



**UNIVERSIDAD
DE GRANADA**

TRABAJO FIN DE GRADO
INGENIERÍA DE TECNOLOGÍAS DE TELECOMUNICACIÓN

Desarrollo de herramienta de planificación de network slices en redes público-privadas

Autor

Plácido José Lara Rodríguez

Directores

Óscar Adamuz Hinojosa

Lorena Chinchilla Romero



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍAS INFORMÁTICA Y DE
TELECOMUNICACIÓN

Granada, 7 septiembre de 2023

Desarrollo de herramienta de planificación de network slices en redes público-privadas

Autor

Plácido José Lara Rodríguez

Directores

Óscar Adamuz Hinojosa

Lorena Chinchilla Romero

Desarrollo de herramienta de planificación de network slices en redes público-privadas

Plácido José Lara Rodríguez

Palabras clave: 5G, Network Slicing, red público-privada, planificación, recursos radio.

Resumen

El continuo avance de la tecnología 5G, con sus nuevas funcionalidades y características en comparación con generaciones anteriores, junto con el desarrollo paralelo de la industria 4.0, ha creado una oportunidad fundamental para unir estos dos campos. En este trabajo, se lleva a cabo un estudio sobre la tecnología 5G y sus diversas aplicaciones, con un enfoque especial en las tecnologías de Network Slicing, acceso radio y redes tanto públicas como privadas.

La implementación de la tecnología 5G en los procesos productivos del sector industrial requiere la conexión inalámbrica de una amplia variedad de dispositivos a redes de datos. Dado que el sector industrial es sumamente diverso en términos de necesidades y dispositivos, los requisitos de calidad de servicio (Quality of Service (QoS)) son igualmente variados. Algunos dispositivos pueden requerir una tasa de datos garantizada (Guarenteed Bit Rate (GBR)) durante el tiempo que dura la sesión de conexión al servicio, mientras que otros, que forman parte de sistemas críticos, pueden demandar una baja latencia en el intercambio de paquetes de datos, del orden de milisegundos. Para garantizar que todos estos dispositivos puedan desempeñar sus funciones de manera efectiva, se vuelve esencial asegurar la calidad del servicio con una QoS adecuada.

La clave para lograr esta calidad de servicio es traducir indicadores de rendimiento en asignación eficiente de recursos radio. Los recursos de la red de acceso a radio (Radio Access Network (RAN)) son limitados y, por lo tanto, comprender plenamente estos recursos disponibles es crucial. Esto permitirá una asignación adecuada de recursos para los dispositivos en el entorno industrial y permitirá la segmentación efectiva de estos recursos entre diferentes tipos de servicios, aprovechando la flexibilidad de la segmentación de RAN.

En este contexto, se presenta el desarrollo de una herramienta de simulación que permita aplicar modelos de radio, modelos de tráfico y de canal a un escenario de red público-privada. Este enfoque no solo posibilitará la integración de servicios de banda ancha mejorada (enhanced Mobile Broadband (eMBB)) y servicios de ultra confiabilidad y baja latencia (Ultra Reliable and Low Latency Communication (URLLC)), sino que también cuantificará

la calidad de estos servicios utilizando indicadores clave de calidad. Esto facilitará la asignación eficiente de recursos de radio para satisfacer los requisitos de QoS específicos de cada servicio.

Además de la simulación, la herramienta incluirá una funcionalidad de planificación de recursos. Esto implica una asignación inteligente de los recursos de radio disponibles, con el objetivo de minimizar indicadores clave de rendimiento, como la latencia, especialmente en el caso de URLLC. La planificación de recursos será esencial para garantizar que los recursos limitados se utilicen de manera eficiente y se cumplan los rigurosos requisitos de QoS.

La herramienta de simulación también abordará la implementación de segmentos de red mediante la tecnología de Network Slicing. Estos segmentos crearán redes privadas dentro del espectro de la RAN de la red pública. En caso de ser necesario, la red pública realizará una reserva de recursos disponibles para garantizar el funcionamiento de estos segmentos. Para lograr esto, será esencial una planificación precisa de los recursos necesarios para satisfacer los requisitos específicos impuestos por el sector industrial, que variarán en función del dimensionamiento de los dispositivos y las necesidades específicas de cada caso.

En el transcurso de este trabajo, se realizará un análisis del funcionamiento de la herramienta de simulación y planificación bajo diversos escenarios con diferentes configuraciones. Esto permitirá una comprensión completa de su funcionamiento y su capacidad para satisfacer los rigurosos requisitos de calidad de servicio en entornos industriales.

Development of a planning tool for network slices in public-private networks

Plácido José Lara Rodríguez

Keywords: 5G, Network Slicing, public-private network, planning radio resources

Abstract

The continuous advancement of 5G technology, with its new functionalities and features compared to previous generations, along with the parallel development of Industry 4.0, has created a fundamental opportunity to merge these two fields. In this work, a study is carried out on 5G technology and its various applications, with a special focus on Network Slicing technologies, radio access, and both public and private networks.

The implementation of 5G technology in the productive processes of the industrial sector requires the wireless connection of a wide variety of devices to data networks. Given that the industrial sector is highly diverse in terms of needs and devices, QoS requirements are equally varied. Some devices may require a GBR during the duration of the service connection session, while others, which are part of critical systems, may demand low latency in data packet exchange, in the order of milliseconds. To ensure that all these devices can perform their functions effectively, ensuring adequate QoS is essential.

The key to achieving this quality of service is translating performance indicators into efficient allocation of radio resources. RAN resources are limited, and therefore, fully understanding these available resources is crucial. This will allow for proper resource allocation for devices in the industrial environment and effective segmentation of these resources among different types of services, leveraging the flexibility of RAN segmentation.

In this context, the development of a simulation tool is presented, allowing the application of radio, traffic, and channel models to a public-private network scenario. This approach will not only enable the integration of eMBB and URLLC services but will also quantify the quality of these services using key quality indicators. This will facilitate efficient allocation of radio resources to meet the specific QoS requirements of each service.

In addition to simulation, the tool will include resource planning functionality. This entails intelligent allocation of available radio resources, aiming to minimize key performance indicators, such as latency, especially in the case of URLLC. Resource planning will be essential to ensure that limited resources are used efficiently and rigorous QoS requirements are met.

The simulation tool will also address the implementation of network segments using Network Slicing technology. These segments will create private

networks within the spectrum of the public network's RAN. If necessary, the public network will reserve available resources to ensure the operation of these segments. To achieve this, precise planning of the resources required to meet the specific requirements imposed by the industrial sector will be essential, varying depending on the dimensioning of devices and specific needs of each case.

Throughout this work, an analysis of the operation of the simulation and planning tool will be conducted under various scenarios with different configurations. This will allow for a comprehensive understanding of its operation and its ability to meet the stringent quality of service requirements in industrial environments.

Yo, **Plácido José Lara Rodríguez**, alumno de la titulación Grado en Ingeniería de Tecnologías de Telecomunicación de la **Escuela Técnica Superior de Ingenierías Informática y de Telecomunicación de la Universidad de Granada**, con DNI 75165869Y, autorizo la ubicación de la siguiente copia de mi Trabajo Fin de Grado en la biblioteca del centro para que pueda ser consultada por las personas que lo deseen.

Fdo: Plácido José Lara Rodríguez

Granada a 7 de septiembre de 2023.

D. **Óscar Adamuz Hinojosa**, Profesor del Área de Ingeniería Telemática del Departamento de Teoría de la Señal, Telemática y Comunicaciones de la Universidad de Granada.

D. **Lorena Chinchilla Romero**, Miembro del Área de Ingeniería Telemática del Departamento de Teoría de la Señal, Telemática y Comunicaciones de la Universidad de Granada.

Informan:

Que el presente trabajo, titulado *Desarrollo de herramienta de planificación de network slices en redes público-privadas*, ha sido realizado bajo su supervisión por **Plácido José Lara Rodríguez**, y autorizamos la defensa de dicho trabajo ante el tribunal que corresponda.

Y para que conste, expiden y firman el presente informe en Granada a 7 de septiembre de 2023.

Los directores:

Óscar Adamuz Hinojosa

Lorena Chinchilla Romero

Agradecimientos

En primer lugar, me gustaría expresar mi sincero agradecimiento a mi familia por su constante apoyo, cariño y comprensión. Sin ellos, no habría sido capaz de completar este trabajo de fin de grado, que marca el final de una etapa llena de altibajos, pero extremadamente importante en mi vida.

A mis amigos, les agradezco por estar a mi lado en los momentos difíciles y por convertir los días bajos en razones para reír y tener más fe en mismo de lo que yo mismo habría tenido.

Por último mis tutores de TFG, les estoy profundamente agradecido por su paciencia, comprensión y cercanía. Han ido más allá de sus obligaciones para hacer posible la realización de este trabajo, y su apoyo ha sido fundamental.

Índice general

| | |
|--|-----------|
| Siglas | 5 |
| 1. Introducción | 7 |
| 1.1. Motivación | 9 |
| 1.2. Objetivos | 10 |
| 1.3. Organización de la memoria | 12 |
| 2. Planificación y estimación de costes | 13 |
| 2.1. Planificación de tareas | 13 |
| 2.2. Planificación de recursos | 16 |
| 2.2.1. Recursos hardware | 16 |
| 2.2.2. Recursos software | 16 |
| 2.2.3. Recursos humanos | 16 |
| 2.2.4. Presupuesto total | 17 |
| 3. Estudio de tecnologías habilitantes de redes 5G público-privadas. | 19 |
| 3.1. Arquitectura de 3GPP para 5G | 19 |
| 3.1.1. 5G Core Network | 20 |
| 3.1.2. Red de acceso radio 5G | 22 |
| 3.2. 5G-NR | 24 |
| 3.2.1. OFDM | 25 |
| 3.2.2. Bandwidth part | 27 |
| 3.3. Network Slicing | 28 |
| 3.3.1. RAN slicing | 29 |
| 3.4. Redes público-privadas | 32 |
| 3.5. Implementación de Redes Público-Privadas Mediante Network Slicing | 34 |
| 3.5.1. Descripción de los tipos de modelo de negocio NPI-NPN | 35 |
| 3.5.2. Compartición de recursos RAN en redes Público-Privadas | 35 |
| 3.5.3. Comparación de soluciones MORAN y MOCN | 35 |
| 3.5.4. Integración de Network Slicing en Redes Público-Privadas | 36 |

| | |
|---|-----------|
| 4. Análisis y modelado del entorno de red 5G público-privado | 37 |
| 4.1. Escenario de red 5G público-privado | 37 |
| 4.2. Modelo de red | 40 |
| 4.2.1. Sistema de acceso radio | 40 |
| 4.2.2. Modelo del canal | 40 |
| 4.2.3. Modelo de tráfico | 42 |
| 4.3. Modelos para la traducción de requisitos de rendimiento a recursos radio | 44 |
| 4.3.1. Modelo probabilidad de bloqueo eMBB | 44 |
| 4.3.2. Modelo de retardo para URLLC | 46 |
| 5. Diseño de herramienta de planificación | 49 |
| 5.1. Algoritmo | 49 |
| 5.1.1. Comparación de criterios de planificación | 50 |
| 5.1.2. Planificación recursos red privada | 50 |
| 5.1.3. Planificación recursos red pública | 53 |
| 6. Resultados | 57 |
| 6.1. Configuración experimental | 57 |
| 6.2. Validación y evaluación de la herramienta de planificación. . . | 58 |
| 6.2.1. Evaluación red privada | 59 |
| 6.2.2. Evaluación red pública | 64 |
| 6.3. Evaluación de diferentes configuraciones del planificador . . . | 67 |
| 6.3.1. Selección de tamaño bloques de recursos | 67 |
| 6.3.2. Resultados algoritmos con distintos tamaño de bloque de recursos | 68 |
| 6.4. Tiempo de ejecución | 71 |
| 7. Conclusiones y Trabajos Futuros | 75 |
| 7.1. Conclusiones | 75 |
| 7.2. Trabajos futuros | 77 |
| Bibliografía | 82 |
| A. Código herramienta de simulación | 85 |

Índice de figuras

| | |
|---|----|
| 1.1. Tráfico global en la redes de datos móviles y crecimiento anual (EB per month). Figura obtenida de [1] | 7 |
| 2.1. Diagrama de Gantt: planificación desarrollo proyecto. | 15 |
| 3.1. Arquitectura de red 5G. Figura obtenida de:[2] | 20 |
| 3.2. Arquitectura de red 4G [3] | 21 |
| 3.3. Arquitectura basada en servicios 5G [3] | 21 |
| 3.4. División funcional del gNB en 5G. Figura obtenida de [4] . . . | 23 |
| 3.5. Esquemmatización trama para $\mu=0$. [5] | 26 |
| 3.6. Esquemmatización bloque de recursos subtrama 5G. Figura obtenida de [5] | 27 |
| 3.7. Ilustración conceptual NS. Figura obtenida de[6] | 29 |
| 3.8. División Arquitectura NG-RAN [4] | 30 |
| 3.9. Asignación RB a RAN slices. Figura obtenida de [7] | 31 |
| 3.10. Procedimientos de RRM para el slicing.Figura obtenida de [7] | 32 |
| 3.11. Escenario SNPN y PNI-NPN [8] | 34 |
| 4.1. Escenario | 38 |
| 4.2. Diagrama de transición de estado para un sistema bidimensional de Erlang-B(Adamuz et al.,2021) [9] | 48 |
| 5.1. algoritmo asignación RB femtocelda | 51 |
| 5.2. algoritmo asignación RB femtocelda | 54 |
| 6.1. Distribución geográfica del escenario | 58 |
| 6.2. Evolución ratios primera iteración femtocelda 1 | 59 |
| 6.3. Evolución recursos asignados en nodos red privada en slice eMBB | 60 |
| 6.4. Evolución recursos asignados en nodos red privada en Slice URLLC | 61 |
| 6.5. Evolución recursos totales asignados en nodos red privada . . | 62 |
| 6.6. Evolución en probabilidad de bloqueo nodos red privada . . . | 63 |
| 6.7. Evolución en tasa no cumplimiento nodos red privada | 64 |

| | |
|---|----|
| 6.8. RBs consumidos por cada slice en cada red | 69 |
| 6.9. Razón de recursos totales utilizados | 70 |
| 6.10. Valores totales de los parámetros de análisis | 71 |
| 6.11. Evolución tiempo de ejecución iteraciones red privada | 72 |

Índice de cuadros

| | |
|---|----|
| 2.1. Precios elementos hardware | 16 |
| 2.2. Precios elementos software | 16 |
| 2.3. Recursos humanos | 17 |
| 2.4. Evaluación total recursos económicos | 17 |
| 3.1. Numerología de transmisión soportadas en 5G | 25 |
| 3.2. Tabla de codificación de numerología 5G 3GPP | 26 |
| 3.3. Configuración máxima de ancho de banda de transmisión NRB: FR1 [10] | 27 |
| 6.1. Evolución femtoceldas redistribución de tráfico slice URLLC . | 65 |
| 6.2. Evolución femtoceldas redistribución de tráfico slice eMBB . . | 65 |
| 6.3. Evolución femtoceldas redistribución de tráfico slice eMBB . . | 65 |
| 6.4. Valores de análisis de recursos aportados por red publica y valores totales | 66 |
| 6.5. Parámetros totales red privada | 67 |
| 6.6. Tamaños máximo bloque de recursos según el ancho de banda de trasmisión de portadora [10] | 68 |
| 6.7. Tiempo medio y varianza de ejecución de algoritmo para ad- judiciación de recursos en red privada | 72 |
| 6.8. Tiempo ejecución de algoritmo para adjudicación de recursos en red publica | 73 |

Siglas

3GPP 3rd Generation Partnership Project.

5G Fifth Generation.

AF Application Function.

AMF Access and Mobility Management Function.

AUSF Authenticacion Server Function.

BWP Bandwidth Part.

CN Core Network.

CP Control Plane.

CU Centralized Unit.

DNN Data Network Name.

DU Distributed Unit.

eMBB enhanced Mobile Broadband.

GBR Guarenteed Bit Rate.

gNB Next generation Node Base.

IETF Internet Engineering Task Force.

IoT Internet of Things.

ITU International Telecommunication Union.

MEC Multi-access Edge Computing.

mMTC massive Machine-Type Communications.

NEF Network Exposure Function.

NFV Network Function Virtualization.

NG-RAN New Generation Radio Access Network.

NPN Non Public Network.

NRF NF Repository Function.

NS Network Slicing.

NSaaS Network as a Service.

NSSF Network Slice Selection Function.

OFDM Orthogonal Frequency-Division Multiplexing.

PCF Policy Control Function.

PDF Probability Density Function.

PLMN Public Land Mobile Network.

PNI-NPN Public Network Integrated Non Public Network.

PRB Physical Resource Block.

QoS Quality of Service.

RAN Radio Access Network.

RB Resource Blocks.

RB Resource Grid.

RRM Radio Resource Management.

RU Radio Unit.

SBA Service Based Architecture.

SCS Subcarrier Spacing.

SDN Software Defined Networking.

SINR Signal to Interference plus Noise Ratio.

SLA Service Level Agreement.

SMF Session Management Function.

SNPN Standalone Non Public Network.

UDM Unified Data Management.

UE User Equipment.

UPF User Plane Function.

URLLC Ultra Reliable and Low Latency Communication.

VNF Virtual Network Fuction.

Capítulo 1

Introducción

En los últimos años, el uso de las redes móviles ha experimentado un crecimiento exponencial, impulsado por la inclusión generalizada de dispositivos móviles en diversas facetas de la vida cotidiana. Algunos ejemplos como compras en línea, trámites administrativos y consumo de contenido multimedia han impulsado este aumento en la demanda de conectividad. Al mismo tiempo, la creación y adopción de servicios innovadores ha generado un incremento en la carga de las redes móviles [1].

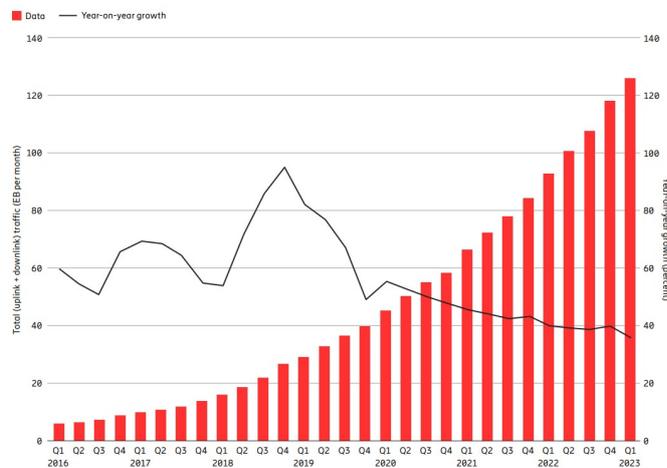


Figura 1.1: Tráfico global en las redes de datos móviles y crecimiento anual (EB per month). Figura obtenida de [1]

La quinta generación de redes móviles, conocida como Fifth Generation (5G), emerge como respuesta al abrumador volumen de tráfico que las redes móviles actuales deben soportar, además de satisfacer los requerimientos de servicio impuestos por nuevas aplicaciones y casos de uso.

La tecnología 5G aporta numerosas mejoras en las comunicaciones inalámbricas. En comparación con las generaciones predecesoras en comunica-

ciones inalámbricas, aporta las siguientes mejoras: [11]:

1. Un mayor ancho de banda en comparación con generaciones anteriores. De 1 Gbps posibles que ofrece 4G a la posibilidad de 10 Gbps en 5G.
2. Reducción significativa de la latencia, en torno a 1 ms frente a 20-30 ms en redes 4G.
3. Incremento de la fiabilidad en las conexiones inalámbricas de hasta 99.999 %.
4. Menor consumo energético, de hasta un 90 % respecto a 4G.
5. Capacidad para admitir una mayor densidad de dispositivos por unidad de área, con un aumento en la densidad 100 veces superior a 4G.

Las redes 5G impulsarán un conjunto de servicios novedosos, los cuales poseen diversos requisitos en términos de funcionalidad y rendimiento. International Telecommunication Union (ITU) clasifica los servicios 5G en tres categorías [12]: banda ancha móvil mejorada (eMBB), comunicaciones masivas tipo máquina (massive Machine-Type Communications (mMTC)) y comunicaciones ultra confiables y de baja latencia (URLLC). Los servicios eMBB respaldan conexiones estables con altas tasas de datos, adecuadas para servicios de vídeo en alta definición, realidad virtual y realidad aumentada. Los servicios mMTC permite manejar una gran cantidad de conexiones en dispositivos que se activan esporádicamente y tienen una carga de datos baja, orientada hacia el "Internet de las cosas" (Internet of Things (IoT)). URLLC se enfoca en conexiones para dispositivos específicos con baja latencia, cargas útiles de datos pequeñas y una alta confiabilidad de transmisión, como en aplicaciones de conducción autónoma o comunicación entre vehículos.

