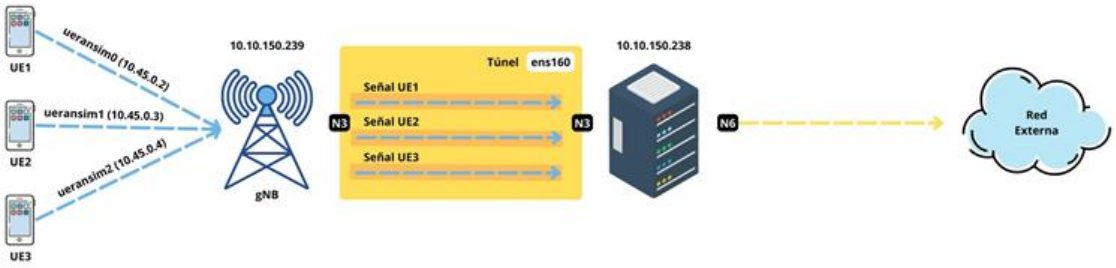

Figura 24. Ejemplo tunelado dirección UE - UPF.

Como se puede observar, los UE adquieren direcciones de red local (10.45.0.21/24) que únicamente son válidas dentro de la red 5G. Es decir, estas direcciones únicamente permiten comunicarse con el UPF a través de los túneles. Cabe indicar que el direccionamiento privado de los UEs imposibilita enviar datos de usuario al resto de funciones de red (que se encuentran en la red 10.10.150.0/24), con las que únicamente se intercambia información en el plano de control. Una vez que el tráfico alcanza al UPF este lo renvía al exterior mediante el interfaz N6. Aunque esta interfaz forma parte de la arquitectura de red no se ha encontrado una funcionalidad concreta ni en las especificaciones ni en la práctica. Únicamente se ha observado que el UPF realiza funciones de NAT, por lo que en la interfaz N6 se observan los mensajes ICMP correspondientes al comando PING.

Capítulo 4

Validación del entorno y análisis de rendimiento

En este capítulo se validará el entorno completo, mostrando las diferentes posibilidades que existen para la emulación de escenarios. Posteriormente se estudiará el rendimiento experimentado por los usuarios ante diferentes configuraciones del *backhaul*, teniendo en cuenta diferentes figuras de mérito.

4.1. Validación del despliegue y obtención de medidas

En esta sección, se procede a explicar el funcionamiento básico de los experimentos realizados, detallando los pasos seguidos y adjuntando capturas de los mismo para comprender mejor el proceso de generación de UEs, así como su conexión y comunicación con el UPF en el lado del núcleo de red. En la Figura 25 se muestra un esquema de red básico donde se incluyen los interfaces utilizados durante el despliegue, así como la conexión que realizan y los tipos de paquetes que transmiten cada uno de ellos.

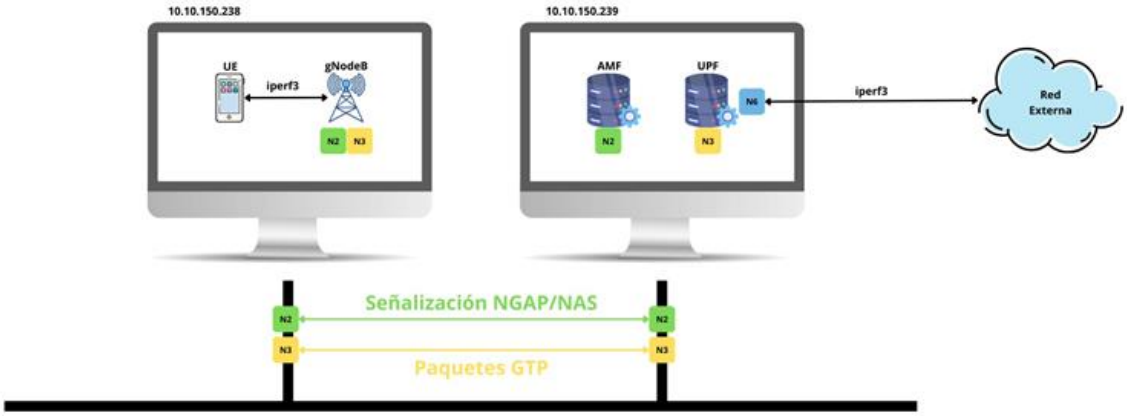

Figura 25. Esquema de interfaces básico.

4.1.1. Instanciación del gNB

El primer paso es generar un gNB en la red 5G, el cual permitirá la comunicación entre los UEs y el core de la red. Para ello, se ejecuta el script *nr-gnb* descrito en la Sección 2.4.4. En la Figura 26 se adjunta una captura de pantalla con el resultado obtenido para esta ejecución.

```
administrator@jairo-suarez-2:~/UERANSIM$ sudo ./build/nr-gnb -c ./config/open5gs-gnb.yaml
UERANSIM v3.2.6
[2024-07-03 02:35:00.612] [sctp] [info] Trying to establish SCTP connection... (10.10.150.238:38412)
[2024-07-03 02:35:00.616] [sctp] [info] SCTP connection established (10.10.150.238:38412)
[2024-07-03 02:35:00.617] [sctp] [debug] SCTP association setup ascId[1231]
[2024-07-03 02:35:00.617] [ngap] [debug] Sending NG Setup Request
[2024-07-03 02:35:00.626] [ngap] [debug] NG Setup Response received
[2024-07-03 02:35:00.627] [ngap] [info] NG Setup procedure is successful
```

Figura 26. Generación de gNB.

Como se puede observar en la Figura 26, se produce un establecimiento de conexión SCTP. A continuación, se realiza el registro de la estación base en el núcleo de red usando el protocolo NGAP, tal como se ha comentado en las secciones anteriores.

4.1.2. Instanciación de los UEs

A continuación, se generan dos UEs que se conectarán a la red para, de forma sucesiva, intercambiar información con el núcleo de red a través del gNB y del UPF. En la Figura 27 se adjunta una captura de pantalla de los resultados obtenidos tras generar dos UEs y conectarlos simultáneamente al gNB previamente desplegado, mientras que en la Figura 28 se observa el intercambio de mensajes NAS de señalización entre los UEs y el AMF a través del gNB en su proceso de conexión.

```
[2024-07-03 02:47:00.282] [999700000000001|nas] [info] UE switches to state [MM-DEREGISTERED/PLMN-SEARCH]
[2024-07-03 02:47:00.284] [999700000000001|nas] [info] Selected plmn[999/70]
[2024-07-03 02:47:00.284] [999700000000001|rrc] [info] Selected cell plmn[999/70] tac[1] category[SUITABLE]
[2024-07-03 02:47:00.284] [999700000000001|nas] [info] UE switches to state [MM-DEREGISTERED/PS]
[2024-07-03 02:47:00.284] [999700000000001|nas] [info] UE switches to state [MM-DEREGISTERED/NORMAL-SERVICE]
[2024-07-03 02:47:00.286] [999700000000002|nas] [info] UE switches to state [MM-DEREGISTERED/PLMN-SEARCH]
[2024-07-03 02:47:00.287] [999700000000002|nas] [info] Selected plmn[999/70]
[2024-07-03 02:47:00.287] [999700000000002|rrc] [info] Selected cell plmn[999/70] tac[1] category[SUITABLE]
[2024-07-03 02:47:00.287] [999700000000002|nas] [info] UE switches to state [MM-DEREGISTERED/PS]
[2024-07-03 02:47:00.287] [999700000000002|nas] [info] UE switches to state [MM-DEREGISTERED/NORMAL-SERVICE]
[2024-07-03 02:47:00.289] [999700000000002|nas] [info] UE switches to state [MM-REGISTER-INITIATED]
[2024-07-03 02:47:00.290] [999700000000002|rrc] [info] RRC connection established
[2024-07-03 02:47:00.290] [999700000000002|rrc] [info] UE switches to state [RRC-CONNECTED]
[2024-07-03 02:47:00.290] [999700000000002|nas] [info] UE switches to state [CM-CONNECTED]
[2024-07-03 02:47:00.292] [999700000000001|rrc] [info] RRC connection established
[2024-07-03 02:47:00.293] [999700000000001|rrc] [info] UE switches to state [RRC-CONNECTED]
[2024-07-03 02:47:00.293] [999700000000001|nas] [info] UE switches to state [MM-REGISTER-INITIATED]
[2024-07-03 02:47:00.293] [999700000000001|nas] [info] UE switches to state [CM-CONNECTED]
[2024-07-03 02:47:00.318] [999700000000002|nas] [info] UE switches to state [MM-REGISTERED/NORMAL-SERVICE]
[2024-07-03 02:47:00.319] [999700000000002|nas] [info] Initial Registration is successful
[2024-07-03 02:47:00.325] [999700000000001|nas] [info] UE switches to state [MM-REGISTERED/NORMAL-SERVICE]
[2024-07-03 02:47:00.325] [999700000000001|nas] [info] Initial Registration is successful
[2024-07-03 02:47:00.340] [999700000000002|nas] [info] PDU Session establishment is successful PSI[1]
[2024-07-03 02:47:00.349] [999700000000001|nas] [info] PDU Session establishment is successful PSI[1]
[2024-07-03 02:47:00.385] [999700000000002|app] [info] Connection setup for PDU session[1] is successful, TUN interface[uesimtun0, 10.45.0.9] is up.
[2024-07-03 02:47:00.428] [999700000000001|app] [info] Connection setup for PDU session[1] is successful, TUN interface[uesimtun1, 10.45.0.10] is up.
```

Figura 27. Generación y conexión de 2 UEs al AMF.