Para alcanzar estos objetivos, las redes 5G pueden hacer uso de tecnologías como las redes definidas por software (Software Defined Networking (SDN)) [13], virtualización de funciones de red (Network Function Virtualization (NFV)) [14] y computación perimetral de acceso múltiple (Multi-access Edge Computing (MEC)) [15]. SDN propone un enfoque en el cual las redes utilizan controladores basados en software o interfaces de programación para gestionar el tráfico y comunicarse con la infraestructura de red subyacente. NFV virtualiza las funciones de red que tradicionalmente se ejecutan en hardware propietario, como enrutadores o balanceadores de carga, permitiendo que se ejecuten en máquinas virtuales en servidores estándar. Por su parte, MEC implica la implementación de servicios y centros de datos en el borde de la red, aliviando la carga en la red central y reduciendo el tiempo de servicio para los clientes. Estas tecnologías convergentes en 5G desempeñan un papel crucial en la transformación y habilitación de la Industria 4.0.

Con la aparición del 5G, emergen casos de uso cada vez más exigentes, como es el caso de la Industria 4.0, que demandan requisitos de red sumamente estrictos. Este contexto ha propiciado la evolución de las redes privadas, jugando un papel fundamental en la habilitación de estas aplicaciones de alta demanda. Las redes privadas aprovechan las capacidades del 5G para ofrecer niveles de rendimiento, seguridad y latencia que son esenciales para la implementación exitosa de la Industria 4.0 y otras aplicaciones críticas.

La tecnología 5G posibilita la realización plena de la Industria 4.0, que se refiere a una profunda transformación de los procesos industriales mediante la integración de tecnologías digitales en las operaciones de fabricación y producción. Este avance ha conducido a la concepción de fábricas y sistemas de producción más inteligentes, adaptables y conectados, dando forma a lo que se conoce como la Industria 4.0 [16].

La incorporación de las tecnologías 5G [17] a este panorama representa un paso aún más significativo. Al permitir el procesamiento y la toma de decisiones de control de manera remota para numerosos sistemas desplegados, se habilita la gestión de complejas operaciones en tiempo real. Esta capacidad facilita el traslado de las funciones de procesamiento y cálculo hacia centros de datos de gran escala, lo que, por un lado, posibilita la ejecución de sistemas de mayor complejidad y, por otro, optimiza el control y registro de procesos en un entorno de producción. Esto conlleva la eliminación de redundancias de datos y procesos, al tiempo que reduce los costos asociados con la implementación de tales soluciones.

1.1. Motivación

En la actualidad, las industrias hacen uso habitual de puntos de acceso WiFi para sostener sus funciones de red. La integración progresiva de la tecnología 5G en el ámbito industrial abre la puerta a escenarios novedosos en los cuales se funden los tradicionales puntos de acceso WiFi con los emergentes puntos de acceso 5G, generando un abanico de configuraciones posibles. Entre estas situaciones, se encuentran la coexistencia de redes 5G públicas con redes WiFi, la implantación exclusiva de redes 5G públicas, la adopción de redes 5G privadas, la combinación de redes 5G privadas y públicas, así como la interacción entre redes 5G privadas, públicas y WiFi [18]. Estas evoluciones se basan en el propósito de asignar espectro con licencia para su empleo industrial, lo que fundamenta la introducción de puntos de acceso 5G específicos para la industria.

Uno de los elementos cruciales a los mencionados escenarios es la gestión de los recursos radio. En esencia, los recursos radio evidencian los componentes esenciales del espectro electromagnético utilizados por los dispositivos de comunicación para el envío y recepción de señales. La gestión eficiente de estos recursos constituye un reto esencial, dada la necesidad de cumplir con

los requisitos de rendimiento de los servicios implantados, así como optimizar la eficacia y minimizar los costos vinculados a su utilización. Dada su restricción en cantidad, la administración de los recursos radio se vuelve aún más importante en este contexto [19].

En esta perspectiva, uno de los cimientos fundamentales de la gestión de recursos radio es la planificación. La planificación de recursos radio engloba el proceso de tomar decisiones acerca de la asignación de recursos específicos a cada servicio, garantizando al mismo tiempo que se cumplan los requisitos de red y los objetivos económicos. Se trata de un proceso intrincado que implica la asignación óptima de frecuencias, potencia de transmisión y otros parámetros con el propósito de lograr un desempeño óptimo en términos de capacidad, cobertura y calidad de servicio.

La resolución efectiva de estos desafíos requiere el desarrollo de algoritmos avanzados de planificación que busquen optimizar la utilización de los recursos radio en los entornos industriales delineados. Además, la formulación y utilización de herramientas de simulación se torna esencial para anticipar y evaluar el comportamiento de la red bajo diferentes configuraciones. Dentro de este contexto, el presente trabajo fin de grado se centra en la creación y análisis de algoritmos de planificación, así como en la implementación y evaluación de herramientas de simulación que posibiliten la concepción y administración eficaz de los recursos radio en los contextos de redes industriales 5G público-privadas.

1.2. Objetivos

En este trabajo fin de grado el foco se orienta hacia el desarrollo de una herramienta de simulación que permita la exploración y prueba de distintas configuraciones de red con miras a la planificación de servicios en entornos que abarcan tanto redes públicas como privadas. Todo ello en un contexto de entorno industrial que integre de forma efectiva la tecnología 5G en sus procesos de producción.

Para lograr este propósito, se plantean las siguientes objetivos específicos:

- **Objetivo 1: Estudio del estado del arte:** En este objetivo, se propone realizar un análisis del estado actual del arte en lo que respecta a la tecnología 5G y su aplicación en contextos industriales. Dicha revisión permitirá identificar las últimas tendencias, los requisitos específicos y las soluciones implementadas en la convergencia de redes públicas y privadas.
- **Subobjetivo 1.1: Estudio de requisitos de servicios eMBB y URLLC:** dentro del marco del objetivo de estudio del estado del arte, se abordará el análisis de los requisitos de dos grupos

esenciales de servicios en 5G: eMBB y uRLLC. Este análisis permitirá comprender en profundidad las demandas de rendimiento y conectividad de estos servicios, sentando las bases para su posterior traslación a la asignación de recursos radio.

- **Subobjetivo 1.2: Exploración de escenarios en entornos públicos y privados:** en el marco del mismo objetivo, se estudiarán los diversos escenarios que surgen en un entorno de red que integra aspectos públicos y privados.
- **Objetivo 2: Definición de escenario de red público-privado:** el siguiente objetivo es definir de manera concreta el entorno de red público-privado que servirá como base para el desarrollo de la herramienta de simulación. Este paso es de especial importancia, ya que sienta las bases para el desarrollo de posteriores simulaciones.
- **Objetivo 3: Diseño y desarrollo de la herramienta de simulación:** este objetivo se enfoca en la creación de una herramienta de simulación que provea soluciones a los retos de asignación de recursos radio en ambientes de redes público-privadas.
 - **Subobjetivo 3.1: Selección de modelos de requisitos de rendimiento a recursos radio:** este subobjetivo, se llevará a cabo un análisis para seleccionar modelos matemáticos y herramientas apropiadas que permitan la conversión de necesidades de rendimiento de los servicios eMBB y URLLC a términos de recursos radio.
 - **Subobjetivo 3.2: Conceptualización y elaboración del algoritmo:** aquí se concentra en la parte del simulador que actúa como algoritmo de planificación. El algoritmo se plantea para gestionar variadas conexiones con distintos requerimientos, inherentes al contexto industrial.
 - **Subobjetivo 3.3: Integración coherente de modelos y algoritmo:** la integración de los modelos matemáticos y el algoritmo de planificación se configura como un eje fundamental de este subobjetivo. Con el fin de conseguir una planificación precisa y coherente de los recursos radio.
- **Objetivo 4: Validación y evaluación del simulador:** el último objetivo del proyecto se concentra en la validación y evaluación del simulador desarrollado. Este objetivo abarca dos aspectos esenciales: la verificación de la operatividad adecuada del simulador y la evaluación de su desempeño, considerando aspectos como el tiempo de cómputo.

1.3. Organización de la memoria

La presente memoria se estructura en siete bloques principales, que abordan de manera integral el desarrollo de este proyecto:

- **Capítulo 1: Introducción.** En este capítulo se hace una introducción a la temática del trabajo y se motiva la realización de este. Así mismo se especifican los objetivos principales del proyecto.
- **Capítulo 2: Planificación y estimación de costes.** En este capítulo se presenta una planificación temporal de las tareas, así como la planificación de recursos en términos de software y hardware. Además, se incluye una estimación de los costes económicos necesarios para llevar a cabo el proyecto.
- **Capítulo 3: Estudio de tecnologías habilitantes de redes 5G públicas-privadas.** Este capítulo ofrece un repaso teórico de las tecnologías clave en el ámbito de las redes 5G. Se profundiza en conceptos como Network Slicing y 5G NR y redes público-privadas.
- **Capítulo 4: Análisis y modelado del entorno de red 5G público-privado.** En este capítulo se realiza una simulación y modelado de un entorno de red público-privado en el contexto de la tecnología 5G. Se integran modelos de red, modelos de radio y modelos de canal para comprender mejor el funcionamiento de este entorno.
- **Capítulo 5: Diseño de herramienta de planificación.** Este capítulo se centra en la conceptualización y desarrollo de un planificador de recursos que será utilizado en el proyecto.
- **Capítulo 6: Resultados.** En este capítulo se presentan los datos recopilados para evaluar la herramienta de simulación y los resultados obtenidos en diferentes escenarios.
- **Capítulo 7: Conclusiones y trabajos futuros.** Se exponen las conclusiones derivadas del desarrollo de este trabajo, así como una evaluación de posibles mejoras que podrían aplicarse a la herramienta de simulación en futuros proyectos.

Capítulo 2

Planificación y estimación de costes

En este capítulo, se presentará una planificación de recursos que abarcará aspectos tanto temporales como físicos y económicos. El objetivo de esta planificación es establecer las bases necesarias para la realización exitosa de este trabajo de fin de grado.

2.1. Planificación de tareas

En esta sección, se detalla la planificación para llevar a cabo el desarrollo de este trabajo. Para ello, se ha dividido en tareas y se ha asignado un orden de realización preferencial a cada una de ellas. Las principales tareas son las siguientes:

1. **Revisión del estado del arte:** Esta tarea, seleccionada como la primera de la lista, implica un estudio de la tecnología 5G para comprender el problema al que se pretende ofrecer una solución. Dentro del ámbito de la tecnología 5G, nos enfocamos en aspectos como 5G New Radio (NR), la red de acceso por radio RAN, la tecnología de segmentación de redes (Network Slicing (NS)) y las redes público-privadas. El estudio de esta tecnología nos permite presentar el contexto tecnológico subyacente en este trabajo.
2. **Estudio del escenario:** En esta tarea, se busca identificar escenarios de aplicación viables para la tecnología 5G, teniendo en cuenta consideraciones espaciales, necesidades de conectividad y desarrollo de actividades. Se revisan los posibles desafíos que pueden resolverse mediante la implementación de las tecnologías mencionadas.
3. **Estudio de modelos analíticos que modelan el escenario:** Una vez que se ha seleccionado un escenario, es esencial realizar un estudio

de los modelos que permitirán parametrizar dicho escenario. Esto incluye modelos de tráfico que se adapten a los requisitos de tráfico del escenario, modelos de comunicación inalámbrica que caractericen el canal de comunicación y modelos de calidad que posibiliten la verificación del cumplimiento de los requisitos para un servicio satisfactorio.

4. **Diseño e implementación del simulador:** Esta tarea se desglosa en dos sub-tareas principales. En primer lugar, se configuran los modelos del escenario en código. Luego, se desarrolla e implementa un algoritmo de planificación de recursos basado en los modelos de escenario.
5. **Testeo de algoritmos:** En esta tarea se realiza un testeo aislado tanto de los modelos de escenario como del algoritmo de planificación. Esto contribuye a reducir la posibilidad de errores en caso de que surjan.
6. **Evaluación del simulador:** Aquí se verifica el funcionamiento del simulador, permitiendo la interacción entre los modelos de escenario y el algoritmo de planificación. Esto posibilita evaluar comportamientos conjuntos y obtener resultados finales.
7. **Redacción del informe:** Esta etapa implica plasmar en un informe todo el conocimiento adquirido y el trabajo desarrollado durante el proyecto. La redacción se lleva a cabo de manera progresiva, desde el inicio hasta la culminación del trabajo.

La estructura de planificación se ha configurado mediante la aplicación de un diagrama de Gantt, una herramienta de gestión temporal ampliamente reconocida en los campos de ingeniería y gestión de proyectos. La Figura 2.1 ilustra este diagrama, en el cual se detallan las distintas etapas del proyecto, cada una subdividida en tareas y sus correspondientes períodos de duración.

Las primeras tres tareas (revisión del estado del arte, estudio de escenario y análisis de modelos) son secuenciales y teóricas, apuntando a los objetivos iniciales (sección 1.2).

Las tareas cuarta a sexta siguen un desarrollo lineal temporal, empezando por el diseño del simulador (modelado y planificación), seguido por la implementación y evaluación por separado de cada parte. Se corrigen errores iterativamente, incluso al evaluar el simulador como sistema completo, logrando los últimos objetivos: Diseño de la herramienta de simulación y validación del simulador.

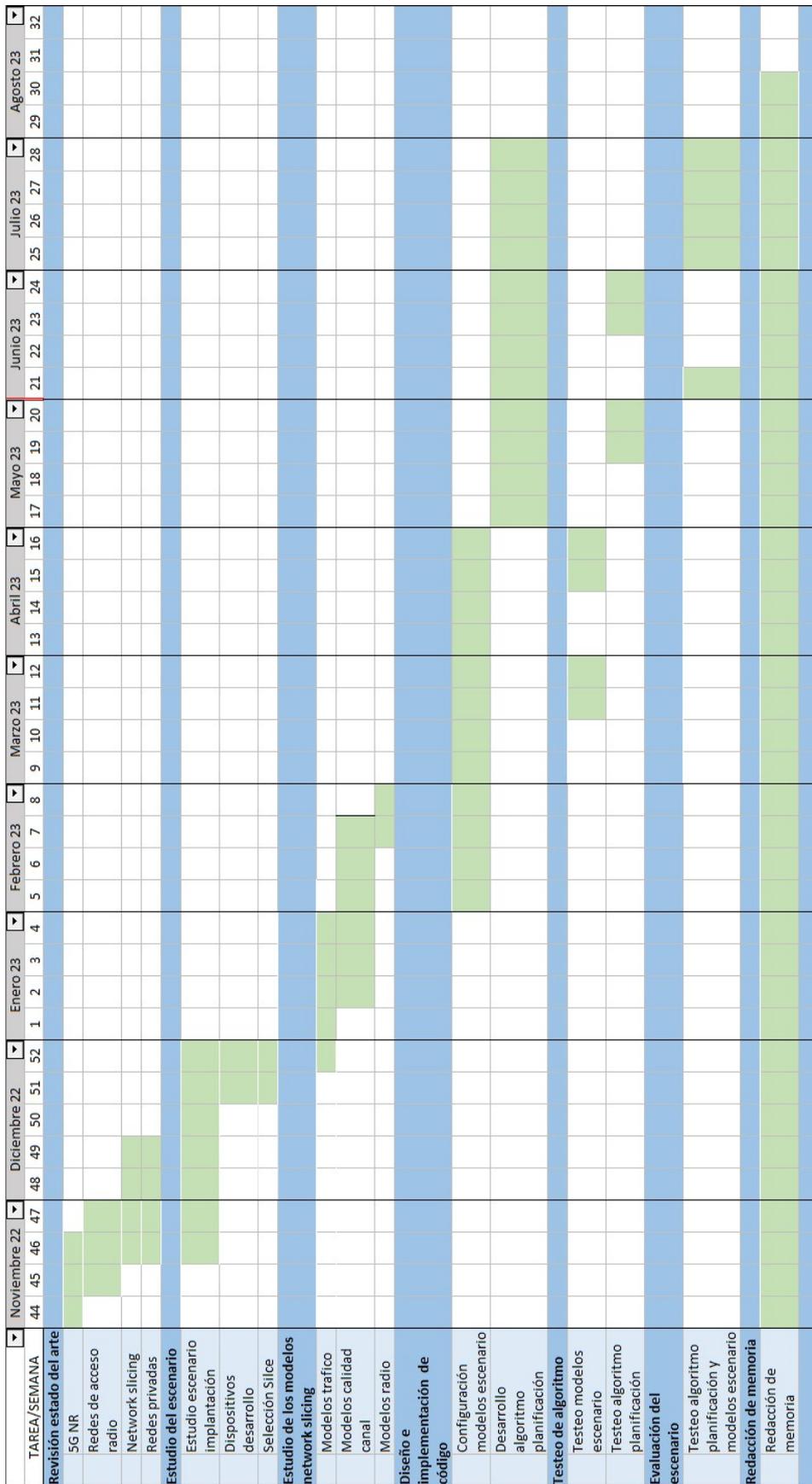


Figura 2.1: Diagrama de Gantt: planificación desarrollo proyecto.

2.2. Planificación de recursos

En las siguientes secciones, se detallarán los recursos esenciales requeridos para la ejecución de este trabajo de fin de grado. Estos recursos se agruparán en tres categorías: recursos hardware, recursos software y recursos humanos. Cada uno de estos componentes será cuantificado económicamente, proporcionando una estimación del coste total asociado con el desarrollo del trabajo de fin de grado.

2.2.1. Recursos hardware

En esta sección, se incluyen los equipos y dispositivos físicos necesarios para llevar a cabo el trabajo fin de grado así como el coste económico de la adquisición de dichos dispositivos [20].

| Componente | Precio (IVA incluido) |
|--|-----------------------|
| PC sobremesa - Ryzen 5 3600 / 16GB RAM / 500GB SSD / | 819,00 € |
| Monitor 24"LED FullHD 165Hz | 134,00 € |
| Teclado y Ratón Inalámbrico Logitech MK220 | 23,99 € |

Tabla 2.1: Precios elementos hardware

2.2.2. Recursos software

Los recursos software abarcan las herramientas y programas utilizados para la implementación, simulación y análisis de los modelos propuestos. Los recursos software llevan asociados un coste de adquisición y actualización de licencia que se contemplara para un año de uso [20],[21].

| Componente | Precio (IVA incluido) |
|-------------------------------------|-----------------------|
| Microsoft Windows 11 Home 64 Bits / | 157,93 € |
| MATLAB and Simulink Student Suite | 104,00 € |

Tabla 2.2: Precios elementos software

2.2.3. Recursos humanos

En relación a los recursos humanos, se considerarán las capacidades y esfuerzos necesarios por parte de los investigadores y profesionales especializados. Esto implica la dedicación de tiempo a actividades de investigación, desarrollo, pruebas y análisis.

En cuanto a las tareas desarrolladas, abordan aspectos teóricos, como la búsqueda y análisis de información sobre las tecnologías en cuestión. Por otro lado se realizan tareas relacionadas con estudios de modelos y diseño de algoritmos y finalmente la implementación de un simulador. La cualidades necesarias para las realización de estas tareas se encuentran presente un graduado en Ingeniería en Tecnologías de la Telecomunicación.

Asimismo, se contemplan reuniones y orientación por parte de los tutores, estimando un total de 4 horas mensuales, cuya categoría profesional se establecerá como graduado en Ingeniería en Tecnologías de la Telecomunicación con máster.

Conforme se visualiza en la Figura 2.1, la duración total del proyecto se extiende a lo largo de 10 meses. Durante este período, se asignará un promedio de 3 horas diarias al trabajo, considerando un promedio de 21 días laborables al mes.

El sueldo promedio para un graduado en Ingeniería de Tecnologías de Telecomunicaciones sería de 14.88 €/hora, mientras que para los tutores, se les aplica una categoría de graduados en Ingeniería de Tecnologías de Telecomunicaciones con máster, lo que equivale a 29.66 €/hora[22].

| Profesional | Horas trabajadas | Remuneración total |
|--------------------------------------|------------------|--------------------|
| Ingeniero telecomunicaciones | 600 h | 8.928 € |
| Ingeniero telecomunicaciones (tutor) | 80 h | 2.372,8€ |

Tabla 2.3: Recursos humanos

2.2.4. Presupuesto total

A continuación se presenta el total de recursos económicos a a portar necesario para financiar el un proyecto de la embergadura de este proyecto fin de grado.

| | |
|-------------------|-------------|
| Recuento de coste | Subtotal |
| Recursos hardware | 976,99 € |
| Recursos software | 261,93 € |
| Recursos humanos | 11.300,8 € |
| Total | 12.539,72 € |

Tabla 2.4: Evaluación total recursos económicos

Capítulo 3

Estudio de tecnologías habilitantes de redes 5G público-privadas.

En este capítulo, se llevará a cabo un análisis de las tecnología 5G, las redes público-privadas y las tecnologías habilitadoras que hacen posible esta integración.

Para comenzar, en la Sección 3.1, se revisará la arquitectura de las redes 5G, proporcionando una visión general de esta tecnología. Luego, en la Sección 3.2, se profundizará en la interfaz inalámbrica 5G-NR, explorando sus componentes clave y su funcionamiento.

En la Sección 3.3, se analizará la tecnología network slicing implementada en 5G, con un enfoque específico en la parte de acceso radio. Esta sección proporcionara una base sobre tecnología permite la segmentación de redes para satisfacer diferentes necesidades de servicio.

Seguidamente, en la Sección 3.4, se centrará en las redes público-privadas, destacando su importancia y aplicaciones en diversos contextos. Finalmente, en la Sección 3.5, se abordará la implementación práctica de las redes público-privadas mediante la tecnología network slicing.

3.1. Arquitectura de 3GPP para 5G

3rd Generation Partnership Project (3GPP), la principal organización en la estandarización de redes móviles organismo dependiente de ITU, define y aprueba las especificaciones que rigen 5G a nivel internacional. Desde un punto de vista funcional la infraestructura de la red 5G se divide en tres segmentos de red [23]: núcleo de la red 5G (Core Network (CN)), red de acceso para 5G (New Generation Radio Access Network (NG-RAN) y red de transporte.

CN que conecta la red 5G del operador móvil hacia Internet o la red móvil (5G, 4G, etc) de otro operador y en el que se realizan funciones de autenticación, seguridad, agregación de tráfico y gestión de sesiones de los dispositivos conectados. 5G NG-RAN este bloque se encarga de gestionar la conexión de los dispositivos finales a la red vía radio. En la sección 3.1.2 se abordará en profundidad dicho bloque, por último la red de transporte regulado por Internet Engineering Task Force (IETF) este segmento queda fuera de enfoque del presente documento.



Figura 3.1: Arquitectura de red 5G. Figura obtenida de:[2]

En este documento se abordará de manera breve el núcleo de la red 5G ya que es de importancia para comprender la configuración de las redes público-privadas. Sin embargo, el enfoque principal se centrará en la red de acceso radio. Esto es así debido a que el desarrollo del simulador se limita a considerar únicamente los recursos radio.

3.1.1. 5G Core Network

En comparación con las redes móviles de cuarta generación (4G), que emplean una estructura de núcleo monolítico (implementado en un único componente de red que se encuentra centralizado y alejado de la parte RAN), 5G introduce una arquitectura basada en servicios Service Based Architecture (SBA). Dentro de esta arquitectura, cada función del núcleo se desarrolla de forma independiente, permitiendo una separación más efectiva entre los planos de control Control Plane (CP) y datos, hecho que la arquitectura de núcleo 4G no permite. Esta separación conlleva la capacidad de reducir la latencia en la comunicación al acercar la función de datos User Plane Function (UPF) al usuario final.

En este contexto, existen dos enfoques de diseño para las funciones de red. Uno de ellos es el enfoque punto a punto, donde las funciones se conec-

tan directamente. El segundo enfoque es el SBA el mostrado en la figura 3.3, el cual se representa en la figura correspondiente. SBA habilita el desarrollo independiente de funcionalidades de red, además de permitir la adición de nuevas funciones en el futuro sin alterar el funcionamiento de las ya existentes. Esta autonomía funcional y la opción de virtualizar estas funciones (NFV) permiten la aproximación del UPF al usuario final. Este aspecto permite disminuir la latencia en la comunicación, mejorando así la velocidad y la experiencia extremo a extremo. 3GPP recoge las especificaciones técnicas en TS 23.501 [23]

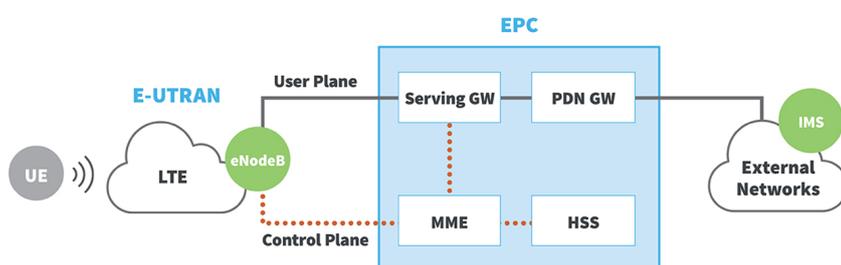


Figura 3.2: Arquitectura de red 4G [3]

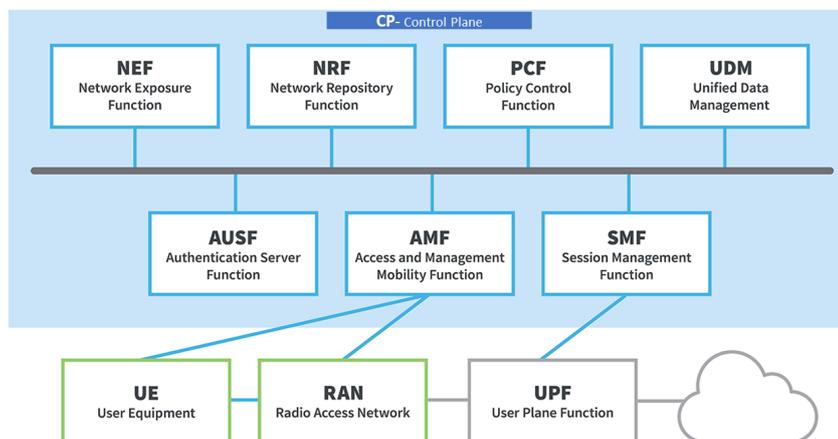


Figura 3.3: Arquitectura basada en servicios 5G [3]

Las funciones implementadas en 5G CN son [24]:

- Authentication Server Function (AUSF): Servidor de registros de autenticación basado en un protocolo de autenticación extensible (Extensible Authentication Protocol - EAP).

- Unified Data Management (UDM): Administrador de datos donde la identificación y suscripción se puede basar o no en IMSI (International Mobile Subscriber Identity). En UDM se generan las credenciales AKA (Authentication and Key Agreement), la identificación del usuario, la gestión de acceso y de suscripciones.
- Policy Control Function (PCF): Proporciona políticas de control de recursos de la red. Para ello consulta la información de suscripciones en UDM.
- Access and Mobility Management Function (AMF): Gestiona los registros, la conexión, la movilidad algunos de los aspectos de seguridad y accesos.
- Session Management Function (SMF): Realiza las gestiones de sesión, la asignación de Ips, se encarga del control de la función UDM, la terminación de señalización de NAS (Non Access Stratum), etc.
- UPF: Se encarga del reenvío, enrutamiento y revisión de paquetes, calidad de servicio, actúa como punto de interconexión entre la red de datos y las tecnologías de acceso radio (radio access technologies – RAT).
- Application Function (AF): Acceso a NEF e interacción con el PCF para el control de políticas de usuario.
- Network Slice Selection Function (NSSF): Selecciona la instancia de red (network slice) para los equipos finales, se profundizará más en este concepto en la sección 3.3.
- Network Exposure Function (NEF): Es una pasarela API (Application Programming Interface) que asegura la integración de información desde y hacia aplicaciones externas de la red.
- NF Repository Function (NRF): Es un registro el cual permite las funciones de descubrimiento y registro de perfiles de servicios e instancias de red.

3.1.2. Red de acceso radio 5G

La red de acceso radio (RAN) representa el segmento de la red 5G que proporciona acceso radio, en 5G es conocida como NG-RAN[25]. Los nodos de acceso (comúnmente llamadas estaciones base) reciben el nombre de nodos base de próxima generación (Next generation Node Base (gNB)) y brindan conectividad inalámbrica a los usuarios finales mediante la pila de protocolos de NR [26]. Desde un punto de vista funcional, los gNB se dividen en unidad de radio (Radio Unit (RU)), unidad centralizada (Centralized Unit (CU)) y unidad distribuida (Distributed Unit (DU)). En cada gNB se

pueden encontrar una CU y una o varias DUs y una o varias RUs, en función de las necesidades del escenario. La división de la gNB permite aprovechar los beneficios de la virtualización como la distribución de funciones entre CU y DU así como la centralización en la que una CU gestiona distintas celdas de cobertura. RU comprende las unidades hardware de gNB, tales como la circuitería radioeléctrica o antenas. DU se encarga de las funciones de las capas bajas de la pila de protocolos radio, mientras que la CU se encarga de las funciones de las capas altas. Las ocho divisiones funcionales que propone el 3GPP mapeadas a sus correspondientes unidades encargadas de dicha funcionalidad se muestran en la figura 3.4.

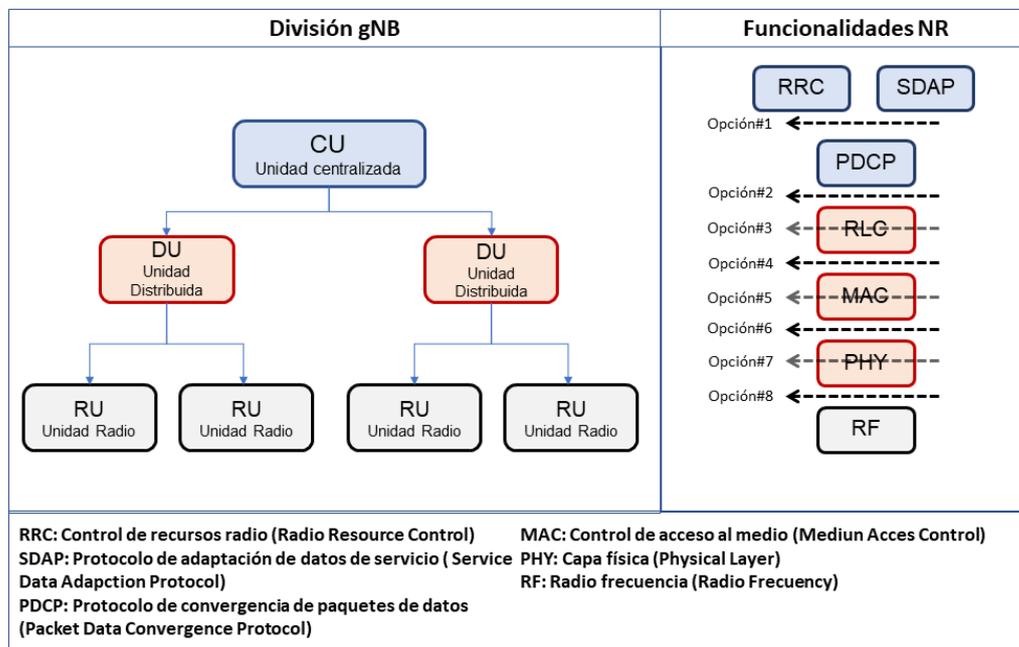


Figura 3.4: División funcional del gNB en 5G. Figura obtenida de [4]

Las distintas opciones de asignación de funciones están basadas en el escenario y los requerimientos del segmento de red o servicio. Esta flexibilidad permite que las funciones ubicadas en la CU se beneficien de la centralización de procesamiento y de las altas capacidades de un centro de datos. Las funciones adjudicadas a DU se beneficiarán de procesos realizados a una menor distancia del UE y una menor tasa de bits a la interfaz de comunicación con RU, así como una menor latencia.

Como se observa en la figura 3.4 en la opción 8 de las divisiones funcionales DU y CU se consideran como una misma unidad lógica que maximiza los beneficios del procesamiento centralizado lo que permite equilibrar la carga

y compartir la capacidad de procesamiento de las RU. Así mismo permite la virtualización de las funciones de red cuyos softwares se encuentran alojados en servidores. Lo que da como resultado un RU simplificado con menor coste energético y menor tamaño de hardware en la estación base en contraposición se imponen altas exigencias a la red fronthaul (es la interfaz de comunicación entre DU y RU) con altas tasas de bits y estrictos requisitos de latencia.

Por contraposición la opción 1 coloca todo el procesamiento en las DU generando un esquema totalmente distribuido lo que requiere de una entidad lógica de mayor complejidad y mayor consumo energético. La demanda a la red fronthaul es mas sencilla. Al realizar mas procesamiento en las DU genera una baja tasa de bits y una tolerancia mas alta de latencia

Mencionadas las dos opciones de división funcional mas extremas existe un consenso en la industria y la academia en las opciones mas factibles de implementar son la opción 2 y 7 [27]. La opción 2 implementa una CU y una DU de alto nivel que separa el plano de control y el plano de usuario. La opción 7 implementa una división de bajo nivel cuyo fin es una comunicación ultra confiable de baja latencia con una implementación cercana al borde.

3.2. 5G-NR

En la presente sección se introducirá 5G-NR, la interfaz inalámbrica desarrollada por 3GPP para 5G. Dicha interfaz comprende la parte de radiofrecuencia entre el dispositivo final y la estación base activa. La interfaz radio se define por las bandas de frecuencias de uso, la modulación y la asignación de recursos en la interfaz radio.

Las bandas de frecuencias utilizadas en 5G, 3GPP distingue dos grandes grupos de frecuencias dentro del espectro radioeléctrico: el primero es sub 6 GHz o FR 1, cuyo rango va 450 MHz a 6 GHz; y el segundo ondas milimétricas o FR2, cuyo rango abarca desde 24250 MHz a 52600 MHz. Los tamaños de canal admitidos en bandas por debajo de los 6 GHz se encuentran en un rango entre 5 Mhz y 100 MHz. En el caso de las bandas superiores a los 24 GHz, los tamaños de canal pueden variar desde 50 MHz a 400 MHz. Dicha información es aportada por el 3GPP en las especificaciones TS 38.101-1 [28] y TS 38.101-2 [29].

A continuación, se describen dos facetas de gran importancia en la interfaz inalámbrica del 5G NR. Por un lado, se aborda la técnica de la división de frecuencia ortogonal (Orthogonal Frequency-Division Multiplexing (OFDM)), la cual desempeña un papel fundamental en la arquitectura de esta tecnología. Por otro lado, se examina la partición de ancho de banda, otra característica crucial en el diseño del 5G NR.

3.2.1. OFDM

El hecho que la tecnología 5G ofrezca diferentes servicios como los mencionados en la sección 3.1, con distintas características y distintos requerimientos crea la necesidad de un escenario con una configuración flexible y escalable, adaptándose a cada servicio. Por ello la numerología, entendiéndose esta como el conjunto de parámetros necesarios para establecer la configuración de la forma de onda, no sea única, es decir, que contemple varias configuraciones.

OFDM es una técnica de modulación que permite transmitir varios flujos de datos al mismo tiempo utilizando ondas portadoras ortogonales entre sí. Estas portadoras se ajustan en amplitud, frecuencia o fase según una señal de entrada, llamada moduladora, para transmitir información. Al dividir la banda frecuencia de la portadora se obtienen subportadoras.

La suma de una o varias subportadoras de una portadora completa se traduce como un símbolo de comunicación, que en el estado más básico podría ser 1 o 0. Para evitar que se produzca interferencia entre las diferentes subportadoras o entre símbolos OFDM se introduce un espacio finito de tiempo entre subportadoras o conjunto de estas.

5G incorpora la tecnología OFDM introduciendo así el concepto de numerología que se puede definir como tipo espaciado entre subportadoras (Sub-carrier Spacing (SCS)), que a diferencia con la tecnología LTE (Long Term Evolution), no precisaba de varias configuraciones de numerología ya que esta era constante. Este espacio viene definido por la siguiente ecuación:

$$SCS = 2^\mu \cdot 15 \text{ kHz} \tag{3.1}$$

Las numerologías definidas por el 3GPP se muestran en la siguiente tabla [30].

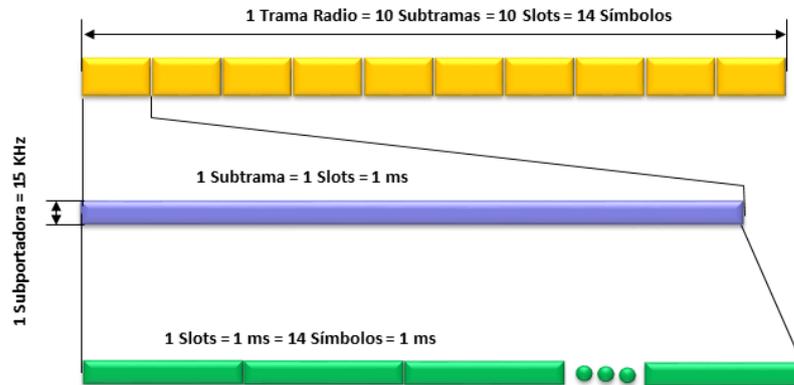
| μ | SCS |
|-------|-----|
| 0 | 15 |
| 1 | 30 |
| 2 | 60 |
| 3 | 120 |
| 4 | 240 |

Tabla 3.1: Numerología de transmisión soportadas en 5G

La estructura en el marco del 5G NR está basada en tramas, subtramas, ranuras o slots y símbolos. Las tramas poseen una duración de 10 ms, cada trama esta dividida en subtramas de 1 ms de longitud. El tamaño de las tramas y las subtramas es siempre constante. Cada subtrama esta compuesta por una o varias ranuras como se muestra a continuación. Cada ranura esta compuesta por 14 símbolos OFDM.

| μ | Nsimbolos | Ntrama | Nsubtrama |
|-------|-----------|--------|-----------|
| 0 | 14 | 10 | 1 |
| 1 | 14 | 20 | 2 |
| 2 | 14 | 40 | 4 |
| 3 | 14 | 80 | 8 |
| 4 | 14 | 160 | 16 |

Tabla 3.2: Tabla de codificación de numerología 5G 3GPP

Figura 3.5: Esquemmatización trama para $\mu=0$. [5]

Las distintas numerologías se reflejan en la estructura de trama como se indica en la tabla 3.2. En función de la numerología (μ) cada subtrama se divide en una o varias ranuras. En la figura 3.5 se observa la configuración para $\mu=0$ una subtrama está compuesta por una ranura, esta a su vez compuesta de 14 símbolos OFDM. Así que debido a que la duración de trama y subtrama se mantienen constantes, al aumentar el SCS aumentan el número de ranuras por trama y por ende, el número de símbolos.

Los recursos se distribuyen a lo largo del tiempo y la frecuencia tal y como se observa en la 3.6 figura que muestra la configuración de recursos en una subtrama.