En la Figura 27 destaca el intercambio de mensajes de señalización NAS, definidos previamente en este trabajo, para autentificar a ambos UEs, así como los dos últimos mensajes resaltados. Estos mensajes indican el interfaz local asociado a cada UE, y por los cuáles enviarán y recibirán toda la información intercambiada, recibiendo los nombres de *uesimtun0* y *uesimtun1* respectivamente. Como se puede observar, estos interfaces adquieren una dirección IP que es facilitada por el UPF. Además, en cada mensaje se puede observar el IMSI del UE al que corresponde cada mensaje, así como el tipo de mensaje.

```
[2024-07-03 02:59:43.375] [rrc] [debug] UE[1] new signal detected
[2024-07-03 02:59:43.376] [rrc] [debug] UE[2] new signal detected
[2024-07-03 02:59:43.385] [rrc] [info] RRC Setup for UE[1]
[2024-07-03 02:59:43.385] [ngap] [debug] Initial NAS message received from UE[1]
[2024-07-03 02:59:43.387] [rrc] [info] RRC Setup for UE[2]
[2024-07-03 02:59:43.387] [ngap] [debug] Initial NAS message received from UE[2]
[2024-07-03 02:59:43.415] [ngap] [debug] Initial Context Setup Request received
[2024-07-03 02:59:43.421] [ngap] [debug] Initial Context Setup Request received
[2024-07-03 02:59:43.440] [ngap] [info] PDU session resource(s) setup for UE[1] count[1]
[2024-07-03 02:59:43.454] [ngap] [info] PDU session resource(s) setup for UE[2] count[1]
```

Figura 28. Resultados en el gNB al conectar los UE.

En la Figura 28 se puede observar todo el intercambio de mensajes NGAP realizado entre los UEs y el UPF a través del gNB. Estos mensajes coinciden con los definidos en el capítulo anterior.

4.1.3. Conexión iperf

El siguiente paso es realizar el envío de información desde los usuarios. En un entorno real, el tráfico de usuario se enviaría a otra red. En este trabajo, dado que el objetivo es estudiar el impacto del *backhaul*, el intercambio de tráfico se realiza desde los UEs a la máquina virtual donde se encuentra el núcleo de red. Para ello, se hace uso de una técnica de *threading* en la cual se ejecutan varios procesos *iperf3* al mismo tiempo, uno por cada UE conectado al gNB. Para realizar estas conexiones, se ejecuta de forma automatizada el comando que se muestra en la Figura 29.

```
administrator@jairo-suarez-2:~/UERANSIM$ sudo iperf3 -c [dirección IP núcleo red] -b [tasa del UE] -R -p [número del puerto] -t [número de iteraciones] -J --logfile [carpeta/nombre del archivo de guardado] -B [dirección IP del interfaz uesimtun]
```

Figura 29. Comando iperf3 ejecutado para cada UE.

Los distintos parámetros o *flags* que aparecen en el comando se han explicado en detalle en el Anexo 1 adjuntado. Además, tras la ejecución de estos comandos, se generaron los archivos JSON de los cuales se extraería la información en la que se basan las gráficas y tablas que aparecen en las secciones posteriores. En todas las medidas realizadas el tráfico generado corresponde a flujos TCP, al tratarse del protocolo de transporte más común para la mayoría de las aplicaciones.

4.2. Escenarios de evaluación

Los análisis realizados se pueden agrupar en dos vertientes: una variando el número de usuarios que se conectan a la red, y otra variando la tasa binaria a la que transmiten un número fijo de usuarios conectados a la red. Asimismo, se ha estudiado el tiempo de conexión cuando un número de usuarios trata de conectarse simultáneamente a la red. Aunque estas casuísticas son genéricas, como se comentará posteriormente, pueden ser representativas de un escenario en el que una estación base está embarcada en un dron y proporciona cobertura 5G en una determinada área, mientras utiliza otra tecnología para comunicarse con el núcleo de la red.

En el primer caso, se comienza conectando un UE a la red para que, posteriormente, comience a intercambiar datos con el núcleo de red mediante un proceso *iperf3* que durará 100 intervalos de tiempo (de 1 segundo cada uno de ellos). De esta manera, se obtiene un archivo JSON con 100 elementos, uno por cada intervalo. De cada uno de ellos se extraerá uno de los parámetros de estudio de este trabajo: la tasa binaria. Este valor aparece para cada uno de los intervalos recibiendo el nombre de *bits_per_second*. En la Figura 30 se pueden observar, encuadrados en rojo, estos campos dentro de un archivo JSON de ejemplo para varios intervalos.

```
"streams": [
                {
                    "socket": 6,
                    "start": 1.216292,
                    "end": 2.000821,
                    "seconds": 0.78452897071838379,
                    "bytes": 0,
                    "bits_per_second": 0,
                    "omitted": false,
                    "sender": false
                }
            ],
            "sum": {
                "start": 1.216292,
                "end": 2.000821,
                "seconds": 0.78452897071838379,
                "bytes": 0,
                "bits_per_second": 0,
                "omitted": false,
                "sender": false
            }
        },
        {
            "streams": [
                {
                    "socket": 6,
                    "start": 2.000821,
                    "end": 3.000621,
                    "seconds": 0.99980002641677856,
                    "bytes": 5392,
                    "bits_per_second": 43144.627785815086,
                    "omitted": false,
                    "sender": false
                }
            ],
            "sum": {
                "start": 2.000821,
                "end": 3.000621,
                "seconds": 0.99980002641677856,
                "bytes": 5392,
                "bits_per_second": 43144.627785815086,
                "omitted": false,
                "sender": false
            }
        },
```


Figura 30. Ejemplo de archivo JSON.

Para este primer caso, se realizarán los experimentos incrementando los usuarios que se conectan desde 1 a 10 usuarios (transmitiendo cada uno con una tasa binaria equivalente a un 10% de la capacidad total del canal) para observar el comportamiento de la red al incrementar el número de usuarios que se conectan a ella. Es decir, con 1 usuario, se ocupará un 10% del canal, con 2 usuarios el 20% del canal y así sucesivamente hasta 10 usuarios. Este experimento se realizará para 3 tipos de canales emulados con diferentes características. La emulación de los canales se realiza usando el comando *trafficcontrol* descrito anteriormente y los parámetros que se modifican son el retardo, la capacidad del canal y probabilidad de pérdida. En concreto, se establecerán las configuraciones definidas en [29] para emular comunicaciones WiFi, celular y satelital. Estos canales serán comunes a todos los experimentos realizados tanto para este primer caso como para el segundo caso, en el que se varía la tasa por usuarios.

Concretamente, en la Tabla 2 se indican los valores utilizados para la emulación de cada tecnología. En este sentido, resulta conveniente aclarar que los valores mostrados en la Tabla 3, y obtenidos de [29], se corresponden a la capacidad de una conexión. Como se ha mencionado, los escenarios analizados representarían situaciones en las que, por ejemplo, el gNB se encuentra embarcado en un dron y utiliza una de las tecnologías de la Tabla 3 como backhaul para comunicarse con tierra.

	# usuarios	**Retardo (ms)**	**Tasa pérdidas (%)**	**Tasa usuario (Mbps)**	**Capacidad canal (Mbps)**
WiFi	1 hasta 10	25	0, 1, 2, 3, 5 y 10	2	20
Celular	1 hasta 10	100	0, 1, 2, 3, 5 y 10	1	10
Satelital	1 hasta 10	600	0, 1, 2, 3, 5 y 10	0.15	1.5

Tabla 3. Condiciones de estudio para experimento de variación de usuarios.

Para el segundo caso de estudio, se emplearán igualmente los 3 escenarios presentados anteriormente, pero el número de usuarios se mantendrá siempre en 5. De esta manera, estos 5 usuarios comenzarán transmitiendo a un 10% de la capacidad del canal entre todos (repartida equitativamente entre los mismos) y se irá incrementando hasta que alcance el 100% del canal. Así, se podrá observar el comportamiento de la red al incrementar la tasa a la que transmite cada uno de ellos.