En el esquema de recursos (Resource Grid (RB)) de una subtrama que se observa en 3.6 se distribuyen el número de subportadoras en eje de frecuencias y el número de símbolos OFDM en el eje temporal. Hay un número de recursos asignados para enlaces ascendentes y descendentes. Cada elemento del esquema o cada cuadrícula es el elemento de recurso (Resource Element – RE). Caracterizada por los parámetros k (índice en el dominio de la frecuencia) y λ (posición del símbolo en el dominio temporal). Los bloques de recursos (Resource Blocks (RB)) pueden estar formados por 12 o 14 subportadoras consecutivas en el eje de las frecuencias. En este documento

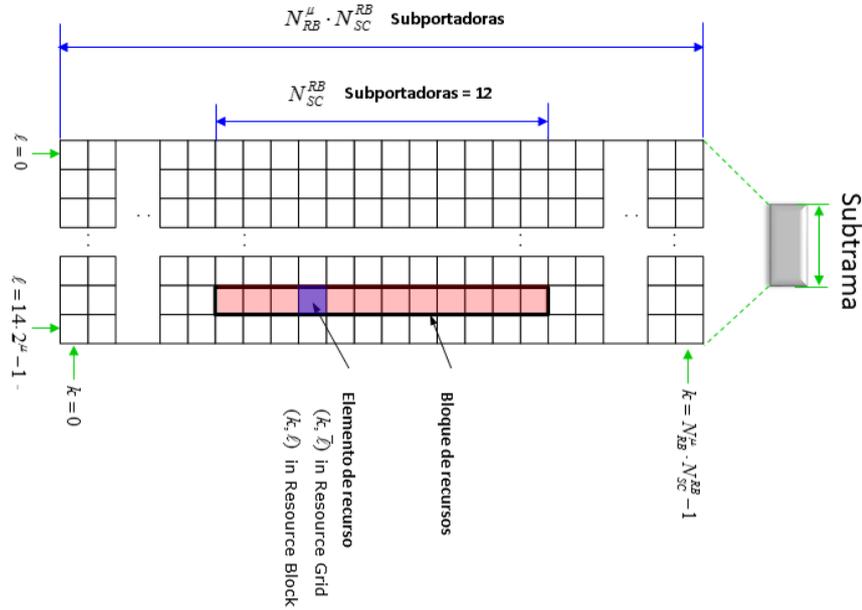


Figura 3.6: Esquematación bloque de recursos subtrama 5G. Figura obtenida de [5]

asumiremos la composición de RB por 1 slot temporal. El número de RB existente en una subtrama varía en función de la banda de transmisión y del espacio entre subportadoras como se puede apreciar en la figura 3.3, y viene recogido en el documento de 3GPP TS38.101-1 [28].

| scs kHz | 5 | 10 | 15 | 20 | 25 | 30 | 35 | 40 | 45 | 50 | 60 | 70 | 80 | 90 | 100 |
|---------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | MHz |
| | N_{RB} |
| 15 | 25 | 52 | 79 | 106 | 133 | 160 | 188 | 216 | 242 | 270 | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A |
| 30 | 11 | 24 | 38 | 51 | 65 | 78 | 92 | 106 | 119 | 133 | 162 | 189 | 217 | 245 | 273 |
| 60 | N/A | 11 | 18 | 24 | 31 | 38 | 44 | 51 | 58 | 65 | 79 | 93 | 107 | 121 | 135 |

Tabla 3.3: Configuración máxima de ancho de banda de transmisión NRB: FR1 [10]

El conjunto de RBs conforma los recursos disponibles en la celda, tal como se ilustra en la Figura 3.6. El tamaño de estos conjuntos de bloques de recursos varía en función del ancho de banda entre portadoras y del ancho de banda de la portadora, lo que se refleja en la tabla 3.3.

3.2.2. Bandwidth part

Una asignación con mayor ancho de banda en 5G redonda en una mayor velocidad de transmisión de datos, lo que mejora la experiencia de servicio de

los UE. Por el contrario, no todos los servicios utilizados por los UE requieren el mismo ancho de banda. Esto conlleva, por un lado, un desperdicio de recursos radio y, por otro, un consumo energético innecesario a nivel de procesamiento RF y banda base. Por todo ello, 3GPP define [30] partición del ancho de banda (Bandwidth Part (BWP)) en 5G NR.

BWP está compuesto por un conjunto de bloques de recursos comunes y contiguos. Una parte de ancho de banda puede incluir todos los bloques de recursos comunes dentro del ancho de banda del canal o un subconjunto de bloques de recursos comunes. Así, un BWP puede resumirse como una división de la onda portadora que permite la utilización de esta para diferentes servicios. Cada BWP tiene asociado un conjunto de RBs con su propia numerología. En función de las características del servicio requerido por el UE BWP permite que este haga uso de una cantidad parcial de RBs en función de la necesidad y no del total de RBs asignados a la transmisión.

Esta adaptación del ancho de banda permitirá la coexistencia dentro de una misma portadora de diferentes dispositivos con diferentes capacidades y requerimientos de señal. Un BWP puede dar servicio a un dispositivo con altos requerimientos energéticos mientras otra puede admitir a otra señal para diferentes servicios y funciones. Esto permite también la integración de dispositivos de tecnología 4G junto con dispositivos que implementa la tecnología 5G.

3.3. Network Slicing

La implementación de servicios eMBB, URLLC y mMTC con características tan diversas permitirá el desarrollo de una amplia gama de servicios y modelos comerciales en los distintos sectores económicos. El despliegue de dichos servicios tan diferenciados en características haría necesario la implementación de una arquitectura de red dedicada para cada servicio lo que repercutiría en una gran inversión económica que encarecería la rentabilización de dichos servicios. Ante este gran inconveniente emerge la tecnología de fragmentación de red (NS). Esta tecnología crea una segmentación de red en múltiples redes lógicas extremo a extremo sobre una misma infraestructura de red física [31]. La nueva red lógica creada es aislada, segura, administrable y programable para un modelo de servicio concreto con unos requerimientos específicos. Cada segmento se puede utilizar para un servicio distinto con una características específicas como se observa en la figura [6] en la que cada segmento esta destinado a cada servicio eMBB, URLLC y mMTC.

Network Slicing es un concepto utilizado para ejecutar distintas redes lógicas personalizadas en una misma infraestructura física compartida que cumple con los acuerdos de nivel de servicio (Service Level Agreement (SLA)) para cada una de las distintas redes lógicas [32]. Cada segmento de red es una red autónoma con sus propios recursos virtuales, topología, flujo de tráfico

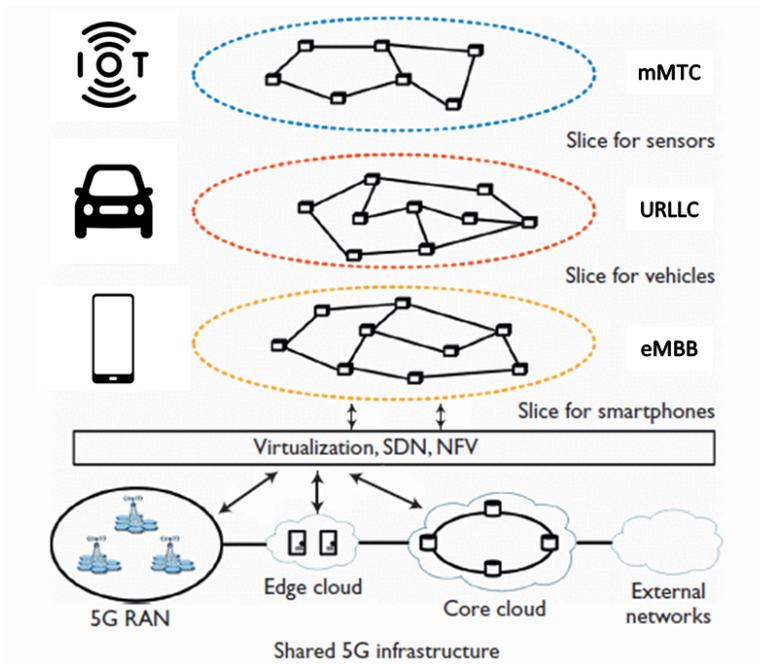


Figura 3.7: Ilustración conceptual NS. Figura obtenida de [6]

y reglas de aprovisionamiento.

La segmentación de redes se basa en dos pilares básicos, las redes definidas por software (SDN) y la virtualización de funciones de red (NFV), esto proporciona a la red la capacidad de ser programada, flexibilidad y modularidad que permite crear redes lógicas.

3.3.1. RAN slicing

NS en el dominio RAN se implementa mediante la abstracción lógica de recursos radio y hardware de forma que se puedan asignar recursos radio al servicio en función de las necesidades de este. Cada segmento de red va destinado a aplicaciones específicas en las cuales han de cumplir un determinado QoS. Cada subred o segmento de red está implementada en diferentes componentes de las gNB (CU, DU, RU) utilizando diferentes recursos de cada componente. De tal forma la división de arquitectura de NG-RAN en varias subredes debe implementarse para cumplir los requisitos de cada slice o segmento de red, para ello la gestión de los CU y DU se lleva a cabo mediante funciones de red virtualizadas (Virtual Network Function (VNF)) en las que cada tarea pasa a ejecutarse en máquinas virtuales en lugar de hardware propietario y/o específico.

En la figura 3.8 se presentan cuatro escenarios principales para compartir componentes de gNB entre subredes de segmentos de RAN, donde se enfoca

en la personalización de las unidades centrales (CU) y distribuidas (DU). El primer escenario permite una personalización completa, adaptando algoritmos de gestión de recursos radios (Radio Resource Management (RRM)) intra-segmento y configuración canales de transporte de datos en toda la pila de protocolos NR según las necesidades de cada subred. Sin embargo, esto puede llevar a la ineficiencia de recursos al requerir instancias VNF específicas por subred, limitando la utilización de recursos virtuales. Además, el aislamiento entre subredes podría ser problemático. El segundo escenario comparte completamente el gNB, optimizando recursos pero compartiendo tarjetas de red virtualizadas y presentando desafíos de aislamiento. Los otros dos escenarios involucran compartir CU/RU o DU/RU, balanceando personalización y eficiencia.

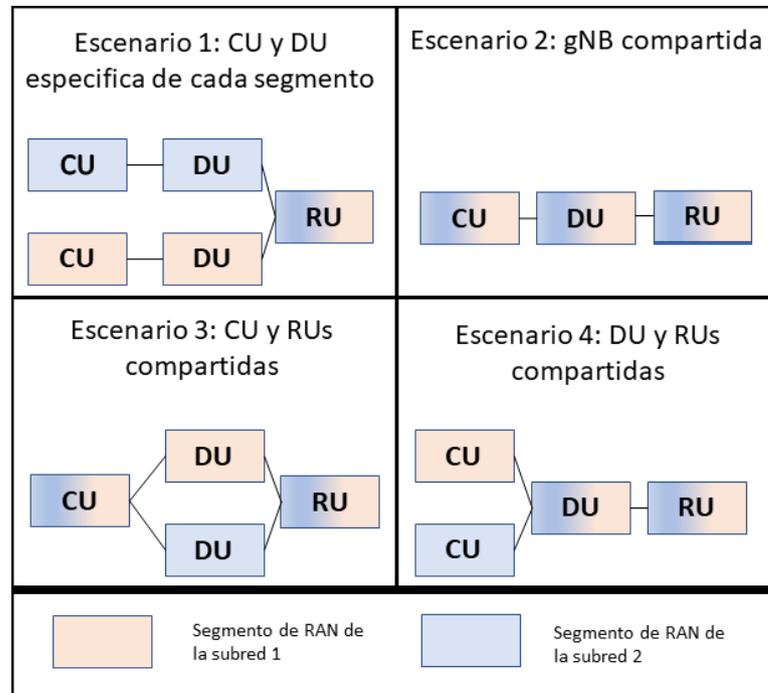


Figura 3.8: División Arquitectura NG-RAN [4]

Ante las cuatro soluciones presentadas en la figura 3.8 en este documento nos centraremos en el escenario 1, las CU y DUs son específicas de cada segmento de RAN para cada subred. Dicha solución es más sencilla de implementar que el resto y permite una personalización completa de cada subred del segmento de RAN ya que este segmento está provisto de todos los recursos de cada DU y CU. En todas las soluciones vistas RU están implementadas en hardware específico y serán compartidas por los diferentes slices ya que en las RUs se implementa la conexión radio con los UE mediante los RBs por lo tanto cada slice tendrá un conjunto de RUs a lo largo del tiempo.

En la parte de radio, cada segmento de red adopta una finalidad específica para cumplir un determinado SLA, como en los casos de eMBB o URLLC. Según el tipo de segmento, se le asignarán recursos y configuraciones de canal específicos. Los recursos radio pueden distribuirse dinámicamente entre los diferentes RAN slices, de manera que el conjunto de PRs de RAN se asigna a diferentes slices, como se muestra en la Figura 3.9.

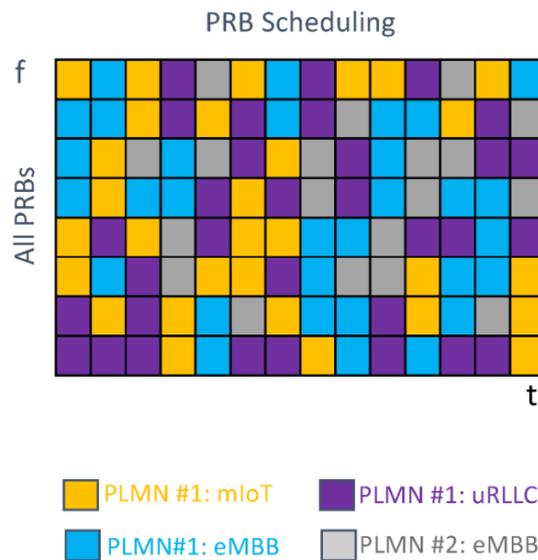


Figura 3.9: Asignación RB a RAN slices. Figura obtenida de [7]

Para asignar los recursos de la celda entre los slices disponibles y evitar la escasez de recursos que podría afectar a la calidad de servicio, se establecen políticas de reparto de recursos (RRM Policy Ratio) [33]. Esta política permite especificar el porcentaje de recursos de radio que se asignarán de la siguiente manera:

1. RRM Policy Ratio: Define cómo se dividen los recursos de radio entre las listas, indicando el porcentaje de PRBs asignados a los S-NSSAI correspondientes en promedio. La suma de los valores no puede superar el 100
2. RRM Policy Max Ratio: Esta política establece el porcentaje máximo de recursos de radio asignados al slice correspondiente. Puede ser una cuota estricta o flexible. Una cuota estricta restringe recursos a otros slices, incluso cuando no se utilicen en la lista definida. Los recursos de cuota flexible pueden ser utilizados por otros segmentos cuando no son necesarios en la lista definida.

3. RRM Policy Min Ratio: Esta política establece el porcentaje mínimo de recursos de radio asignados al slice. Esta cuota puede ser estricta o flexible.

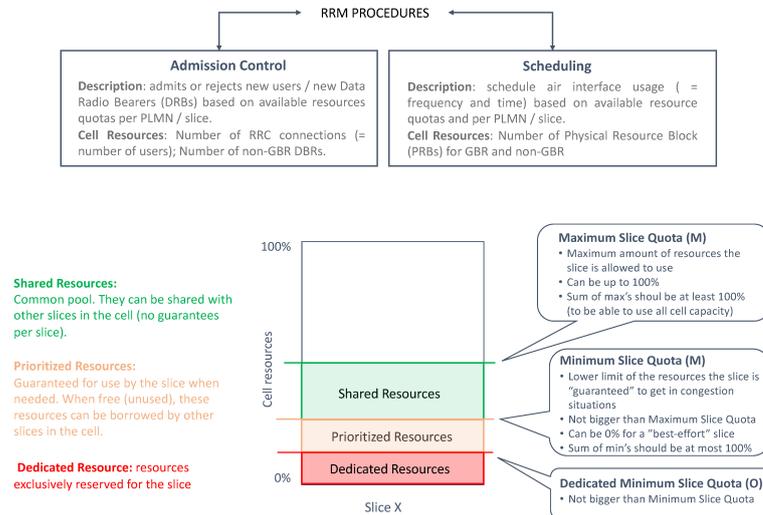


Figura 3.10: Procedimientos de RRM para el slicing. Figura obtenida de [7]

3.4. Redes público-privadas

El actual proceso de digitalización en los diversos sectores industriales que buscan una evolución y eficiencia de la actividad mediante la industria 4.0, fabricas inteligentes o internet industrial de las cosas (IoT) para diseñar industrias más flexibles, autónomas y eficientes crea un escenario idóneo para la integración de la tecnología 5G. Hasta la fecha 5G es la única tecnología capaz de soportar los estrictos requisitos de latencia que imponen aplicaciones de control de procesos industriales en la Industria 4.0 como en el caso de proceso de automatización discreta en que requiere un retardo extremo a extremo de 10 ms[34].

A diferencia de las tecnologías de redes móviles de generaciones anteriores, 5G permite la capacidad de ofrecer un compromiso en el nivel del servicio SLA en los ámbitos de capacidad, velocidad de datos, latencia, disponibilidad y área geográfica de cobertura a un entorno o cliente. Otro de los grandes avances que presenta 5G es la posibilidad de crear una red privada en un entorno geográfico determinado o bien de forma deslocalizada en la que independientemente de la localización del UE tenga acceso a dicha red privada.

Estas redes de ámbito privado pueden ser sustituidas o complementadas por redes de tecnología 5G privadas (Non Public Network (NPN)). 3GPP

define estas redes como una red 5G implementada para un uso no público a diferencia de las redes públicas 5G Public Land Mobile Network (PLMN), redes a las que cualquier dispositivo que esté suscrito al servicio puede acceder como es el caso de usuarios de a pie, para un uso cotidiano de las redes móviles como llamadas o conexión a internet. NPN se puede implementar como:

- Standalone Non Public Network (SNPN): que no depende de las funciones de red suministradas por una red pública (PLMN). Esta NPN está compuesta de un sistema 5G formado por su propio NG-RAN y 5GC, es decir cuenta con infraestructuras y funciones propias.
- Public Network Integrated Non Public Network (PNI-NPN): su implementación se encuentra integrada en PLMN de tal forma que para acceder a NPN los UE deben de estar suscritos a servicios de PLMN. PLMN dedica recursos físicos como nodos de acceso centros de computación y recursos computacionales como funciones de red en los planos usuario y control. Las PLMN pueden generar PNI-NPN mediante la tecnología de nombre de redes de datos o DNN (que no es objeto de estudio en este documento) o bien mediante segmentos de red destinando parte de sus recursos.

NPN debe cumplir ciertos requisitos para satisfacer las necesidades de los clientes. El nivel de calidad de servicio QoS de cada red privada cumple unas necesidades concretas en función de las actividades desarrolladas dentro de la industria. Debe de cumplir ciertos parámetros críticos tales como la disponibilidad, rendimiento, latencia y variación de latencia (jitter). Por ejemplo en casos en los que se necesite gran densidad de conexión, otros casos en los que es necesaria alta disponibilidad del servicio. Permite la personalización y adaptación a las necesidades del cliente mayores al PLMN ya que el diseño está orientado cubrir dichas necesidades distintas al PLMN orientados a soportar el crecimiento de tráfico, suscripciones a servicios. La protección de acceso a datos de los subscriptores de la NPN así como el acceso a UE no autorizados o propios datos de tráfico que circula por la NPN es un factor clave para la implementación de dicha red. En los entornos privados los clientes pueden solicitar cobertura radio de calidad en un área geográfica determinada.

PNI-NPN presenta distintas configuraciones tal y como se puede observar en la figura 3.11.

- Mediante una RAN compartida en la que NPN y PLMN comparten parte de la red de acceso radio de forma que pueda tener una banda del espectro dedicada.
- Otra configuración se basa en compartir RAN y CP de tal forma que se encuentran separadas bien de forma física o lógica de la NPN. Las

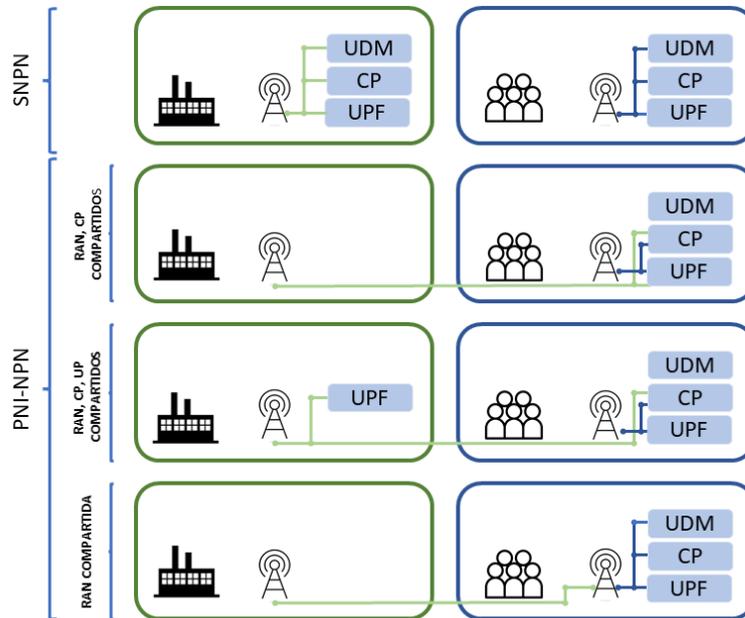


Figura 3.11: Escenario SNPN y PNI-NPN [8]

funciones de red relacionadas con UP se realizan dentro del entorno privado de tal forma el resto de funciones compartidas están alojadas en PLMN.

- La última configuración propuesta se basa en la compartición de RAN, CP y UP. En dicha configuración todo el tráfico generado por NPN esta administrado y controlado por PLMN por medio de RAN, CP y UP.

3.5. Implementación de Redes Público-Privadas Mediante Network Slicing

En esta sección, se presenta la estructura y los componentes esenciales de la implementación de redes público-privadas (PNI-NPN) a través del enfoque innovador del network slicing. La metodología se basa en la conceptualización de los segmentos de red y su interacción con la red principal (PLMN), estableciendo así un escenario de proveedor-cliente que abre nuevas perspectivas en la administración de recursos y la entrega de servicios.

3.5.1. Descripción de los tipos de modelo de negocio NPI-NPN

El esquema proveedor-cliente, fundamentado en la noción de segmentos de red, define dos tipos de productos dentro del marco NPI-NPN [35]:

Segmento de Red Como Servicio (NSaaS)

El concepto de Segmento de Red como Servicio (Network as a Service (NSaaS)) establece una instancia de segmento de red que se ofrece al cliente como un servicio completo de comunicación. Esto permite al cliente administrar ciertos parámetros del servicio a través de una interfaz dedicada, otorgándole la capacidad de actuar como proveedor de servicios hacia diversos usuarios finales (User Equipment (UE)). En este escenario, el cliente se convierte en una entidad dinámica capaz de personalizar y ofrecer servicios específicos.

Segmentos de Red Como Componentes Internos Operador de Red (NOP)

Los Segmentos de Red como Componentes Internos Operador de Red (Network Operator Provider - NOP) plantean un enfoque en el cual los segmentos de red no son directamente visibles para el cliente. En esta configuración, el cliente percibe el segmento de red como un usuario final, teniendo la posibilidad de monitorear el estado del servicio brindado por el operador. Esta variante asegura la privacidad y el enfoque en el servicio sin requerir una interacción directa con los detalles técnicos de la red subyacente.

3.5.2. Compartición de recursos RAN en redes Público-Privadas

En los escenarios esquematizados en la Figura 3.11, la compartición de recursos de Red de Acceso por Radio (RAN) entre NPN y PLMN resulta fundamental para la implementación exitosa de las redes público-privadas. Esta colaboración estratégica permite a los operadores de NPN expandir su presencia de servicio al tiempo que minimizan la inversión inicial en la infraestructura de despliegue. La compartición de recursos RAN puede realizarse mediante dos enfoques: una Red de Acceso por Radio Multioperador (Multioperator Radio Access Network - MORAN) o una Red Central Multioperador (Multioperator Central Network - MOCN).

3.5.3. Comparación de soluciones MORAN y MOCN

La principal diferencia entre las soluciones MORAN y MOCN residen en el caso de MORAN, se asigna a NPN un espectro de frecuencias dedicado,

lo que proporciona un mayor control sobre los aspectos radio y minimiza la interferencia en el rango de celdas de cobertura. Por otro lado, MOCN presenta una compartición de recursos más amplia, lo que resulta en la necesidad de gestionar cuidadosamente la asignación de recursos y la calidad de servicio.

3.5.4. Integración de Network Slicing en Redes Público-Privadas

La implementación de Network Slicing desempeña un papel crucial en la habilitación de las redes público-privadas. Al aprovechar las capacidades del slicing, se logra una segmentación efectiva de la red, permitiendo asignar recursos y servicios específicos a segmentos determinados.

En este contexto, consideramos la noción de celdas públicas y privadas, donde cada celda tiene su propio conjunto de Bloques de Recursos (RBs) que pueden asignarse a diferentes slices. Esto garantiza una adaptación precisa de la red para satisfacer las necesidades y los requisitos de cada tipo de usuario o servicio.

Luego una PNI-NPN se despliega con el apoyo de PLMN. PLMN da acceso a PNI-NPN mediante dos opciones: bien por nombres de redes de datos Data Network Name (DNN), este no es el caso de estudio que nos ocupa, o bien por medio de segmentos de red asignados a NPN [23].

La integración de Network Slicing permite la creación de segmentos de red que proporcionan redes lógicas aisladas con requisitos específicos sobre una infraestructura de red común. Cada segmento de red consume una cantidad de recursos radio de la celda. Los segmentos de red proporcionan un aislamiento y tratamiento de calidad de servicio específico, lo que permite un control de acceso mediante un sistema de suscripción.

A modo de ejemplo, consideremos un escenario en el que esté presente una celda pública perteneciente a un PLMN. Esta celda dispone de un conjunto de recursos radio destinados a brindar servicios a sus clientes. Además, dentro de esta celda pública, existe un entorno privado que busca establecer una conexión de datos a través de una red de acceso móvil basada en la tecnología 5G. Para lograr esto, el PLMN implementa PNI-NPN reservando una fracción de sus recursos radio. Esta fracción actuará como un segmento de red dentro de la red pública en cuanto a recurso radio se refiere.

Capítulo 4

Análisis y modelado del entorno de red 5G público-privado

En este capítulo, abordamos la tarea de modelar y simular un entorno de red público-privada en el contexto de la tecnología 5G, con el propósito de establecer una sólida base para la comprensión y evaluación de esta configuración única de red. En primer lugar, se presenta con detalle el escenario de la red público-privada que servirá como fundamento para nuestras simulaciones. A continuación, exploramos diferentes modelos de red que serán empleados en nuestras simulaciones. Se examina el modelo de tráfico, el cual representa los flujos de datos generados por usuarios y servicios en la red. Además, introducimos el modelo de canal, un componente crucial para comprender cómo las señales se propagan y degradan en el entorno de la red 5G. Por último, se traducen los requisitos de rendimiento de los distintos servicios en demandas específicas de recursos radio.

4.1. Escenario de red 5G público-privado

En este trabajo se asume una región geográfica que dispone de cobertura de radio mediante la tecnología 5G tal y como se representa en la figura 4.1. Esta área está conformada por una serie de RUs (visto en 3.3.1), cada uno de los cuales tiene la capacidad de proporcionar cobertura a una región geográfica llamada celda. Estas celdas se encuentran dentro de un PLMN que pertenece a un operador móvil. Las celdas utilizadas por el operador móvil se denominan macroceldas y no referiremos a ellas de tal manera cuando se hable de un operador público.

El escenario abordado en este proyecto centra en una macrocelda de red pública. Dentro de esta área macrocelular, hay una zona industrial, como se puede observar en la figura 4.1. En esta área industrial, se está llevando a

cabo un proceso de modernización para convertirla en una industria 4.0, en sintonía con las últimas tendencias tecnológicas.

En el entorno industrial, se ha implementado una red privada 5G compuesta por puntos de acceso propios, cuya RAN está basada en la tecnología 5G NR. La Comisión Europea ha solicitado a la Conferencia Europea de Correos y Telecomunicaciones (CEPT) el estudio de la implementación de redes de área local inalámbricas para fomentar el desarrollo industrial 5G en la Unión Europea [36][37], permitiendo la concesión de licencias de espectro para el uso industrial. Por dicho motivo se asume que la industria privada puede tener puntos de acceso 5G propios. Estos puntos de acceso abarcan un área de cobertura conocida como femtocelda. Además, se plantea la posibilidad de adquirir espectro con licencia para impulsar la transformación de la industria, ya sea como reemplazo de los puntos de acceso o como complemento de recursos junto con los puntos de acceso existentes.

Dentro del área industrial, se implementa una SNPN con puntos de acceso propios y un control de acceso y datos gestionados por el entorno privado. En caso de que los recursos de la SNPN resulten insuficientes, se complementarán los recursos desde la macrocelda mediante un PNI-NPN de un PLMN. En esta configuración, se comparte la RAN y las funciones de control de usuario son llevadas a cabo por el entorno privado.

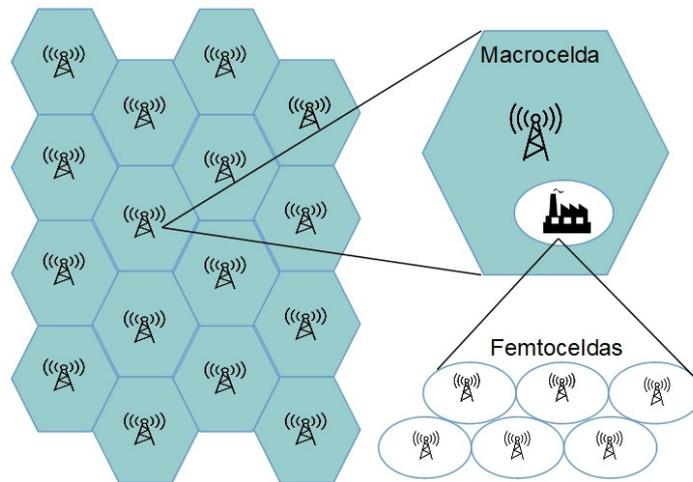


Figura 4.1: Escenario

En este escenario, nos encontramos en una situación en la cual coexisten espacialmente una macrocelda del operador público con varias femtoceldas del operador privado. Se asume también que todas las celdas implementan OFDM, siendo la frecuencia portadora de la macrocelda diferente a la frecuencia portadora de las femtoceldas, Por lo tanto, la macrocelda no podrá

causar interferencia a las femtoceldas y viceversa. Esta particularidad, junto con la tecnología de segmentación de redes (NS), permite trabajar con una sola entidad de red con características propias que se mantienen en diferentes redes RAN. En otras palabras, en este contexto es posible implementar un slice con características específicas para cumplir con SLA concretos para los dispositivos del entorno industrial considerado. En caso de que la red privada carezca de recursos radio suficientes para el volumen de tráfico solicitado, es posible acceder a dicho slice a través de la red pública, la cual aportaría los recursos necesarios y dotaría a la entidad de las mismas propiedades en cuanto a recursos, privacidad, cobertura, entre otros. En este trabajo nos centramos en el tráfico del enlace descendente (downlink) que va desde la estación base al UE.

Dentro de los procesos industriales a implementar en esta industria, se encuentran sistemas de control de bucle cerrado y sistemas de realidad aumentada integrados en las gafas de los trabajadores.

Una solución para la automatización de procesos industriales se basa en sistemas de control de bucle cerrado. En un sistema de control de bucle cerrado, se analizan los valores de salida de un sistema y se introduce un estímulo determinado en el sistema para obtener un valor de salida específico o un rango de valores de salida deseados. Estos sistemas se aplicarán a diversos sistemas automáticos en la fábrica, tales como sensores de temperatura en maquinaria crítica, sistemas de análisis de riesgos en sistemas de gases, brazos robóticos con funciones específicas, sistemas de conducción autónoma para transporte de elementos dentro del área industrial, entre otros.

La tecnología 5G URLLC permite la implementación de estos sistemas en el escenario planteado mediante la creación de un slice que cumple con los siguientes requisitos de calidad de servicio: una tasa de descarga de datos, un retardo máximo y disponibilidad de comunicación conforme a los requisitos industriales.

El sistema de realidad aumentada implementado a través de dispositivos ópticos, como gafas, cascos o trajes de protección, proporcionará información precisa a los trabajadores sobre las tareas a realizar. Por ejemplo, en un proceso de ensamblaje, el trabajador podría obtener información instantánea sobre el tipo de pieza, su ubicación, el método de fijación, el inventario de piezas y recibir notificaciones en tiempo real de la dirección de la empresa o alertas de seguridad. Esto, a su vez, contribuirá a un aumento en la eficiencia y la seguridad laboral. A este respecto, el slice eMBB brinda servicios a dispositivos de realidad aumentada. Para que eMBB pueda ofrecer eficazmente estos servicios a cada UE, debe asegurar una tasa de bits garantizada para cada solicitud de inicio de sesión. En caso de que no pueda cumplir con esta garantía, la solicitud será rechazada. Por lo tanto, eMBB debe proveer este servicio a lo largo de un período de tiempo específico para un porcentaje de UEs, teniendo en cuenta una tasa de solicitud promedio. Este parámetro de calidad se refleja en la probabilidad de bloqueo, que busca garantizar un

nivel mínimo de calidad de servicio.

4.2. Modelo de red

En esta sección, se presenta una descripción de los modelos de canal y de tráfico aplicados a los slices eMBB y URLLC en el contexto de las redes 5G. Además, se proporcionará un modelo radio necesario para representar la asignación de recursos entre los slices.

4.2.1. Sistema de acceso radio

El sistema de acceso radio basa en un sistema de acceso múltiple mediante división de frecuencias ortogonales OFDMA, con un ancho de banda (BW) que se subdivide en N_{SC} subportadoras obtenido del estudio [9]. Estas subportadoras con igual numerología se agrupan para formar un conjunto de recursos, que representa la unidad fundamental de recursos. Así, se calcula el número de bloques de recursos (RB) disponibles en un intervalo de tiempo.

La cantidad de RBs N_{RB} en un slot se obtiene mediante la siguiente ecuación:

$$N_{RB}^{slot} = \left\lfloor \frac{W}{N_{SC}\Delta f}(1 - OH) \right\rfloor \quad (4.1)$$

4.2.2. Modelo del canal

Para llevar a cabo la planificación de recursos es necesario evaluar la calidad del canal. Para ello, se emplea el parámetro de relación señal a interferencia más ruido (Signal to Interference plus Noise Ratio (SINR)). La SINR se ve influenciada por diversos factores, como la pérdida de trayectoria en la propagación, el efecto de sombreado, el desvanecimiento o atenuación de la señal, así como las interferencias entre celdas [38]. Dado que consideramos a los UEs en una configuración estática o semiestática, consideramos que la pérdida de trayectoria y el efecto de sombreado son constantes, mientras que otras variables varían con el tiempo en función de las condiciones de los UEs.

Es importante destacar las diferencias entre los distintos slices y las características particulares de los UEs. Por lo tanto, se han utilizado diferentes modelos de canal para eMBB y URLLC, los cuales se describen a continuación.

Modelo del canal para servicios de tipo URLLC

En el contexto de la planificación de recursos para los servicios URLLC, los dispositivos de usuario (UEs) se caracterizan por mantener posiciones constantes, tasas de datos invariables y un número constante de usuarios a lo largo del tiempo y del espacio, como se detalla en la sección 4.2.3. Dado

este comportamiento, se procede al cálculo de la SINR. El cálculo de la SINR experimentada por los usuarios de un slice atendidos por cualquiera de las celdas 5G se basa en el modelo SINR descrito en [39], cuya expresión es la que sigue a continuación:

$$SINR_{(u,r)} = \frac{P_{RX}^g(d_{g,u})}{\sum_{j \in G \setminus g} L_j \cdot \pi_j(r) \cdot P_{RX}^j(d_{j,u}) + P_N} \quad (4.2)$$

- $P_{RX}^g(d_{g,u})$ es la potencia recibida por un UE, esta depende de la distancia euclídea entre el UE y el punto de acceso radio.
- L_j es el factor de carga de la celda j .
- π_j toma valor 1 cuando el slice es asignado a la celda j .
- P_N es la potencia del ruido.

En este escenario, la SINR desempeña un papel crucial como criterio de selección de la celda que brindará cobertura a cada UE, de tal modo que la celda que proporcionará cobertura a cada UE será la celda de la cual pueda obtener una mayor SINR.

Modelo del canal para servicios de tipo eMBB

En el caso de eMBB, debido a la naturaleza de los inicios de sesión solicitados, las cuales no son fijas ni en tiempo ni en espacio, y tratarse las solicitudes de conexión con un frecuencia promedia se emplea la SINR promedio. Este modelo del canal obtenido del artículo [9]

Partiendo de una SINR en un instante de tiempo t , medido en un UE específico u , se define a través de la siguiente ecuación:

$$\gamma_{u,n}^{(t)} = \frac{P_c^{RX}}{\sum_{j \in C \setminus \{e\}} L_j \alpha_{j,n} P_j^{RX} + P_N} \quad (4.3)$$

- P_c^{RX} es la potencia recibida por un UE desde la estación base.
- L_j es el factor de carga de la celda j .
- α_j toma valor 1 cuando el slice es asignado a la celda j .
- P_N es la potencia del ruido.

A partir de la ecuación anterior se trabaja con el SINR promedio para cada UE $\bar{\gamma}_u$ [9], promediando $\gamma_{u,n}^{(t)}$ a lo largo de los Recursos de Bloque (RBs) que ha consumido un UE durante un período determinado:

$$\bar{\gamma}_u = \frac{1}{T_{ff}} \int_{\tau}^{\tau+T_{ff}} \frac{1}{|\mathcal{N}_{RB}^{u,(t)}|} \sum_{n \in \mathcal{N}_{RB}^{u,(t)}} \gamma_{u,n}^{(t)} dt \quad (4.4)$$

- T_{ff} periodo de tiempo del calculo de SINR promedio.
- $\mathcal{N}_{RB}^{u,(t)}$ numero de bloques de recursos consumidos por UE u .

Se trabaja con un SINR promedio debido a que la duración de sesión de cada UE es mucho mayor que el periodo de cambio de la SINR instantánea. La SINR promedio puede ser medida en múltiples ocasiones, cada vez que un usuario establece o termina una sesión. En cada una de estas mediciones, la SINR promedio puede tener un valor diferente. Debido a esta variabilidad, se tomará en consideración la función de densidad de probabilidad (Probability Density Function (PDF)) para estas medidas de valores de SINR promedio.

Ya que PDF es un continuo conjunto de valores y que por simplicidad matemática, se discretiza en un conjunto finito de valores. Para poder trabajar con la FDF se divide un conjunto discreto de regiones. De tal forma que para cada región se define como un conjunto de valores para un SINR promedio.

Se asume la probabilidad de que un UE inicie sesión en una región z con una probabilidad de π_z .

$$\pi_z = \int_{\bar{\gamma}^{(z-1)}}^{\bar{\gamma}^z} f_{PDF}(\bar{\gamma}) d\bar{\gamma} \quad (4.5)$$

Se asume que $\sum_{z=1}^{N_z} \pi_z = 1$.

4.2.3. Modelo de tráfico

La elaboración del modelo de tráfico se ajusta a la naturaleza de los servicios proporcionados por cada UE. En vista de que los dispositivos servidos por eMBB y URLLC a implementar en el área industrial tienen propósitos distintos, también presentan características diferentes en términos de tráfico de datos.

Modelo de tráfico para URLLC

En el caso de los dispositivos conectados al slice URLLC, se trata de dispositivos que permanecen en una ubicación específica de manera constante, y el número de estos dispositivos se mantiene invariable con el tiempo. Debido a su propósito, estos dispositivos requieren de una tasa de datos específica R_u y constante. Por lo tanto, el tráfico total del slice se modela considerando paquetes de datos transmitido de un tamaño de paquete de datos σ_s .

Este modelo se obtiene del artículo [40], adaptado para calcular la tasa de datos por usuario a nivel de la capa física, teniendo en cuenta un ancho de banda asignado específicamente para cada usuario. Esta adaptación del modelo se basa en la capacidad de Shannon, aunque en el contexto de

URLLC, donde el tamaño de los paquetes es muy pequeño, la tasa de datos y la probabilidad de error de transmisión no pueden obtenerse con precisión. Por esta razón, se calcula la tasa de datos en un contexto de codificación de canal de bloques finitos para un dispositivo en un slice, utilizando una longitud de bloque de palabra de código (símbolos). La ecuación se presenta a continuación:

$$R_u = BW_u \left(\log_2(1 + SINR_u) - \sqrt{\frac{C_{u,s}}{n}} Q^{-1}(\epsilon) \log_2(e) \right) \quad (4.6)$$

Donde:

- BW_u es el ancho de banda requerido por un UE en el segmento URLLC se puede obtener de Ec. 4.1.
- $SINR_u$ es la SINR percibida por un usuario en la celda.
- n es igual a 168 símbolos, basado en el tamaño de los bloques de recursos (RBs) en sistemas LTE, que contienen $12 * 7 = 84$ símbolos y una duración de 0.5 ms [41].
- ϵ es la probabilidad de error de transmisión.
- Q^{-1} es la inversa de la función Q gaussiana.
- $C_{u,s}$ es la dispersión del canal para el UE j en el segmento URLLC s , y se calcula mediante la ecuación:

$$C_{u,s} = 1 - \frac{1}{(1 + SINR_u^2)} \quad (4.7)$$

Modelo de tráfico para eMBB

Los UEs que se conectan al slice eMBB, y que a su vez son utilizados para proporcionar realidad aumentada a los trabajadores, operarán de manera que realizaran solicitudes de inicio de sesión de datos a lo largo del tiempo, dependiendo de las demandas laborales. Además, la descarga (tráfico descendente) de información necesaria en dichos dispositivos puede experimentar pausas cuando no se requiere nueva información o no es necesario alterar la información existente. Además de esto, los puestos de trabajo de estos dispositivos pueden variar en el espacio, lo que significa que un mismo dispositivo puede ser empleado en diferentes áreas donde se ejecutan funciones específicas, y posteriormente el trabajador puede ser requerido en otra área para realizar otras tareas.