En la Tabla 4 se indican las tasas concretas por usuario utilizadas en este segundo caso. Como se ha mencionado, el enlace de *backhaul* se modelará igual que en el caso anterior de acuerdo con lo indicado en la Tabla 3.

	# usuarios	**Tasa usuario (Mbps)**	**Capacidad canal (Mbps)**	**# iteraciones**
WiFi	5	De 0.4 a 4 con paso 0.4	20	10
Celular	5	De 0.2 a 2 con paso 0.2	10	10
Satelital	5	De 0.03 a 0.3 con paso 0.03	1.5	10

Tabla 4. Condiciones de estudio para experimento de variación de tasas binarias.

4.3 Variación del número de usuarios

A continuación, en la Figura 31, Figura 32 y Figura 33, se muestran los resultados obtenidos al variar el número de usuarios. En concreto, se presenta la distribución de la tasa binaria obtenida en cada intervalo mediante un diagrama de caja. En este diagrama se indica con un triángulo (verde) y una línea (naranja) la media y la mediana de la tasa. Además, los límites superior e inferior de la caja indican los percentiles del 25 y 75% respectivamente. Finalmente, las líneas que se extienden desde la caja indican valores extremos de las muestras (aproximadamente los percentiles del 5 y 95%).

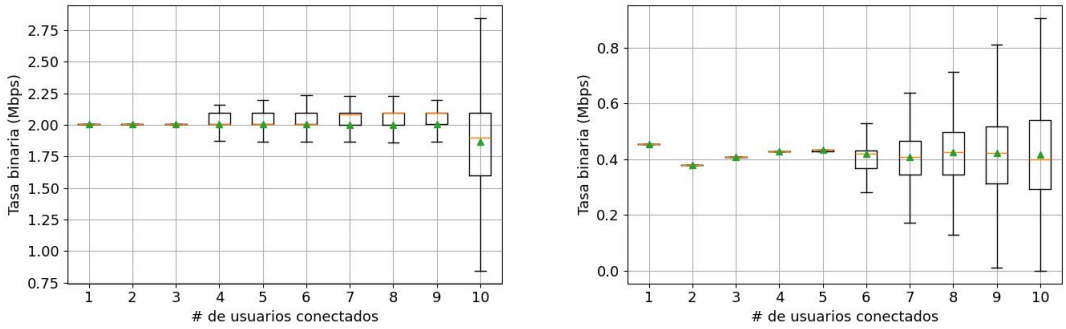

Figura 31. Distribución de la tasa al variar el número de usuarios con un enlace WiFi. Pérdidas del 0% (izq.) y 10% (dcha.)

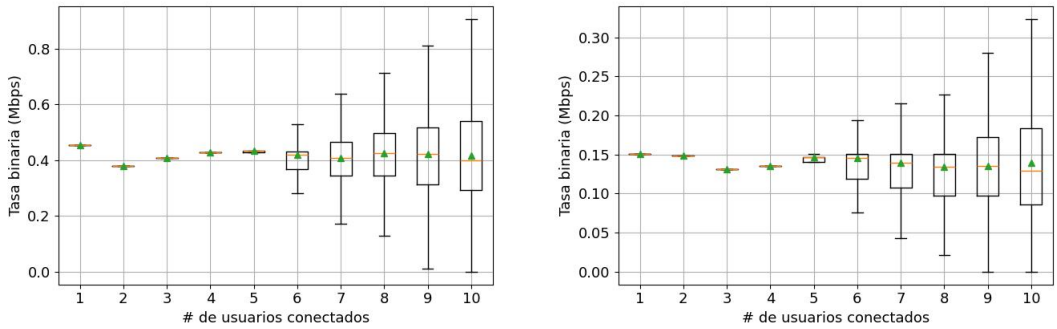

Figura 32. Distribución de la tasa al variar el número de usuarios con un enlace celular. Pérdidas del 0% (izq.) y 10% (dcha.)

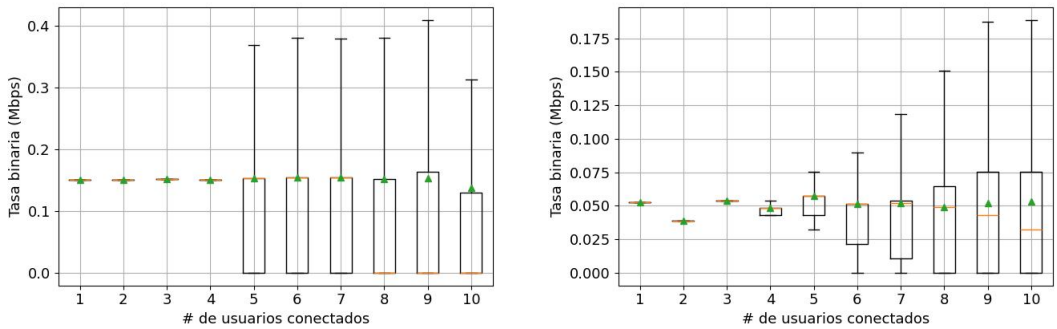

Figura 33. Distribución de la tasa al variar el número de usuarios en un enlace satelital. Pérdidas del 0% (izq.) y 10% (dcha.)

En todos los casos, se representan los resultados obtenidos al configurar los valores de pérdidas extremos (0 y 10%). En el Anexo 3 se incluyen el resto de las configuraciones.

En primer lugar, y como es de esperar al aumentar el número de usuarios conectados, aumenta también la saturación del canal, reduciéndose de esta forma la tasa binaria a la que pueden transmitir ya que se está compartiendo ese ancho de banda con otros usuarios. Además, si se añade una tasa de pérdidas al canal del 10% (revisar Anexo 3 para ver resultados con otras tasas de pérdidas) estas tasas binarias se hacen aún menores ya que parte de la información transmitida se está desechando por las condiciones del canal.

Comparando los distintos escenarios (WiFi, celular y satelital) se puede observar que, a medida que se establecen condiciones más restrictivas en términos de tasas de pérdidas, las tasas binarias tienen un comportamiento más inestable. Mientras que para el escenario WiFi con una tasa de pérdidas del 0% la tasa binaria media no varía de forma abrupta al aumentar los usuarios, cuando se aumenta esa tasa a un valor de 10% se comienzan a presentar inestabilidades, lo que conlleva variaciones en las tasas binarias de los usuarios.

Los resultados de la distribución de la tasa se han obtenido para aquellos usuarios que logran terminar con éxito la transferencia de datos. Sin embargo, debido a las pérdidas y la saturación, se dan situaciones en las que las conexiones TCP se cierran. Por ello se ha estudiado el porcentaje de usuarios que no acaban la comunicación en cada una de las configuraciones utilizadas. En el caso de las configuraciones que emulan comunicaciones WiFi y celular prácticamente no se han observado cierres de conexión. Por ello, únicamente se muestran los valores para el enlace satelital en la Tabla 5.

Satélite (%)	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**
0%	0	0	0	0	0	0	14.3	0	0	0
1%	0	0	0	0	20	0	0	0	0	0
2%	0	0	0	33.3	0	0	0	12.5	11.1	0
3%	0	0	0	25	0	0	0	12.5	11.1	20
5%	100	0	0	25	20	16.6	14.3	0	11.1	0
10%	0	0	33.3	0	20	0	14.3	12.5	11.1	10

Tabla 5. Errores de usuario (%) para escenario Satélite.

El mayor número de desconexiones en enlace satelital se debe a que las condiciones del canal son las más restrictivas de los tres (véase la Tabla 3), especialmente debido al mayor retardo. La tasa de pérdidas también influye en el número de desconexiones, suponiendo una mayor tasa de pérdidas un mayor número de desconexiones generalmente.

4.4 Variación de la tasa por usuario

A continuación, se analiza el efecto de incrementar la tasa por usuario, manteniendo fijo el número de estos. Como en el caso de variación de usuarios, se han realizado 10 iteraciones para cada conjunto de escenarios y porcentajes de pérdidas. En los resultados, mostrados en la Figura 34, Figura 35 y Figura 36, se han agrupado todas las iteraciones realizadas y se han mostrado las tasas binarias.

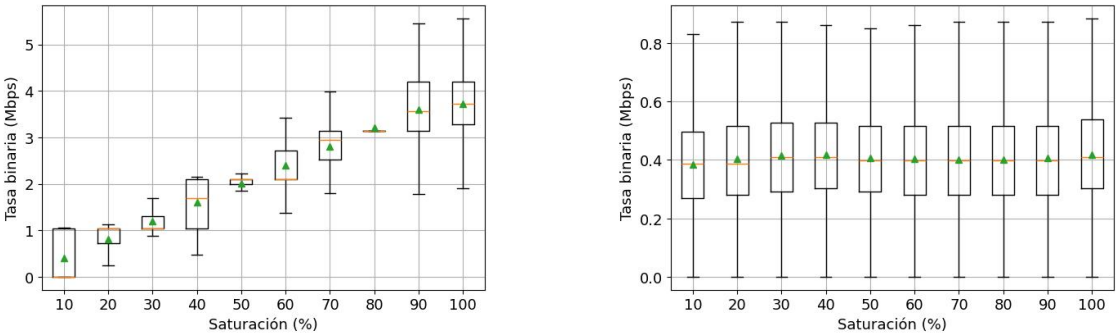

Figura 34. Distribución de la tasa al variar el número de usuarios con un enlace WiFi. Pérdidas del 0% (izq.) y 10% (dcha.)

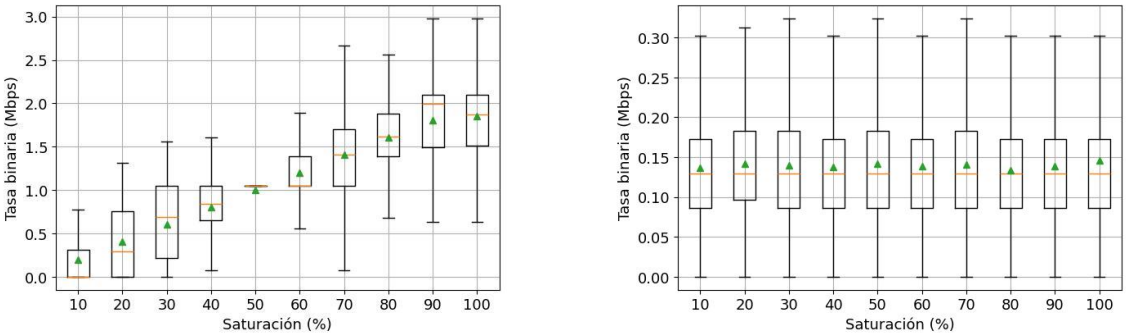

Figura 35. Distribución de la tasa al variar el número de usuarios con un enlace celular. Pérdidas del 0% (izq.) y 10% (dcha.)

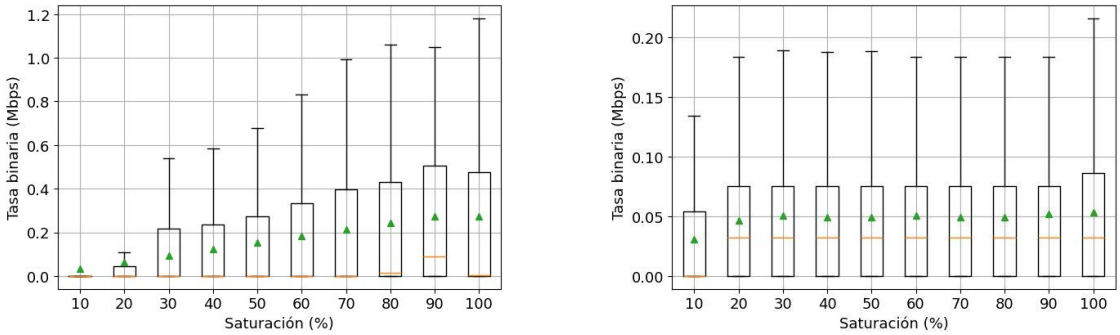

Figura 36. Distribución de la tasa al variar el número de usuarios con un enlace satelital. Pérdidas del 0% (izq.) y 10% (dcha.)

Analizando los resultados obtenidos, se puede observar que, cuando la tasa de pérdidas es del 0%, ninguno de los canales llega a saturarse salvo en el caso del 100% de saturación, funcionando correctamente a medida que se va aumentando la tasa binaria por usuario. Sin embargo, a medida que va aumentando el porcentaje de pérdidas introducido en el canal (véase también el Anexo 3), el canal se va a saturando cada vez más pronto para un porcentaje más bajo de saturación, producto de que la tasa de pérdidas del canal está limitando la velocidad binaria de transmisión, llegando incluso a limitar el canal con baja saturación de usuarios (2 o 3 usuarios).

Como en el caso de variación de usuarios, a medida que las condiciones del canal se tornan más restrictivas, las tasas binarias se ven afectadas reduciéndose drásticamente y volviéndose inestables. Nuevamente, no se observan prácticamente desconexiones en las emulaciones de canales WiFi y celular, por lo que únicamente se muestran los resultados con el canal satelital en la Tabla 6.

Satélite (%)	**10%**	**20%**	**30%**	**40%**	**50%**	**60%**	**70%**	**80%**	**90%**	**100%**
0%	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1%	6	4	0	4	2	2	0	4	2	0
2%	6	2	2	10	0	0	6	6	4	2
3%	2	2	6	8	4	6	8	8	8	4
5%	10	4	6	6	12	6	4	4	10	16
10%	6	14	20	16	14	12	20	20	16	20

Tabla 6. Errores de usuario (%) para escenario Satélite.

Como se puede observar en este caso, el porcentaje de pérdidas es mayor que al aumentar el número de usuarios. Esto se puede deber a que el número de conexiones es menor, aunque tienen mayor tasa. A su vez, esto provoca que cada desconexión tenga un mayor peso proporcional.

4.5 Tiempos de conexión de usuario

Para completar el análisis, y ya que la herramienta *UERANSIM* facilita esta medición, se han registrado las duraciones de los procesos de conexión entre un número concreto de usuarios y el núcleo de la red correspondiente bajo ciertas condiciones. En concreto, se mide el tiempo desde que el usuario inicia la conexión hasta que adquiere dirección IP y, por lo tanto, podría iniciar comunicaciones a nivel de aplicación. En la Tabla 7 se muestran las configuraciones utilizadas en este análisis.

Tecnología	**Retardo (ms)**	**Tasa pérdidas (%)**	**# usuarios**
WiFi	50	0 a 10 con paso 5	5, 10, 20 y 50
Celular	100	0 a 10 con paso 5	5, 10, 20 y 50
Satélite	600	0 a 10 con paso 5	5, 10, 20 y 50

Tabla 7. Escenarios de estudio para experimento de tiempos

A continuación, en la Figura 37 y Figura 38 se adjuntan las gráficas generadas en base a los resultados obtenidos para los tres escenarios descritos en la tabla anterior.

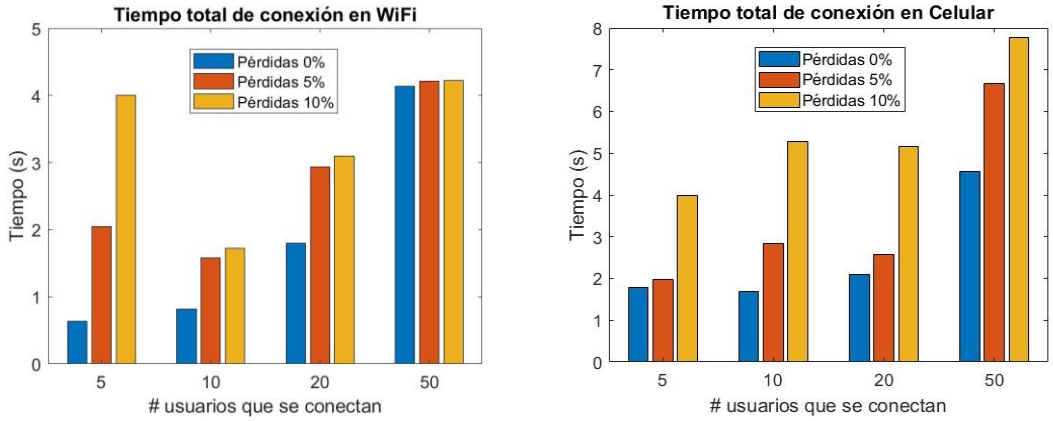

Figura 37. Tiempo total de conexión requerido en escenario WiFi (izq.) y Tiempo total de conexión requerido en escenario Celular (dcha.).