Es importante asumir que las conexiones realizadas por los UEs corresponden a sesiones de datos con solicitudes de inicio de sesión en un punto de

acceso específico en un momento determinado. A lo largo de estas sesiones, se descarga una tasa de datos necesaria para ejecutar el servicio durante un período de tiempo predeterminado y desde un servidor de datos.

Para modelar este comportamiento, empleamos un modelo tasa de solicitud de sesión promedio λ . La tasa de liberación μ , que representa la cantidad de sesiones finalizadas por unidad de tiempo, se mantiene constante e independiente de la región en la celda. Además, se define una duración promedio para cada sesión de manera $t = 1/\mu$.

Partiendo un una tasa de llegada total λ al slice eMBB. Cada celda i , ya sea femtocelda o macrocelda, posee una tasa de solicitud de inicio de sesión de λ_i propia tal como aparece la siguiente ecuación:

$$\lambda_i = \lambda * P_i \tag{4.8}$$

Para cada nodo existe un probabilidad P_i de que un UE este siendo servido por dicho nodo i . Para dichas sesiones de datos se garantizara una tasa de datos de descarga mayor o igual a GBR.

4.3. Modelos para la traducción de requisitos de rendimiento a recursos radio

Para analizar exhaustivamente los requisitos de los servicios en términos de recursos radio, se hace imprescindible la formulación de modelos matemáticos sólidos y coherentes. Estos modelos se erigen como criterios de decisión esenciales, proporcionando un marco para traducir de manera precisa y cuantitativa los requisitos específicos de cada servicio en términos de los recursos radio correspondientes. En consecuencia, se presentarán dos modelos matemáticos, uno para cada uno de los slices considerados.

4.3.1. Modelo probabilidad de bloqueo eMBB

Haciendo uso del modelo analítico de probabilidad de bloqueo para un UE en una celda OFDMA en un slice determinado obtenido de [9]. Este modelo está basado en un modelo Erlang-B multidimensional para transmisiones de datos con una tasa de bits garantizada (GBR) que nos proporciona la probabilidad de bloqueo de sesión de datos por no poder ofrecer una tasa de datos suficiente durante la duración de la sesión.

Modelo Erlang-B

Para la cuantificación de tráfico con posibilidad de bloqueo por insuficiencia de recursos se utiliza un modelo Erlang-B multidimensional para

generar un esquema de estados definidos por el par tasa de entrada λ y tasa de servicio μ . La intensidad de tráfico en cada región vendrá dada por $\rho_z = \lambda_z/\mu$.

Cada inicio de sesión tendrá lugar en un región Z caracterizada por el par (λ_z, μ) . s es el conjunto de UEs activos en el conjunto de slice de forma que los UEs active en una región z es U_z .

Dicho esquema como el que se presenta en la figura 4.2 nos define el estado de cada región es decir el número de UE activos por región. Recordando que cada región hace referencia a la SINR promedio que tendrá dicha sesión a lo largo de su tiempo de vida. Se establecen un conjunto de estado factibles de tal forma que las suma de los recursos estimados consumidos por los UEs de cada región $\sum U_z N_{RB,z}^{slot}$ no puede ser mayor que le conjunto de RB asignados a la celda N_{RB}^{slot} . Por lo tanto dicho modelo permite ir cambiando de estados factibles. Con la siguiente ecuación se definen los limites superiores de los estados factibles.

$$U_{z|U_y}^{c\text{máx}} = \left\lfloor \frac{N_{RB}^{slot} - \sum_{y \in Z \setminus \{z\}} U_y N_{RB,y}^{slot}}{N_{RB,z}^{slot}} \right\rfloor \quad (4.9)$$

El estado de bloqueo se producirá cuando no se pueda pasar de un estado a otro con una distribución de UEs activos por regiones dentro de la celda, debido a que no hay recursos suficientes para pasar a ese nuevo estado, es decir se debe cumplir la siguiente condición:

$$N_{RB}^{slot} - \sum_{z=1}^{N_Z} U_z N_{RB,z}^{slot} \geq 0 \forall s \quad (4.10)$$

Supongamos que tenemos un sistema con dos regiones y un total de 10 recursos disponibles. En esta configuración, tenemos UE en ambas regiones que consumen recursos de manera diferente. En la primera región, un UE consume 2 recursos, mientras que en la segunda región, que tiene una peor SINR, un UE consume 3 recursos.

Basándonos en este ejemplo sencillo, podemos definir los posibles estados de asignación de recursos. Por ejemplo, podríamos tener estados donde todos los recursos se asignan a la primera región, estados donde todos los recursos se asignan a la segunda región, o estados mixtos donde se asignan recursos a ambas regiones. Cada uno de estos estados tendría un impacto en el rendimiento de la red y en la calidad de servicio para los usuarios.

Cálculo de probabilidad de bloqueo de una sesión de datos

La probabilidad de bloqueo en un sistema puede ser descompuesta como la suma de la probabilidad de bloqueo condicionada a una región z multiplicada por la probabilidad de que se solicite una nueva sesión de datos en la misma región z Ec.4.12. La probabilidad de bloqueo condicional puede

ser evaluada mediante la suma de las probabilidades de estar en un estado específico, considerando aquellos estados en los cuales no es posible realizar una nueva transición (admisión de una nueva sesión) en la región z . Para llevar a cabo este cálculo, es posible emplear un enfoque iterativo, como se ilustra en la Ecuación 4.11. Esta metodología permite analizar los estados de bloqueo en cada región, lo que a su vez posibilita obtener la probabilidad de bloqueo para un UE en una región específica.

Este proceso se expresa matemáticamente de la siguiente manera:

$$B_z = \sum_{U_{N_z}=0}^{U_{N_z}^{a,m\acute{a}x}} \sum_{U_{N_z-1}=0}^{U_{N_z-1|z,U_{N_z}}^{bplim}} \cdots \sum_{U_1=0}^{U_{1|z,U_{N_z}}^{bplim}, U_{N_z-1}, \dots, U_2} p(U_1, U_2, \dots, U_{z|U_y}^{c,m\acute{a}x}, \dots, U_{N_z}) \quad (4.11)$$

Este cálculo se efectúa para evaluar la probabilidad de bloqueo de un nuevo UE en una celda. Para ello, se suma ponderadamente las probabilidades de bloqueo asociadas al inicio de sesión en cada región:

$$B = \sum_{z=1}^{N_z} \pi_z B_z \quad (4.12)$$

Este enfoque permite considerar de manera integral los estados de bloqueo en distintas regiones, proporcionando una perspectiva completa de la probabilidad de bloqueo para nuevos UEs en la red.

4.3.2. Modelo de retardo para URLLC

La planificación de recursos en el slice URLLC aborda la cuestión de la tasa de UEs presentes en el escenario cuyos retardos superan los límites establecidos en el SLA, lo que indica un modelo de retardo para URLLC. Por lo tanto es necesario recurrir a un modelo matemático que permita relacionar.

Relación entre la tasa promedio de usuario y retardo máximo.

El cálculo del retardo se lleva a cabo para cada UE de manera individual, considerando una tasa de datos específica y la SINR instantánea de cada dispositivo. Esto se realiza con la asignación de recursos radio BW_u de tal forma que por la ecuación 4.1 se mapea con un número concreto de recursos radio (RB) correspondiente a cada dispositivo, lo que permite obtener inicialmente el dato de la tasa de datos.

Haciendo uso del modelo plasmado en la ecuación 4.6 se relaciona con el siguiente modelo aportado por el artículo [42], que establece la conexión entre la tasa de datos y el requisito de retardo máximo a garantizar para los servicios URLLC:

$$BR_u = \frac{\sigma}{D + \frac{\sigma}{R_j^u}} \quad (4.13)$$

Donde:

- BR: tasa de datos garantizada.
- σ es el tamaño máximo del paquete URLLC.
- D es el retardo requerido.

Resolviendo la ecuación para el parámetro D, se obtiene el retardo máximo experimentado por un UE con recursos radio asignados específicos y una SINR determinada. En este estudio, se busca que el valor D para dicho usuario sea menor o igual al retardo umbral establecido D_{limit} , con el objetivo de lograr una calidad de servicio óptima.

Tasa de no Cumplimiento

La Tasa de no Cumplimiento α_i nos proporciona una medida de los UEs a los cuales se les han asignado recursos insuficientes para que su retardo máximo sea menor o igual que el retardo objetivo. Esto resulta en que el retardo experimentado por estos usuarios sea mayor al umbral necesario para cumplir el SLA establecido, y es lo que aquí denominamos como UE no cumplidor. Esta tasa se calcula como la proporción entre el número de UEs no cumplidores y el número total de UEs en la celda i .

$$TC_i = \frac{\text{Numero de UEs no cumplidores}}{\text{Numero total de UEs en el nodo } i} \quad (4.14)$$

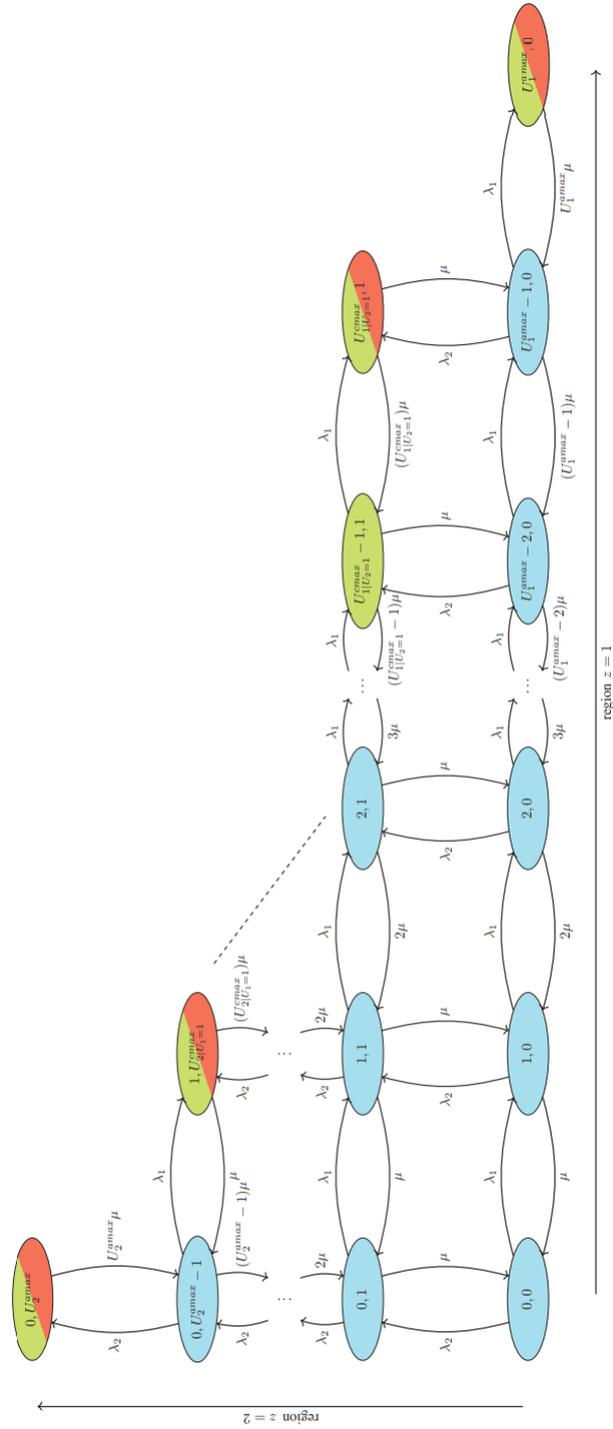


Figura 4.2: Diagrama de transición de estado para un sistema bidimensional de Erlang-B(Adamuz et al.,2021) [9]

Capítulo 5

Diseño de herramienta de planificación

En este capítulo, se presenta la conceptualización y desarrollo de una herramienta de planificación de recursos radio para los slices eMBB y URLLC en un entorno de red público-privado. El objetivo principal de esta herramienta es facilitar una asignación eficiente y optimizada de los recursos radio en las redes 5G, teniendo en cuenta las distintas necesidades de estos dos tipos de servicios.

Para la elaboración de esta herramienta, se ha desarrollado un simulador que integra modelos de canal, modelos de tráfico y modelos de traducción de requisitos de rendimiento a recursos radio. Estos modelos combinados ofrecen una representación precisa de las demandas de los slices eMBB y URLLC en términos de recursos radio.

Además se ha diseñado e implementado un algoritmo que aprovecha el simulador con los modelos previamente mencionados para llevar a cabo la asignación de los recursos radio disponibles. Esto se logra mediante la aplicación de criterios específicos definidos para cada tipo de servicio, considerando tanto los recursos disponibles como los requisitos de calidad de servicio.

5.1. Algoritmo

En este capítulo, se presenta un algoritmo denominado Algoritmo de Asignación de Recursos diseñado para distribuir eficientemente los recursos físicos en una red que comprende tanto un segmento de red privada como un segmento público. El objetivo principal es planificar la asignación de recursos radio a los slices existentes, URLLC o eMBB, en función de la probabilidad de bloqueo y el retardo calculados a partir del SINR de cada usuario.

El uso de la probabilidad de bloqueo B para el servicio proporcionado por el slice eMBB y la tasa de no cumplimiento TS para URLLC, como parámetros de calidad de servicio específicos para cada slice, los convierte en

variables críticas de decisión para este algoritmo. De esta manera, se busca minimizar el valor de estos parámetros para los slices mediante la asignación de recursos, hasta alcanzar los valores objetivos TS_{limit} y B_{limit} .

El algoritmo se divide en dos partes principales. La primera se centra en el reparto de los recursos radio disponibles de la red privada a los slices. La segunda parte, en caso de que los recursos de la red privada no sean suficientes para alcanzar los objetivos de calidad de servicio, procede a la asignación de los recursos disponibles en la red pública.

5.1.1. Comparación de criterios de planificación

Dado que los criterios de decisión, la probabilidad de bloqueo y la tasa de no cumplimiento, poseen naturalezas distintas y tasas de decrecimiento diferentes, resulta fundamental normalizar ambos parámetros en relación a los umbrales de valores establecidos para cumplir SLA. Esta normalización posibilita la comparación directa entre los valores de ambos criterios y, en última instancia, facilita la toma de decisiones con respecto a la asignación de recursos. Por ello se calcula el ratio de probabilidad de bloqueo RPB y el ratio de tasa de no cumplimiento RTS .

En el caso de la probabilidad de bloqueo, la normalización se lleva a cabo de la siguiente manera:

$$RPB = \frac{\text{Probabilidad de bloqueo}}{\text{Valor umbral probabilidad de bloqueo}} \quad (5.1)$$

Por otro lado, en el contexto de la tasa de no cumplimiento, la normalización se expresa de la siguiente manera:

$$RTS = \frac{\text{Tasa no cumplimiento}}{\text{Valor umbral tasa no cumplimiento}} \quad (5.2)$$

La normalización de estos criterios es esencial para un análisis más equitativo y claro de su desempeño en relación a los umbrales predeterminados. Al expresarlos como razones o ratios con respecto a los umbrales, se crea un marco de referencia común que permite comparar y evaluar de manera efectiva el impacto de las decisiones de asignación de recursos en la red.

5.1.2. Planificación recursos red privada

La primera parte del algoritmo se compone de dos bucles anidados, como se muestra en la Figura 5.1. El primer bucle (flechas rojas) determina el número de iteraciones necesarias para lograr la convergencia de los resultados, mientras que el segundo bucle (flechas azules) recorre cada femtocelda individualmente para asignar recursos a los slices presentes.

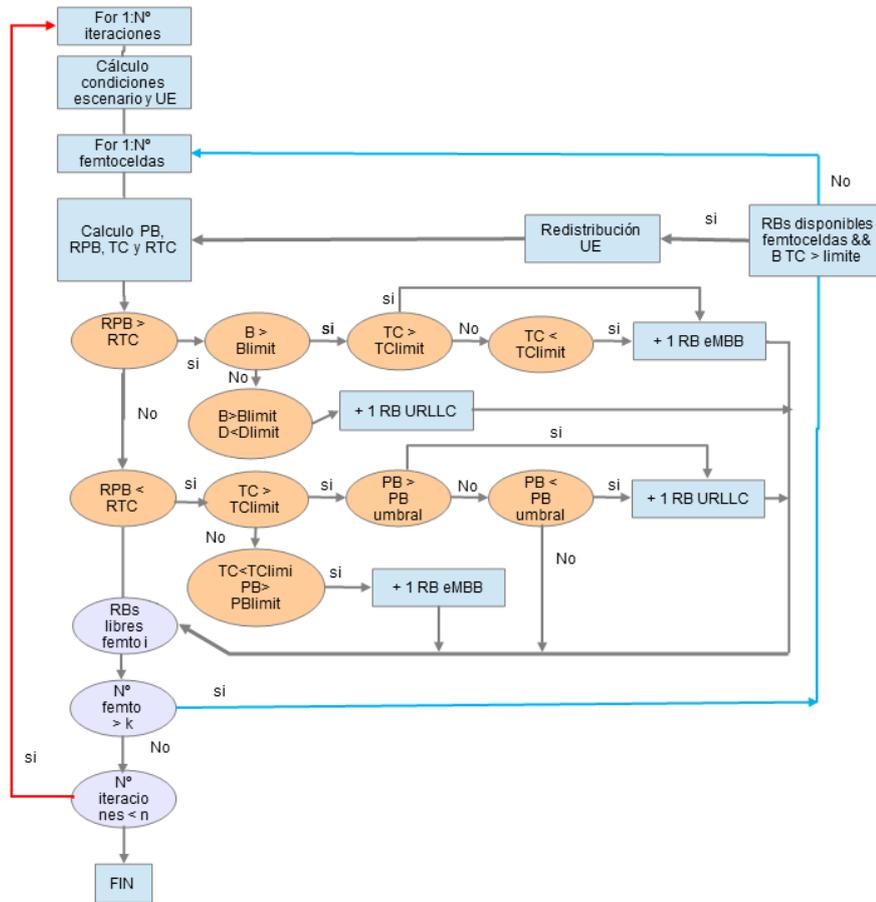


Figura 5.1: algoritmo asignación RB femtocelda

A continuación, se llevará a cabo una iteración completa a modo de ejemplo para ilustrar el funcionamiento de esta sección del algoritmo:

1. **Inicio de la primera iteración del primer bucle (flechas rojas):** En esta etapa, se calculan las condiciones del escenario y se analizan los UE presentes en él. Se realiza un mapeo de todos los UEs, revisando los recursos asignados por cada femtocelda a cada UE y SINR percibida por cada uno de ellos se selecciona la femtocelda que dará servicio a cada UE en función del mayor SINR aportado.
2. **Entrada en el segundo bucle (flechas azules):** En esta fase, se selecciona la primera femtocelda disponible. Si dicha femtocelda tiene recursos disponibles, se procede a calcular los parámetros de decisión cruciales, tales como B , TC , RPB y RTC . Se inicia la asignación de recursos eligiendo la cantidad mínima entre RTC y RPB , siempre

y cuando el valor del parámetro de decisión no sea menor o igual al objetivo establecido. Cada vez que se asigna un recurso se recalculan los parámetros y para la toma de decisión de a que slice servir el próximo RB. Una vez finalizada la asignación de recursos de la femtocelda se repite todo el proceso para las femtoceldas restantes.

3. **Optimización de femtoceldas no cumplidas:** Una vez finalizado el proceso para todas las femtoceldas, se identifican aquellas femtoceldas cuyos parámetros no han alcanzado los objetivos predefinidos. Para estas femtoceldas, se procede a reasignar los UEs que hayan tenido recursos insuficientes. Estos UEs se asignan a la femtocelda con recursos disponibles que ofrezca la mayor SINR al UE, en caso de ser posible. Cierre del segundo bucle.
4. **Nueva iteración del primer bucle:** Se inicia una nueva iteración del primer bucle, recalculando las condiciones del escenario. Este proceso se repite de manera iterativa hasta que se alcance una estabilización en los resultados, tanto en el número de recursos asignados por las femtoceldas como en los valores de los parámetros B , TC , RPB y RTC .

Antes de cada iteración que recorre toda la red privada, se calculan las condiciones del escenario. Estas condiciones se derivan de los recursos asignados a cada slice en cada gNB, lo que permite distinguir la asignación de recursos en función de slice y nodo. Esto incluye calcular la SINR para cada usuario en relación al nodo que le proporcionará cobertura, considerando factores como interferencia de las celdas vecinas y potencia de transmisión.