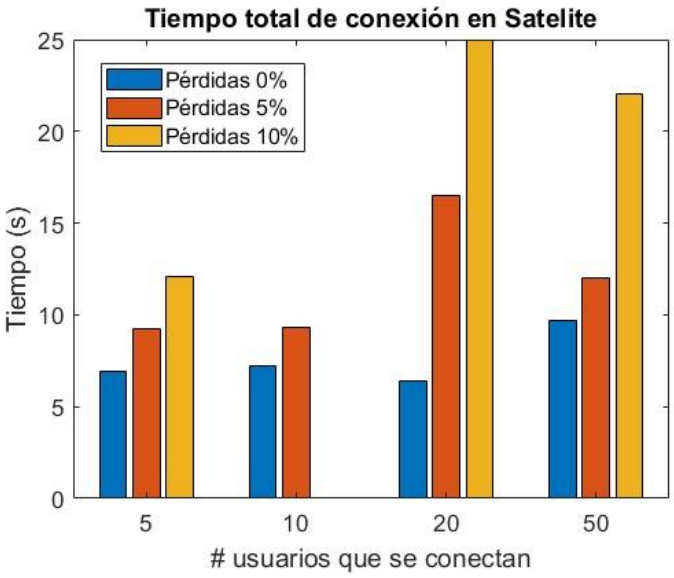

Figura 38. Tiempo total de conexión requerido en escenario Satélite.

En base a los resultados obtenidos, se puede observar que, cuando las condiciones son más estrictas (mayores retardos, tasas de pérdidas de canal, etc.), los tiempos de conexión aumentan de forma notable. Además, analizando las tres gráficas, se observa que, a condiciones más adversas en el canal, los tiempos de conexión aumentan en gran medida, pudiendo pasar de 3-5 segundos en el escenario WiFi a 20-25 segundos en el caso de utilizar un enlace satelital en la red de *backhaul*. Es importante analizar y estudiar este parámetro de tiempo a la hora de desplegar un gNB en una localización específica para evitar que los tiempos de conexión sean muy altos y, de esta forma, se pueda llegar a dañar la calidad de servicio de los usuarios conectados. Por ello, se debe escoger una red de *backhaul* en base a las necesidades de los usuarios, del núcleo de red y la cantidad de datos que deberá soportar.

También es importante destacar que, en la Figura 38, para el caso de 10 usuarios conectados simultáneamente y tasa de pérdidas de 10%, se ha producido un error desconocido interno del propio *software* para uno de los usuarios que trataba de conectarse a la misma. A continuación, en la Figura 39, se adjunta el mensaje de error mostrado por la estación base. Este error se corresponde con el usuario cuyo IMSI asociado es 999700000000006.

```
[2024-07-05 15:14:59.519] [999700000000006|nas] [debug] Authentication Request received
[2024-07-05 15:14:59.519] [999700000000006|nas] [debug] Received SQN [000000005282]
[2024-07-05 15:14:59.519] [999700000000006|nas] [debug] SQN-MS [000000005261]
[2024-07-05 15:14:59.720] [999700000000006|rrc] [debug] RRC Release received
[2024-07-05 15:14:59.720] [999700000000006|nas] [error] Initial Registration failed
[UNSPECIFIED_PROTOCOL_ERROR]
[2024-07-05 15:14:59.720] [999700000000006|nas] [debug] Handling Registration Reject abnormal case
[2024-07-05 15:14:59.720] [999700000000006|nas] [info] UE switches to state [MM-
DEREGISTERED/ATTEMPTING-REGISTRATION]
[2024-07-05 15:14:59.720] [999700000000006|nas] [info] UE switches to state [CM-IDLE]
```

Figura 39. Caso anormal en conexión de usuario a gNB.

No se ha profundizado en este error, pero puede ser interesante analizarlo más en detalle en posibles líneas futuras de estudio para comprobar el motivo de su aparición, las consecuencias que provoca en la red, etc.

Capítulo 5. Conclusiones y líneas futuras

5.1. Conclusiones

La tecnología celular 5G ofrece una excelente fiabilidad y calidad de servicio en todo tipo de entornos gracias al uso de distintas bandas de frecuencia que le permiten una fácil y eficaz adaptación, por lo que es realmente útil para dar cobertura de buena calidad. Además, y gracias a sus capacidades y arquitectura, es la herramienta ideal para llevar a cabo soluciones innovadoras relacionadas con IoT, M2M, *smart healthcare*, etc. En este sentido, se están proponiendo despliegues de redes 5G en entornos alejados de los tradicionales controlados por operadores. Estos incluyen redes privadas o estaciones base 5G montadas sobre drones u otro tipo de vehículos, cuyo rendimiento debe ser analizado.

En este TFM se ha llevado a cabo la instalación, configuración y emulación de una red 5G en su conjunto y se ha desarrollado un sistema configurable de medida extremo a extremo. En este sentido, se ha analizado el rendimiento extremo a extremo de las comunicaciones en tres escenarios con distintas redes de *backhaul*. De la misma forma, y para completar el marco teórico, se investigó una gran cantidad de información para comprender de la mejor manera posible las capacidades de la tecnología 5G y las ventajas y desventajas que conlleva, así como los casos de uso relacionados con la misma. Tras examinar toda la información de este documento, se concluye que se han alcanzado los objetivos propuestos inicialmente.

En primer lugar, se realizó la instalación y configuración de un núcleo de red 5G real basado en *Open5GS*, comprobando que los distintos componentes de la red pudieran comunicarse entre sí correctamente y no existieran fallos de comunicaciones relacionados con las direcciones IP establecidas o los puertos empleados. Esta fase también incluyó el análisis de varios de los interfaces del núcleo de red celular 5G.

En segundo lugar, utilizando los *scripts* descritos en este TFM y el entorno *UERANSIM*, se llevó a cabo la emulación de la presencia de estaciones base y usuarios capaces de comunicarse con el núcleo desplegado. Posteriormente, el despliegue de estos elementos se ha automatizado para permitir la configuración de diferentes escenarios con *backhaul* imperfecto y la obtención de parámetros de rendimiento. Estos parámetros incluyen tanto la tasa binaria de aplicaciones de usuario, así como las tasas de desconexiones o el tiempo que tarda un usuario en conectarse a la red.

A continuación, se ha validado el entorno analizando el rendimiento de las comunicaciones extremos a extremo en un conjunto de escenarios. En concreto, se ha analizado el efecto del número de usuarios y su tasa cuando la estación base tiene comunicación limitada con el núcleo de la red. Los resultados obtenidos muestran el comportamiento esperado, por lo que el entorno desplegado podría ser utilizado para replicar despliegues de red.

A nivel personal, este TFM me ha mostrado la importancia de las redes celulares en todos los campos de la sociedad, así como la necesidad de seguir innovando para, algún día, mejorar las comunicaciones hasta tal punto que estas sean perfectas. También me ha mostrado la necesidad de analizar adecuadamente los escenarios de trabajo para adaptar la red a los requisitos de esta, así como el correcto tratamiento de la información cuando esta se almacena en grandes cantidades.

5.2. Líneas futuras

A lo largo del TFM se han encontrado algunos inconvenientes que podrían abordarse en un futuro para obtener resultados más significativos. Esto incluiría la realización de un mayor número de iteraciones para obtener porcentajes de errores estadísticamente más significativos.

También se podría realizar el estudio de la red para otro tipo de escenarios, más o menos restrictivos, o teniendo en cuenta otros parámetros que las herramientas *tccontrol* e *iperf3* nos ofrecen para la simulación y medición de los parámetros de estudio.

Otro aspecto que podría abordarse sería la seguridad dentro de la red, y estudiar maneras de fortalecerla. Aunque en este trabajo el núcleo de red (plano de control y plano de usuario) se ha instalado dentro de una máquina virtual, en la documentación de *Open5GS* se describe la capacidad de desplegar el plano de control en una máquina y el plano de usuario en otra, por lo que sería interesante comprobar el comportamiento de la red bajo estas condiciones.

Para finalizar, podrían estudiarse más en profundidad los errores causados dentro de la red (como el ocurrido en el apartado 4.5) y analizarlos para observar las causas de estos.

Bibliografía

[1] CISCO. (2018-2023). Cisco Annual Internet Report [Whitepaper]. https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/executive-perspectives/annual-internet-report/white-paper-c11-741490.pdf

[2] Motivation for Introducing the 5G Network. https://www.5g.hr/en/technology/motivation-for-introducing-the-5g-network/.

[3] Non-Public Networks (NPN). https://www.3gpp.org/technologies/npn.

[4] 5G; Service requirements for the 5G system (3GPP TS 22.261 version 18.13.0 Release 18). https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/122200_122299/122261/18.13.00_60/ts_122261v181300p.pdf

[5] Jurčević, Marko, y Igor Vitas. «5G-Connected Drone for Public Road Safety-Research Challenges and Future Research Roadmap». 2021 44th International Convention on Information, Communication and Electronic Technology (MIPRO), 2021, pp. 417-22. IEEE Xplore, https://doi.org/10.23919/MIPRO52101.2021.9597065.

[6] G. Zhang, Q. Wu, M. Cui, and R. Zhang, ‘‘Securing UAV communications via trajectory optimization,’’ in Proc. IEEE Global Commun. Conf. GLOBECOM, Oct. 2017, pp. 1–6.

[7] H. Ullah, N. Gopalakrishnan Nair, A. Moore, C. Nugent, P. Muschamp and M. Cuevas, "5G Communication: An Overview of Vehicle-to-Everything, Drones, and Healthcare Use-Cases," in IEEE Access, vol. 7, pp. 37251-37268, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2905347.

[8] S. Si-Mohammed et al.; "Supporting Unmanned Aerial Vehicle Services in 5G Networks: New High-Level Architecture Integrating 5G With U-Space," in IEEE Vehicular Technology Magazine, vol. 16, no. 1, pp. 57-65, March 2021, doi: 10.1109/MVT.2020.3036374

[9] «5G vs. 4G: Learn the Key Differences Between Them». Networking, https://www.techtarget.com/searchnetworking/feature/A-deep-dive-into-the-differences-between-4G-and-5G-networks.

[10] Kumar, Ashish & Aswal, Ankit & Singh, Lalit. (2013). 4G Wireless Technology: A Brief Review. International Journal of Engineering and management Research. 3. 35-43.

[11] 3GPP. (2011). LTE Advanced [Whitepaper]. Reza Golshan. https://www.3gpp.org/images/PDF/lte_advanced_SAI_paper.pdf

[12] Degambur, Lavanya-Nehan & Mungur, Avinash & Armoogum, Sheeba & Pudaruth, Sameerchand. (2021). Resource Allocation in 4G and 5G Networks: A Review. International Journal of Communication Networks and Information Security (IJCNIS). 13. 10.54039/ijcnis.v13i3.5116.

[13] Rathi, & Singh, Nipur. (2017). ISBN-ICICCT-2017.

[14] Ancāns, Guntis & Stafecka, A. & Bobrovs, Vjaceslavs & Ancans, Arnis & Caiko, Jelena. (2017). Analysis of Characteristics and Requirements for 5G Mobile Communication Systems. Latvian Journal of Physics and Technical Sciences. 54. 10.1515/lpts-2017-0028.

[15] Forge, Simon & Vu, Khuong. (2020). Forming a 5G strategy for developing countries: A note for policy makers. Telecommunications Policy. 44. 101975. 10.1016/j.telpol.2020.101975.

[16] 5G Spectrum Bands Explained— Low, Mid and High Band | Nokia. https://www.nokia.com/thought-leadership/articles/spectrum-bands-5g-world/.

[17] https://forum.huawei.com/enterprise/en/5g-frequency-bands-%C2%A0-what-is-low-band-mid-band-and-high-band-when-to-use/thread/667284906264379392-667213872962088960.

[18] 5G Examples, Applications & Use Cases | IBM. 11 de abril de 2024, https://www.ibm.com/think/topics/5g-use-cases.

[19] Lee, Sukchan. «Documentation». Open5GS, https://open5gs.org/open5gs/docs/.

[20] 5G Environment | ADWISE Home. https://adwise.fiu.edu/5g-testbed/adwise-5g-dns-security/5g-enviornment#:~:text=UERANSIM%20is%20an%205G%20User,Network%20and%20studying%205G%20System.

[21] tcconfig: tcconfig is a tc command wrapper. Make it easy to set up traffic control of network bandwidth/latency/packet-loss/packet-corruption/etc. to a network-interface/Docker-container(veth). POSIX, POSIX :: Linux. PyPI, https://github.com/thombashi/tcconfig.

[22] «¿Qué es y cómo funciona una SIM?» SUMA móvil - Colombia, https://sumamovil.com.co/glosario/que-es-y-como-funciona-una-sim/.

[23] Lee, Sukchan. «Quickstart». Open5GS, 10 de junio de 2024, https://open5gs.org/open5gs/docs/guide/01-quickstart/.

[24] 5G; System architecture for the 5G System (5GS) (3GPP TS 23.501 version 18.5.0 Release 18)

[25] «5GC UDM, 5GC AUSF, base de datos de suscriptores convergentes| IPLOOK». IPLOOK, https://es.iplook.com/productos/5gc/udm_ausf.html.

[26] 5G | ShareTechnote. https://www.sharetechnote.com/html/5G/5G_Core_UDM.html.

[27] 5G | ShareTechnote. https://www.sharetechnote.com/html/5G/5G_NGAP.html.

[28] 5G | ShareTechnote.
https://www.sharetechnote.com/html/5G/5G_UE_Capability.html.

[29] Fernández, F.; Zverev, M.; Garrido, P.; Juárez, J.R.; Bilbao, J.; Agüero, R. Even Lower Latency in IIoT: Evaluation of QUIC in Industrial IoT Scenarios. Sensors 2021, 21, 5737. https://doi.org/10.3390/s21175737

Anexo 1. Comandos *iperf3*

1) Ejecución de iperf3 en el lado del cliente

```
administrator@jairo-suarez-2:~/UERANSIM$ sudo iperf3 -c 10.10.150.238 -b 1M -R -p 5201 -t 5 -J --logfile Prueba.json -B 10.45.0.2
```

Este comando se encarga de realizar la ejecución de iperf3 en la parte del cliente a la hora de realizar la conexión. Se ejecutará este comando por cada uno de los usuarios que desean establecer conexión con el servidor. A continuación, se procede a detallar los campos (típicamente conocidos como *flags*) que aparecen en el comando y que aparecerán recursivamente a lo largo de este trabajo:

- *-c*: es el campo encargado de indicar que se trata de la ejecución en el cliente.
- *-b*: indica la tasa binaria máxima a la que transmitirá datos el usuario.
- *-R*: establece que la dirección del tráfico sea del servidor al usuario, es decir, de descarga.
- *-p*: indica el puerto de conexión del servidor (por defecto, 5201)
- *-t*: establece el número de intervalos (en segundos) que durará el intercambio de datos.
- *-J*: permite guardar la información obtenida en formato de archivo JSON.
- *--logfile*: indica que la información se guardará en el archivo que se encuentra inmediatamente a continuación después de él.
- *-B*: establece el interfaz de red del cliente por el que se establecerá la conexión. Es un parámetro importante y se entrará en profundidad posteriormente en este trabajo.

2) Ejecución de iperf3 en el lado del usuario

```
administrator@jairo-suarez:~/UERANSIM$ sudo iperf3 -s
-----------------------------------------------------------
Server listening on 5201
-----------------------------------------------------------
```

Este comando se encarga de realizar la ejecución de *iperf3* en la parte del usuario a la hora de realizar la conexión. Por defecto, establece en modo escucha al puerto 5201, pero este puerto puede modificarse.

3) Resultados tras conexión

```
-----------------------------------------------------------
Accepted connection from 10.45.0.13, port 37183
[  5] local 10.10.150.238 port 5201 connected to 10.45.0.13 port 39165
[ ID] Interval           Transfer     Bitrate         Retr  Cwnd
[  5]   0.00-1.00   sec   122 KBytes  1.00 Mbits/sec    1   31.6 KBytes
[  5]   1.00-2.00   sec   128 KBytes  1.05 Mbits/sec    0   34.2 KBytes
[  5]   2.00-3.00   sec   128 KBytes  1.05 Mbits/sec    0   38.2 KBytes
[  5]   3.00-4.00   sec   128 KBytes  1.05 Mbits/sec    0   47.4 KBytes
[  5]   4.00-5.00   sec   128 KBytes  1.05 Mbits/sec    0   40.8 KBytes
- - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - -
[ ID] Interval           Transfer     Bitrate         Retr
[  5]   0.00-5.04   sec   634 KBytes  1.03 Mbits/sec    1             sender
-----------------------------------------------------------
```

Se muestran los resultados obtenidos tras la ejecución de los comandos previamente mostrados. Como se puede observar, el dato más significativo es la tasa binaria obtenida para cada intervalo, de 1 segundo cada uno

4) Resultados tras conexión en formato JSON


```
}, {
            "streams":  [{
                    "socket":   6,
                    "start":    2.000084,
                    "end":  3.000097,
                    "seconds":  1.000012993812561,
                    "bytes":    141856,
                    "bits_per_second":  1134833.254189407,
                    "omitted":  false,
                    "sender":   false
                }],
            "sum":  {
                "start":    2.000084,
                "end":  3.000097,
                "seconds":  1.000012993812561,
                "bytes":    141856,
                "bits_per_second":  1134833.254189407,
                "omitted":  false,
                "sender":   false
            }
        }, {
            "streams":  [{
                    "socket":   6,
                    "start":    3.000097,
                    "end":  4.000451,
                    "seconds":  1.0003540515899658,
                    "bytes":    121636,
                    "bits_per_second":  972743.598582293,
                    "omitted":  false,
                    "sender":   false
                }],
            "sum":  {
                "start":    3.000097,
                "end":  4.000451,
                "seconds":  1.0003540515899658,
                "bytes":    121636,
                "bits_per_second":  972743.598582293,
                "omitted":  false,
                "sender":   false
            }
        }, {
```


Cabe destacar que la información mostrada es la misma que la obtenida en el caso anterior, pero almacenada de distinta manera. Utilizar archivos con este formato facilita el filtrado y análisis de la información.