Una vez que se han calculado las condiciones radio del escenario, se procede a recorrer cada nodo de la red privada. Dentro de cada nodo i , se realizan los siguientes cálculos:

- Cálculo de la tasa de no cumplimiento (TC)4.14.
- Cálculo del ratio de tasa de no cumplimiento (RTC).
- Cálculo de la probabilidad de bloqueo (B)4.12.
- Cálculo del ratio de probabilidad de bloqueo (RTB).

Con estos parámetros de decisión calculados, se procede a asignar Physical Resource Blocks (PRBs) al slice correspondiente si hay recursos disponibles en el nodo. Este proceso de cálculo de parámetros de decisión, toma de decisión y asignación de recursos se repite hasta que el nodo quede sin recursos disponibles o se llegue a los requisitos de calidad. Esto es llevado a cabo para todos las femtoceldas.

El proceso ejecutado por el primer bucle (representado por las flechas rojas) es crucial debido a que cada asignación de recursos radio a un slice en una femtocelda provoca interferencia con las femtoceldas adyacentes, lo que, a su vez, altera SINR percibida por los UEs. Por consiguiente, cada vez que una femtocelda modifica la cantidad de recursos asignados a un slice, se origina una variación en la SINR percibida, lo que afecta directamente al retardo experimentado y a la probabilidad de bloqueo, como se vio en las secciones 4.3.1 y 4.3.2, respectivamente.

En el marco del segundo bucle (indicado por las flechas azules), una vez se han asignado todos los recursos disponibles de las femtocelda, y considerando que esta podría haber dejado de asignar recursos a un slice debido a que los valores de B o TC han alcanzado sus objetivos, se procede a examinar todas las femtoceldas en busca de dos situaciones. En primer lugar, se identifican aquellas femtoceldas que no han logrado asignar recursos suficientes a algún slice. Por otro lado, se ubican las femtoceldas que aún disponen de recursos sin asignar. En este contexto, se realiza un mapeo de todos los UEs que han quedado fuera del servicio originalmente proporcionado por el slice, y que en consecuencia han sido asignados a una femtocelda con recursos libres. Dentro de las femtoceldas con recursos disponibles, se selecciona aquella que aporte la SINR más alta al UE en cuestión.

5.1.3. Planificación recursos red pública

En la segunda parte del algoritmo se pretende dotar de recursos necesarios al slice correspondiente cuyos recursos asignados en la red privada sean insuficientes para alcanzar valores objetivo de los requisitos que se ha fijado la industria que quiere desplegar estos servicios. Estos recursos provienen de la red pública tal y como muestra la figura 5.2 se pretende realizar una planificación de dichos recursos entre los diferentes slices.

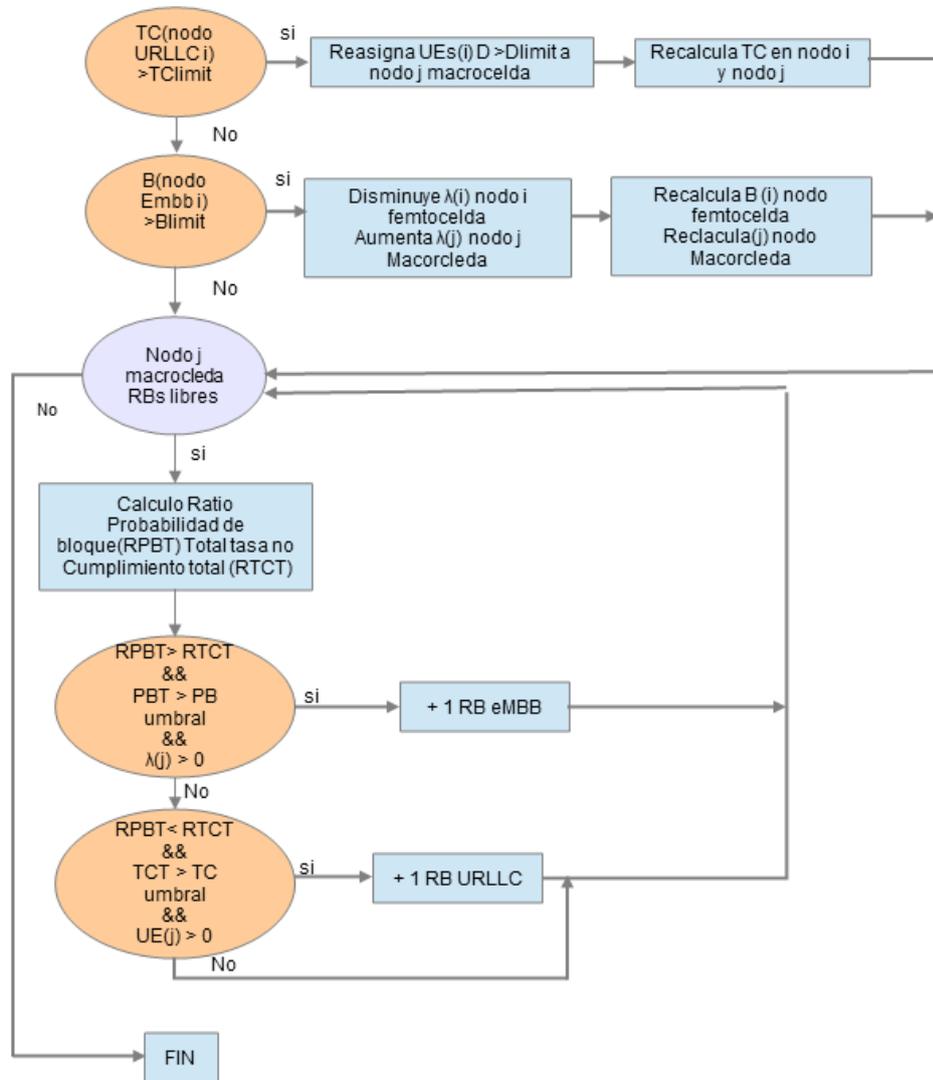


Figura 5.2: algoritmo asignación RB femtocelda

Es fundamental destacar que en este nivel se evalúan los parámetros de calidad, como la probabilidad de bloqueo y la tasa de no cumplimiento. En lugar de hacerlo por femtocelda de manera individual, se considerará a todas las femtoceldas y macroceldas como una entidad única que denominaremos "red". Para este propósito, se definen nuevos parámetros de calidad de servicio, a saber, la probabilidad de bloqueo total (BT) y la tasa de no cumplimiento total (TCT).

$$TCT = \frac{\text{Número de UEs no cumplidores totales}}{\text{Número total de UEs}} \quad (5.3)$$

En el análisis de algunas métricas relacionadas con el algoritmo de planificación, se utiliza este modelo con ciertas modificaciones. En este contexto, los términos “Número de UEs no cumplidores” y “Número total de UEs” se refieren a los UEs totales presentes en el escenario de URLLC.

$$BT = \sum_{n=1}^{n_{\text{celdas}}} \text{Prob}_n + Bn \quad (5.4)$$

Para el cálculo de la probabilidad de bloqueo total, se define Prob_n como la probabilidad de que un UE sea servido por una celda específica 5.4.

De manera similar a la parte de asignación de recursos en la red privada, a continuación se resumirá el proceso de una iteración en esta sección del algoritmo.

1. **Detección y reasignación de tráfico:** En esta etapa, se revisan todos los UEs en el escenario, tanto los servidos por eMBB como los de URLLC. Se seleccionan aquellos casos en los que la red privada no dispone de recursos suficientes para cumplir con los requisitos de calidad establecidos. Estos UEs se reasignan a la macrocelda, y se recalculan los requisitos para los UEs restantes. Esto se explicará con más detalle a continuación.
2. **Entrada al bucle de asignación de recursos:** En esta fase, se procede a asignar recursos de la macrocelda en caso de disponibilidad, y se calculan los parámetros de calidad asociados al nuevo tráfico asignado a la macrocelda.
3. **Toma de decisiones:** En este paso, se comienza la asignación de recursos disponibles. Se distribuyen los recursos (PRBs) entre los dos slices asignados, privilegiando al slice con el mayor ratio. Después de cada asignación, se recalculan los valores de los parámetros de calidad.
4. **Finalización:** El paso anterior se repite hasta que se cumplan dos condiciones posibles: se alcancen los parámetros de calidad establecidos, o se agoten los recursos disponibles en la macrocelda.

En resumen, el Algoritmo de asignación de recursos busca optimizar la distribución de recursos radio y minimizar los parámetros de calidad para cumplir con los requisitos establecidos entre los diferentes slices. Este proceso tiene como objetivo alcanzar un equilibrio eficiente en la asignación de recursos y garantizar la calidad de servicio deseada en la red privada.

Detección y reasignación de tráfico URLLC

Para el slice URLLC, el algoritmo verifica la tasa de no cumplimiento en cada nodo. Si se identifica una tasa de no cumplimiento que supere el umbral, se examinan individualmente los UEs en busca de aquellos cuyo retardo no cumple el SLA debido a recursos insuficientes.

Los UEs identificados se reasignan al nodo de la red pública, lo que implica recalcular las condiciones de escenario radio, incluida la SINR. Luego, se recalculan las tasas de no cumplimiento tanto para los nodos de la red privada como para los de la red pública. Este proceso se repite hasta que las tasas de no cumplimiento en los nodos de la red privada cumplan con los requisitos de calidad.

Es importante destacar que, en esta etapa, la tasa de no cumplimiento para el slice en el nodo de la red pública estará por encima del umbral, ya que aún no se han asignado recursos al mismo.

Detección y reasignación de tráfico eMBB

En el caso del slice eMBB, se analizan los nodos de la red privada que no cumplen con los estándares establecidos, particularmente aquellos con una probabilidad de bloqueo superior al umbral. Si se identifican tales nodos, se disminuye la tasa de solicitud de sesión (λ_i) en la red privada y se incrementa en la misma cantidad en el nodo de la red pública (λ_j).

Este proceso se repite hasta que la probabilidad de bloqueo en los nodos de la red privada sea inferior al umbral especificado, garantizando así una mejora en el rendimiento de la red.

Capítulo 6

Resultados

6.1. Configuración experimental

Con el propósito de evaluar tanto el algoritmo de planificación de recursos como la integración de este en el simulador de red público-privada, junto con los modelos aplicados, se configura un escenario que nos permitirá examinar el funcionamiento de dicho algoritmo en detalle.

Considerando una extensa área equipada con macroceldas de tecnología 5G, se distribuyen 20 macroceldas en esta región geográfica, cada una proporcionando conectividad de radio mediante tecnología 5G. Cada macrocelda abarca un área de 200,000 metros cuadrados. Dentro de una de estas macroceldas se encuentra un área industrial en plena transformación hacia la Industria 4.0, con una extensión de 10,000 metros cuadrados. En esta área industrial se han instalado 4 puntos de acceso a redes 5G o femtoceldas, distribuidos como se muestra en la Figura 6.1.

Al implementar una solución de automatización basada en un sistema de control en bucle cerrado, se establecen requisitos de calidad de servicio para el tráfico generado por estos equipos de usuario (UEs). El concepto de URLLC en 5G permite la implementación de estos sistemas en el escenario presentado a través de la creación de un slice que cumple con los siguientes requisitos de calidad de servicio: un retardo de $D_u = 1$ ms y una disponibilidad de comunicación de datos del 99.999 %. En cuanto al tráfico del slice URLLC, se permite una probabilidad de error de 0.001 %, junto con una tasa de bits garantizada de 1.55 Mbps, un tamaño máximo de paquete de $\alpha = 2$ Kbits y una tasa de incumplimiento de $TC = 5$ %, alineándose con los requisitos industriales documentados en [43] y en la especificación 122.104 de 3GPP [44]. Además, el entorno industrial consta de 160 UEs destinados al slice URLLC.

Con respecto a las sesiones de datos del slice eMBB, se establece una tasa promedio de generación de sesiones de $\lambda = 20$, junto con una duración promedio de sesión de $1/\mu = 1$ milisegundo (ms). Se define una tasa de bits

58 6.2. Validación y evaluación de la herramienta de planificación.

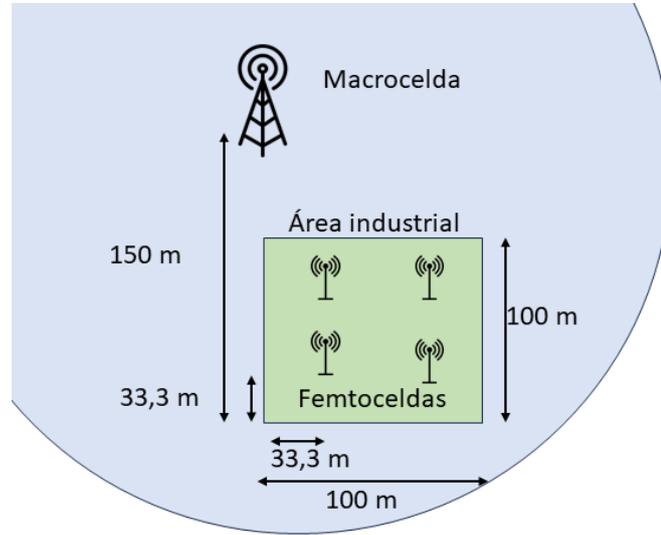


Figura 6.1: Distribución geográfica del escenario

garantizada (GRB) de 5 megabits por segundo (Mbps) y se establece un límite de probabilidad de bloqueo en $B_{limit} = 5\%$, según la especificación 126.928 de 3GPP [45] en la categoría de "XR conferencing". Esta elección se basa en las características del servicio, que principalmente involucrarán datos técnicos y comunicación con centros de datos.

Las estaciones base (gNBs) que conforman la red privada para las femtoceldas transmiten en una portadora centrada en 3.5 GHz, mientras que las macroceldas operan a 2.14 GHz.

Se dispone de un conjunto de 106 bloques de recursos físicos (RBs), con un ancho de banda de 20 MHz. El espaciado de subportadoras (SCS) es de 15 kHz, la duración promedio de un símbolo OFDM es de 66.67 microsegundos (μs) y se utiliza una numerología de 0. El tamaño del bloque de recursos $RGBsize$ es de 4, con un ancho de banda de 0.18 MHz asignado a cada RB por la gNB.

Para validar nuestro marco de trabajo y evaluar su rendimiento, utilizamos un simulador basado en MATLAB que se ejecutó en un entorno computacional con 16 GB de RAM y un procesador AMD Ryzen 5 5600G a 4.40 GHz.

6.2. Validación y evaluación de la herramienta de planificación.

En esta sección exponemos los resultados de la evaluación del algoritmo de la planificación de recursos en ambientes tanto de red privada como pública. Hemos analizado en detalle el comportamiento del algoritmo en respuesta

a los slices eMBB y URLLC. Nuestra investigación abarca la planificación de recursos, la evolución de parámetros críticos que influyen en la toma de decisiones, y el tiempo de ejecución del algoritmo en diferentes contextos.

Asimismo, hemos realizado una evaluación considerando diversas configuraciones del planificador. Los resultados obtenidos contribuyen al análisis en profundidad de la eficacia y adaptabilidad de nuestro algoritmo de planificación de recursos en diferentes contextos de red.

6.2.1. Evaluación red privada

A continuación, se presentan los resultados derivados de la evaluación del algoritmo operativo en el contexto de la red privada. Dentro de esta red, el algoritmo se encarga de asignar recursos basándose en los ratios calculados para cada slice. Tras concluir la primera asignación de recursos de las femtoceldas entre los diferentes slices, lo que denominaremos iteración, procedemos a recalculamos las distribuciones de la SINR en el escenario. Este proceso se repite hasta un máximo de 20 iteraciones, durante las cuales los valores de los recursos asignados y las distribuciones de SINR tienden a estabilizarse, volviéndose constantes o cíclicos en este punto.

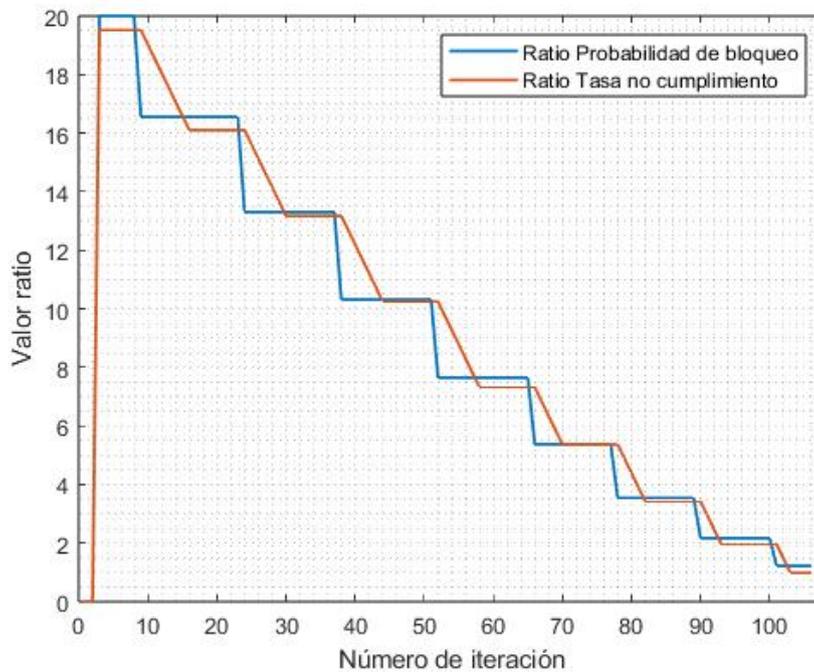


Figura 6.2: Evolución ratios primera iteración femtocelda 1

60 6.2. Validación y evaluación de la herramienta de planificación.

En la Figura 6.2 se muestra la evolución de los ratios durante la primera iteración en la femtocelda número 1. Cada vez que se asigna un RB a un slice, ambos ratios son recalculados y, en consecuencia, se selecciona el slice cuyo ratio tiene el valor más alto para asignar el siguiente RB disponible. Se puede observar cómo el ratio de probabilidad de bloqueo, que representa al slice eMBB frente al ratio de tasa de no cumplimiento para URLLC, es más sensible a la asignación de recursos. Al asignarle recursos, el valor de este ratio disminuye de manera más abrupta, mientras que en el caso del slice URLLC, esta disminución se da de manera más gradual, lo que indica que se requiere un mayor número de recursos para disminuir en la misma medida que el ratio de probabilidad de bloqueo.

En la Figura 6.3, se presenta la asignación de RBs en los nodos de la red privada a lo largo de 20 iteraciones. Es notorio que, a partir de la octava iteración, los valores se estabilizan. Esta tendencia se debe a que en las primeras ocho iteraciones, la asignación de recursos en las femtoceldas genera interferencias entre ellas, provocando una redistribución en los valores de la SINR. Se observa que dicho comportamiento se repite en los resultados posteriores.

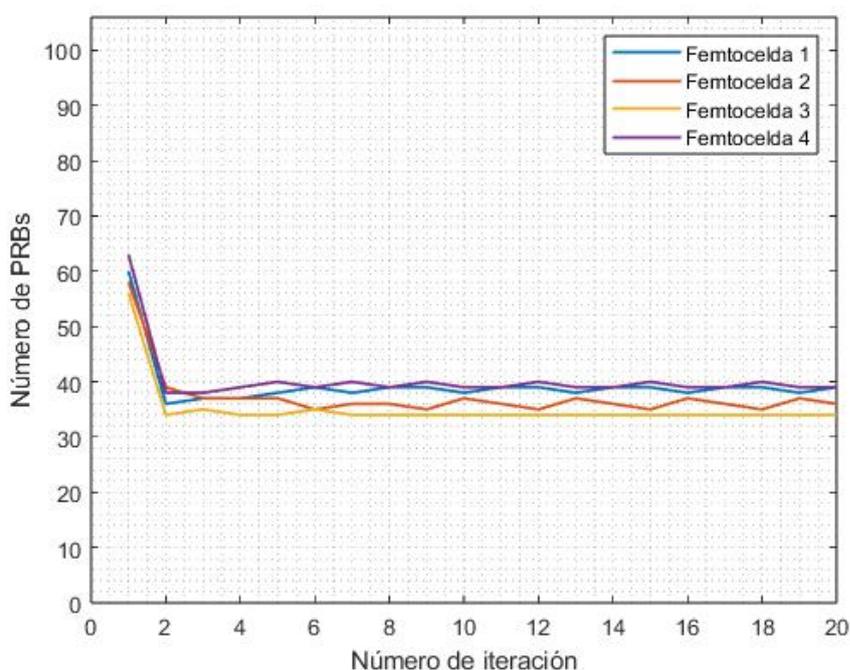


Figura 6.3: Evolución recursos asignados en nodos red privada en slice eMBB

Se destacan distintas asignaciones de RBs entre los diversos nodos, un

fenómeno que se alinea con la naturaleza de los UEs pertenecientes al slice eMBB . Además, este comportamiento es influido por el modelo empleado para simular el escenario y sus características particulares. Tal modelo engloba el patrón probabilístico asociado a la aparición de solicitudes de inicio de sesión y la disposición geográfica de los UEs en el entorno.