Anexo 2. Comandos *trafficcontrol*

1) Modificación del canal

```
administrator@jairo-suarez-2:~/UERANSIM$ sudo tcset ens160 --direction outgoing --delay 100ms --rate 10Mbps
```

Este comando se ha realizado siempre en la máquina virtual del cliente y permite modificar varios parámetros del canal deseado. Se ha seleccionado el interfaz de red *ens160* ya que es el interfaz por el que entran y salen los datos hacia el núcleo de red. En cuanto a los parámetros, los que se muestran en la imagen han sido los utilizados en la realización de los experimentos, por lo que únicamente se detallaran estos:

- --*direction*: permite elegir la dirección en la que se realizarán los cambios en el canal. Para la realización de este TFM, se ha cambiado tanto la dirección de subida (*outgoing*) como la de bajada (*incoming*) para todos los casos.

- --*delay*: permite variar el retardo introducido en el canal (en segundos). Dependiendo del escenario, se ha variado para aproximarlo al caso real asociado al mismo.

- --*rate*: permite variar la tasa binaria máxima del canal. Es un parámetro importante ya que permite limitar la tasa global a pesar de que los usuarios transmitan a menor tasa.

2) Mostrar las condiciones actuales del canal

```
administrator@jairo-suarez-2:~/UERANSIM$ sudo tcshow ens160
{
  "ens160": {
    "outgoing": {
      "protocol=ip": {
        "filter_id": "800::800",
        "delay": "100ms",
        "rate": "10Mbps"
      }
    },
    "incoming": {}
  }
}
```

Este comando permite comprobar las condiciones establecidas para el interfaz seleccionado, mostrándolas tanto para la dirección de subida como para la de bajada.

3) Eliminar las condiciones del interfaz

```
administrator@jairo-suarez-2:~/UERANSIM$ sudo tcdel ens160 --all
[INFO] delete ens160 qdisc
```

Este comando permite borrar las condiciones actuales establecidas para el interfaz seleccionado.

Anexo 3. Gráficas obtenidas para otras tasas de error (2%, 3% y 5%)

- **Variando número de usuarios en escenario WiFi**

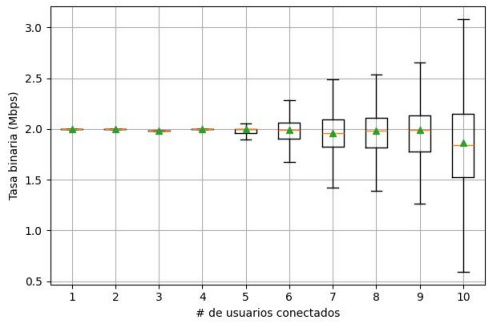

Figura 27. Tasa binaria WiFi 1%.

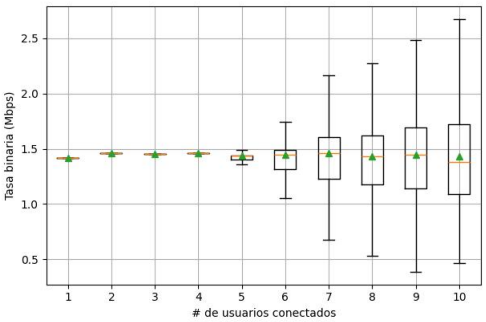

Figura 28. Tasa binaria WiFi 2%.

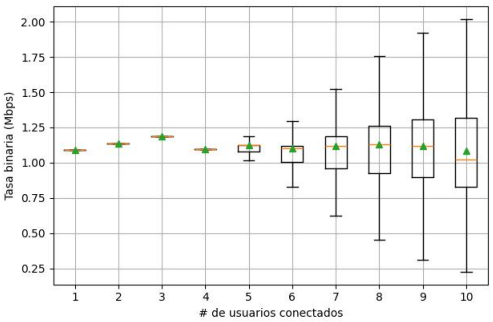

Figura 28. Tasa binaria WiFi 3%.

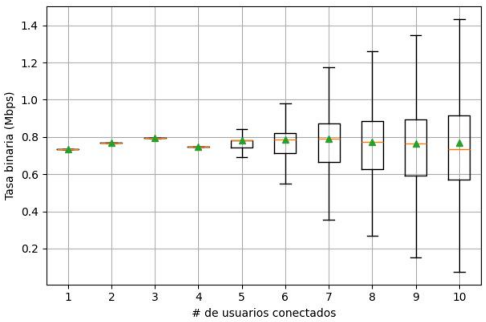

Figura 29. Tasa binaria WiFi 3%.

- **Variando número de usuarios en escenario Celular**

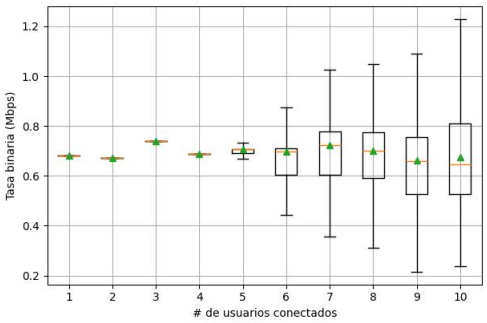

Figura 33. Tasa binaria Celular 1%.

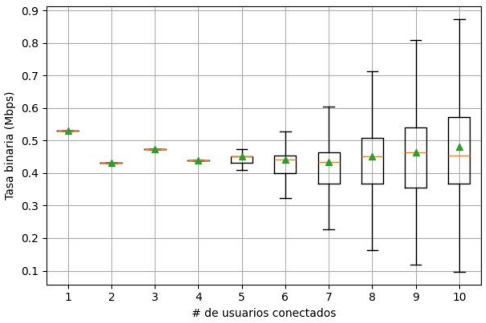

Figura 34. Tasa binaria Celular 2%.

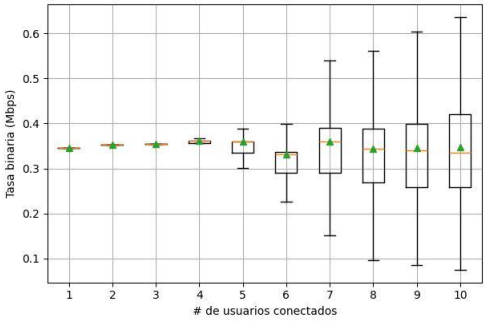

Figura 36. Tasa binaria Celular 3%.

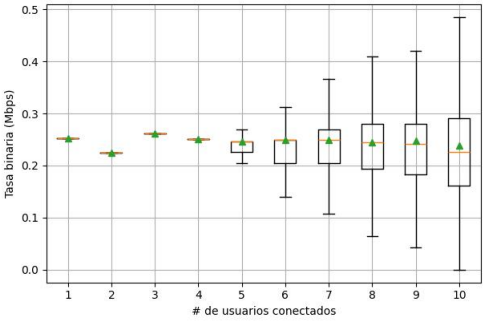

Figura 35. Tasa binaria Celular 5%.

- **Variando número de usuarios en escenario Satelital**

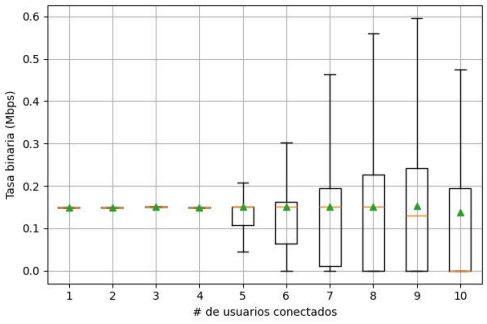

Figura 39. Tasa binaria Satélite 1%

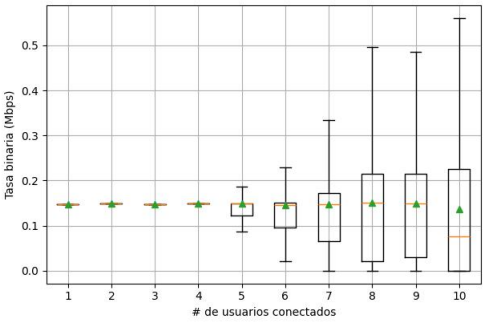

Figura 40. Tasa binaria Satélite 2%.

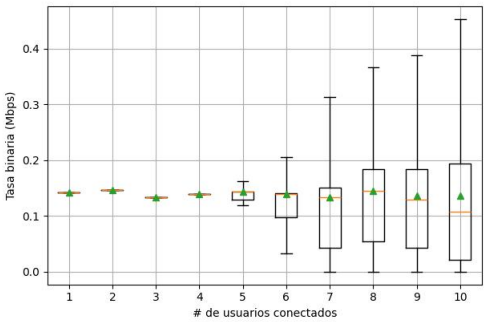

Figura 41. Tasa binaria Satélite 3%.

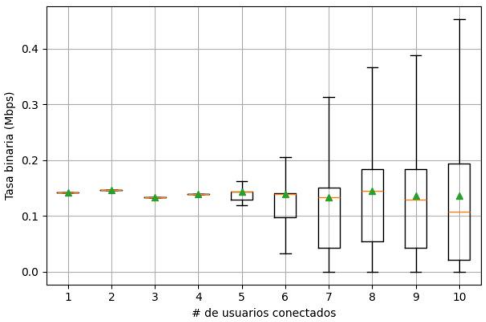

Figura 42. Tasa binaria Satélite 5%.

- **Variando tasas de usuario en escenario WiFi**

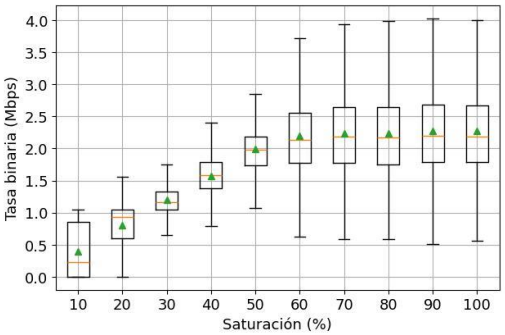

Figura 54. Tasa binaria WiFi 1%.

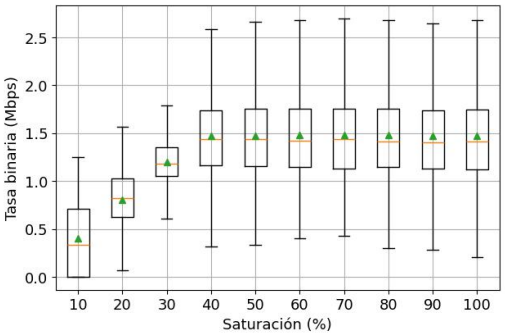

Figura 55. Tasa binaria WiFi 2%.

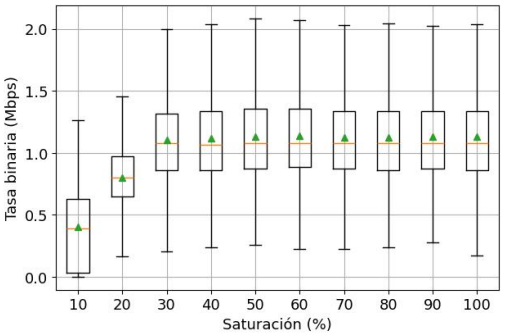

Figura 56. Tasa binaria WiFi 3%.

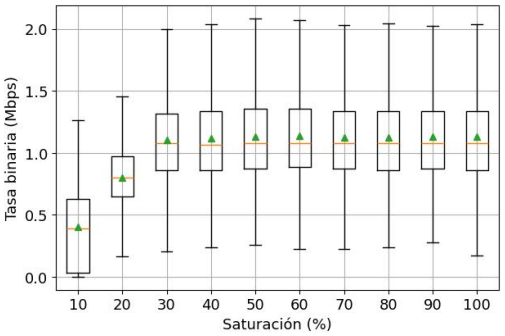

Figura 57. Tasa binaria WiFi 5%.

- **Variando tasas de usuario en escenario Celular**

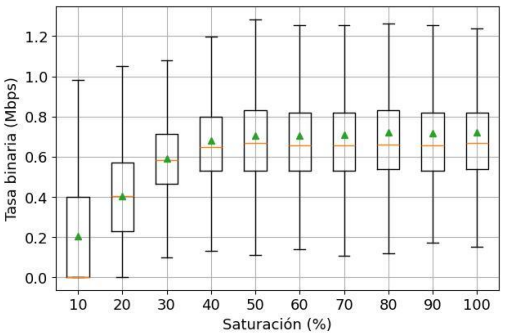

Figura 60. Tasa binaria Celular 1%

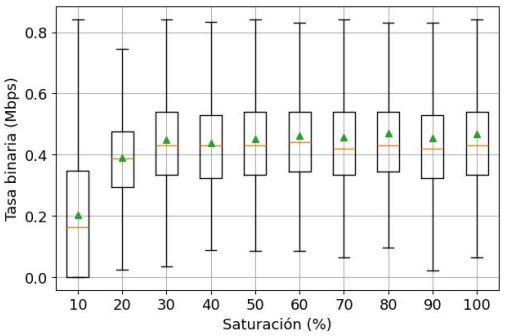

Figura 61. Tasa binaria Celular 2%.

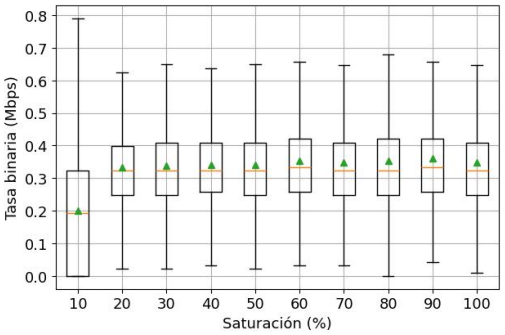

Figura 62. Tasa binaria Celular 3%.

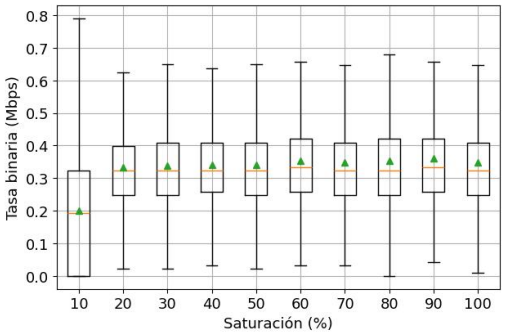

Figura 63. Tasa binaria Celular 5%.

- **Variando tasas de usuario en escenario Satelital**

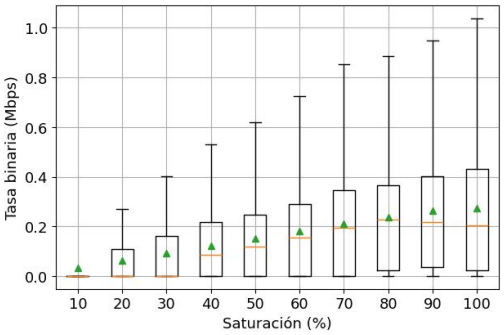

Figura 66. Tasa binaria Satélite 1%.

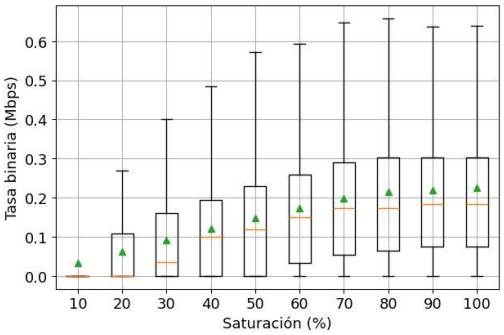

Figura 67. Tasa binaria Satélite 2%.

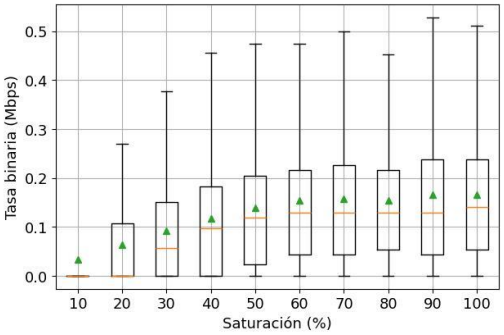

Figura 68. Tasa binaria Satélite 3%.

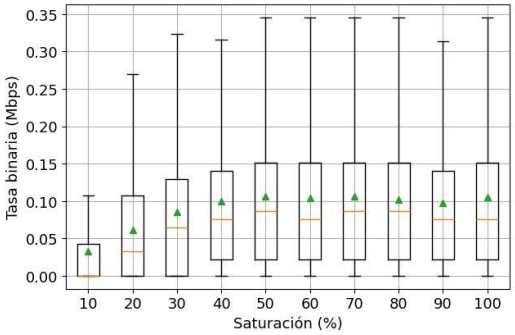

Figura 69. Tasa binaria Satélite 5%.