En la figura 6.4 se observa de la asignación de RBs pero en este caso para el slice URLLC para cada nodo. En este caso la naturaleza de las conexión de los UEs clientes del servicio proporcionado por el slice URLLC la conexión de dichos UEs se mantiene constante en el tiempo y en el espacio.

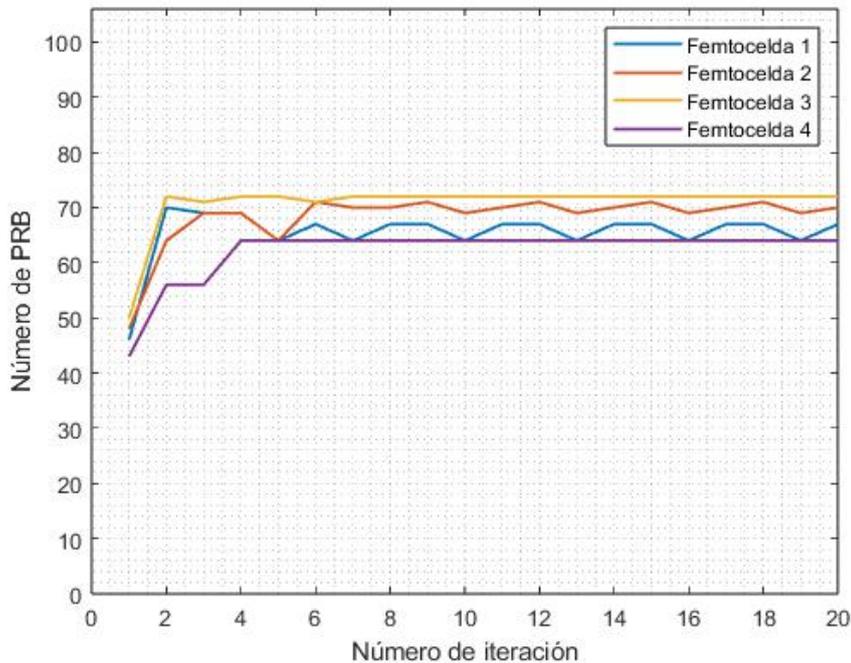


Figura 6.4: Evolución recursos asignados en nodos red privada en Slice URLLC

Al comparar las figuras 6.3 y 6.4, se observa de manera general que el slice URLLC se le asignan mas recursos que a eMBB. También se observa que la femtocelda con más recursos asignados al slice URLLC es la que menos recursos le asigna al slice eMBB debido a limitación de RBs disponibles (106 RBs). La naturaleza de los UEs del slice eMBB condiciona parcialmente la asignación del nodo que brindará cobertura a los UEs del Slice URLLC. Los modelos presentados en el capítulo 4 consideran que los UEs serán servidos por la celda que les proporciona mayor SINR, parámetro sensible a la ubicación del UE con respecto al nodo, la potencia recibida y la interferencia con

62 6.2. Validación y evaluación de la herramienta de planificación.

el resto de los nodos.

La Figura 6.5 presenta el número total de RBs asignados en la red privada para los cuatro nodos durante 20 iteraciones. En este escenario de estudio, cada nodo dispone de 106 RBs, lo que sumaría un total de 424 RBs en toda la red privada. Sin embargo, la figura muestra que estos recursos están siendo asignados en su totalidad, lo que evidencia que la cantidad total de recursos resulta insuficiente para satisfacer la demanda establecida por lo tanto requiere el uso de recursos de la red pública.

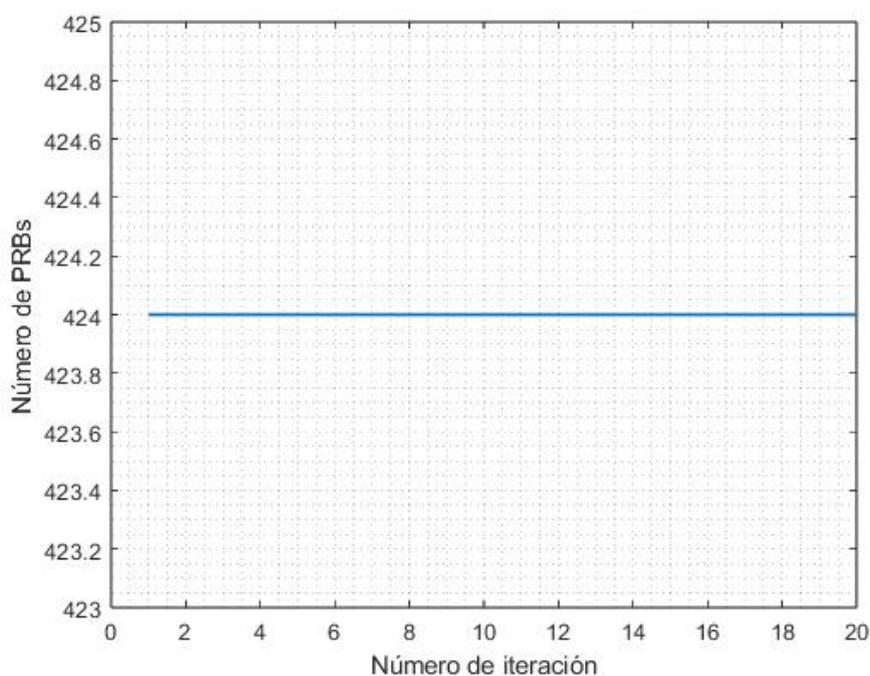


Figura 6.5: Evolución recursos totales asignados en nodos red privada

La Figura 6.6 muestra los valores de probabilidad de bloqueo correspondientes a cada nodo a lo largo de las iteraciones. Se observa que, exceptuando la femtocelda número cuatro, las restantes femtoceldas muestran una probabilidad de bloqueo que excede el umbral establecido. Esto pone de manifiesto la insuficiencia de recursos en la red privada para hacer frente a la demanda establecida por el slice eMBB.

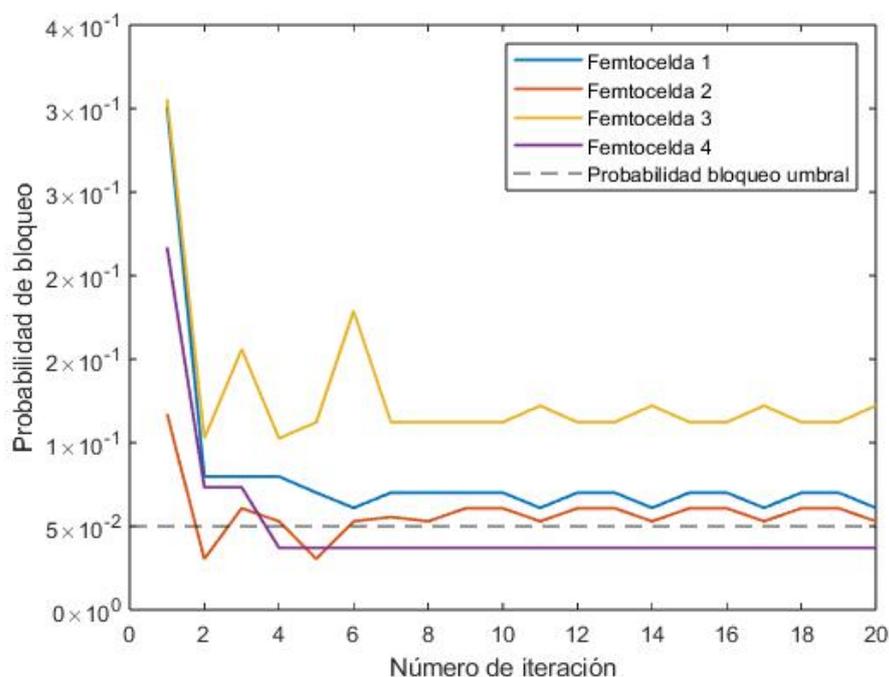


Figura 6.6: Evolución en probabilidad de bloqueo nodos red privada

La Figura 6.7 presenta la evolución de la tasa de no cumplimiento de los nodos dentro de la red privada en las primeras 20 iteraciones. Dentro de este escenario de estudio, se observa que en la femtocelda 2 y 3, la tasa de incumplimiento supera el umbral definido. Este hallazgo refleja que la red privada no cuenta con recursos suficientes para atender la demanda del slice URLLC.

A partir del análisis de las Figuras 6.6 y 6.7, se llega a la conclusión de que los recursos asignados a la red privada han resultado insuficientes para satisfacer simultáneamente las demandas de los slices eMBB y URLLC. En vista de esta situación, surge la necesidad de obtener recursos adicionales de un agente externo, en este caso, una red pública. Esta dinámica resalta el enfoque central de este informe, que se centra en la compartición de recursos en un escenario que involucra redes públicas y privadas. En particular, se busca abordar la coexistencia de servicios de naturaleza diversa en el entorno 5G NR mediante la tecnología de network slicing, la cual se aplica a los servicios eMBB y URLLC.

64 6.2. Validación y evaluación de la herramienta de planificación.

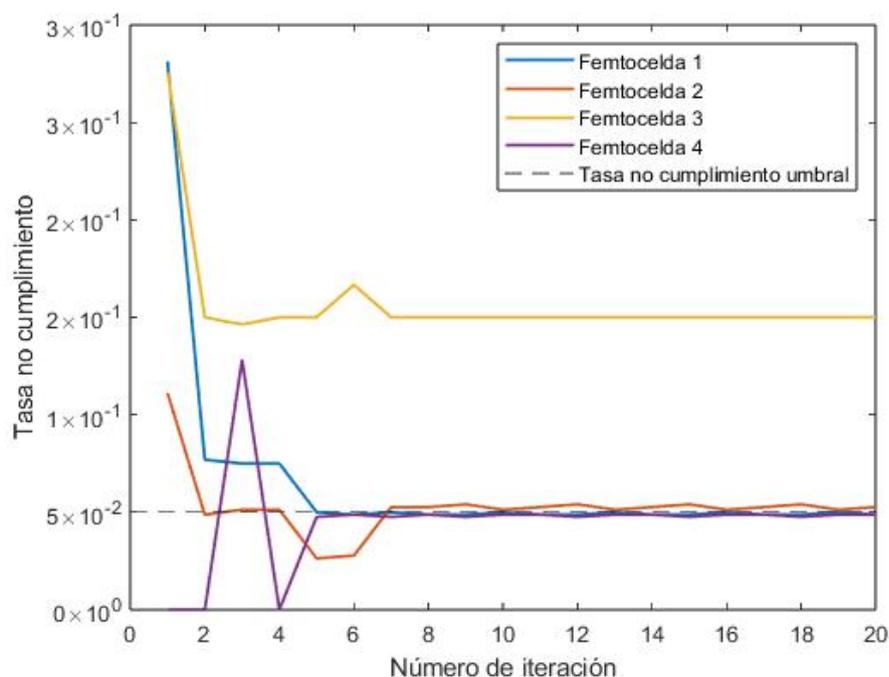


Figura 6.7: Evolución en tasa no cumplimiento nodos red privada

6.2.2. Evaluación red pública

En esta sección, se presentarán los resultados del algoritmo cuando los recursos establecidos en la red privada resultan insuficientes para satisfacer la demanda de servicios requeridos por los UEs en el área industrial. En consecuencia, es necesario aumentar los recursos disponibles de tal forma que junto a los recursos de la red privada la red pública comparte sus recursos.

Tal y como se ha visto en la sección anterior hay femtoceldas donde los recursos no son suficientes para que los UEs servidos por los slice eMBB y URLLC alcancen los requisitos de calidad de servicios o dicho de otro modo que no alcancen los valores umbrales para probabilidad de bloqueo y la tasa de no cumplimiento para un retardo de 0.001 segundos. Para ello el algoritmo reajusta la demanda de tráfico reasignando el tráfico que no puede ser atendido por falta de recursos en la red privada hacia la red pública como se especifica en el capítulo 5.

Centrándonos en el slice URLLC, nos enfocaremos en los UEs que son servidos por el slice URLLC que no disponen de recursos suficientes para alcanzar los requisitos de calidad de servicio de conexión.

| | Femtocelda 2 | | Femtocelda 3 | |
|----------------------|--------------|-------------|--------------|-------------|
| | Red privada | Red pública | Red privada | Red pública |
| Tasa no cumplimiento | 0.0526 | 0.0488 | 0.1500 | 0.0442 |
| UEs | 38 | 36 | 39 | 34 |
| RBs | 36 | – | 33 | – |

Tabla 6.1: Evolución femtoceldas redistribución de tráfico slice URLLC

En la Tabla 6.1, se refleja la redistribución del tráfico en el caso de las UEs para el slice URLLC en las femtoceldas 2 y 3. En la última iteración de asignación de recursos de la red privada, ambas femtoceldas presentan valores de tasa de no cumplimiento por debajo del umbral establecido: 0.0526 y 0.1500, con un total de 38 y 39 UEs respectivamente. En este punto, el algoritmo reduce la cantidad de UEs en cada femtocelda hasta que su tasa de incumplimiento se encuentra por debajo del umbral, tal como se muestra en la columna denominada "Red pública". En esta columna, se obtienen valores de 0.0488 y 0.0442 para las tasas de incumplimiento, y se reduce el número de UEs a 36 y 34 respectivamente.

Se observa que la reducción de UEs no sigue la misma proporción para ambas femtoceldas. Esta disparidad se debe a las diferencias en la señal de interferencia recibida por cada femtocelda, lo que a su vez influye en la distribución SINR y, por ende, en la eficiencia de cada RB.

| | Femtocelda 1 | | Femtocelda 2 | |
|---|--------------|-------------|--------------|-------------|
| | Red privada | Red pública | Red privada | Red pública |
| Probabilidad de bloqueo | 0.0609 | 0.0475 | 0.0529 | 0.0475 |
| Promedio solicitud inicio de sesión λ | 4.8 | 4.5 | 4 | 3.9 |
| RBs | 67 | – | 70 | – |

Tabla 6.2: Evolución femtoceldas redistribución de tráfico slice eMBB

| | Femtocelda 3 | |
|---|--------------|-------------|
| | Red privada | Red pública |
| Probabilidad de bloqueo | 0.1221 | 0.0475 |
| Promedio solicitud inicio de sesión λ | 7 | 5.3 |
| RBs | 72 | – |

Tabla 6.3: Evolución femtoceldas redistribución de tráfico slice eMBB

En las Tablas 6.2 y 6.3 se representa la reasignación de tráfico para las femtoceldas que carecen de recursos suficientes para atender al slice eMBB. Como se puede observar, las femtoceldas 1, 2 y 3 presentan una probabilidad de bloqueo superior al umbral establecido (recordemos 0.05). El algoritmo resuelve este problema reduciendo las solicitudes de inicio de sesión en cada femtocelda y redistribuyéndolas hacia la macrocelda. En este sentido, se evidencia que las solicitudes disminuyen de 4.8 a 4.5 solicitudes por segundo

66 6.2. Validación y evaluación de la herramienta de planificación.

en el caso de la primera femtocelda, de 4 a 3.9 solicitudes por segundo en la segunda femtocelda y de 7 a 5.3 solicitudes por segundo en la tercera femtocelda. Esta redistribución tiene como resultado una disminución en el valor de la probabilidad de bloqueo.

En este contexto es necesario el aporte de recursos extra a los slice eMBB y URLLC ya que los recursos de la red privada no han sido suficiente. Una vez detectadas las femtoceldas que carecen de recursos se reasigna el tráfico para el que no se dispone de dichos recursos hacia la macrocelda. A continuación se exponen los recursos aportados por la macrocelda:

| Parámetro | Macrocelda | Valores totales |
|--|------------|-----------------|
| Tasa de no cumplimiento | 0 | 0.0125 |
| Probabilidad de bloqueo | 0.0393 | 0.0444 |
| Promedio solicitud inicio sesión λ | 2.10 | – |
| Numero UEs slice URLLC | 7 | – |
| RBs slice eMBB | 68 | 344 |
| RBs slice URLLC | 7 | 155 |
| RBs totales | 75 | 499 |

Tabla 6.4: Valores de análisis de recursos aportados por red pública y valores totales

La tabla 6.4 refleja los datos de los recursos compartidos por la red pública desde su macrocelda a los slices implementados en nuestro escenario. En la columna titulada "Valores totales" se reflejan los valores promedio y totales del escenario al sumar los recursos de la red pública a los de la red privada calculando estos como si fuera una entidad única compuesta por una macrocelda y cuatro femtoceldas.

Una vez reasignado el tráfico siendo 7 UEs del slice URLLC y un promedio de $\lambda=2.10$ solicitudes/segundo a la macrocelda el algoritmo asigna recursos hasta conseguir que la tasa de no cumplimiento y la probabilidad de bloqueo de la macrocelda sean menores a los valores umbrales, respectivamente alcanzan unos valores de 0 y 0.393 para lo que la macrocelda ha aportado 7 RBs para URLLC y 68 RBs para eMBB un total de 75 RBs.

Tratando el conjunto de de la femtoceldas y la macrocelda como una entidad única simplemente diferenciado en los dos slice implementados URLLC y eMBB, para satisfacer la demandas de estos slices se ha necesitado un total de 499 RBs de los cuales 344 han sido utilizados por eMBB y 155 por URLLC. Con estos recursos se logra cumplir los requisitos de calidad impuestos por las variables de tasa de no cumplimiento umbral para un retardo de 1 microsegundo y una probabilidad de bloqueo umbral de 0.05 obteniendo unos valores de 0.0125 y 0.0444.

6.3. Evaluación de diferentes configuraciones del planificador

En esta sección, se presentarán los resultados del algoritmo para varias configuraciones de RAN. Se mantendrán todos los parámetros del escenario, como el número de UEs para el slice URLLC y las frecuencias de solicitud de inicio de sesión para UEs del slice eMBB, así como el número de nodos tanto en la red privada como en la pública, y el tamaño del área industrial.

Este enfoque nos permitirá, por un lado, observar el comportamiento del algoritmo en diferentes tamaños de recursos y, por otro lado, identificar las opciones más interesantes para aplicar en el entorno industrial en desarrollo, con el fin de dotarlo de conectividad 5G.

Al evaluar diversas configuraciones de la RAN, podremos obtener una visión más amplia del rendimiento del algoritmo en escenarios variados. Será posible analizar cómo responde a diferentes capacidades de recursos y tamaños de red, y determinar cuáles son las configuraciones más eficientes y adecuadas para la implementación en entornos industriales.

6.3.1. Selección de tamaño bloques de recursos

Durante todo el análisis del algoritmo de optimización de recursos, se han mantenido las mismas premisas para la configuración de la Red de acceso radio (RAN) en las celdas del escenario.

| Parámetro | Valor |
|-------------------------------|-------|
| Numerología | 0 |
| Espacio subportadora (KHz) | 15 |
| Duración de símbolo OFDM (us) | 66.67 |

Tabla 6.5: Parámetros totales red privada

En la Tabla 6.5, se muestran los parámetros que se mantendrán constantes de la red privada utilizados durante la evaluación del algoritmo. Estos parámetros incluyen la numerología, el espacio de subportadora (KHz) y la duración del símbolo OFDM (microsegundos).

Bajo esta configuración de parámetros, se han seleccionado distintos tamaños de ancho de transmisión de portadora (Bandwidth Carrier - BWC), lo que ofrece conjuntos de bloques de recursos de diferentes tamaños. Estos tamaños de bloque de recursos se presentan en la Tabla 6.6, donde se muestra el número de RBs para cada tamaño de BWC evaluado.

| BWC (MHz) | Número RBs |
|-----------|------------|
| 10 | 52 |
| 15 | 79 |
| 20 | 106 |
| 30 | 160 |

Tabla 6.6: Tamaños máximo bloque de recursos según el ancho de banda de transmisión de portadora [10]

Estos tamaños de bloque de recursos serán aplicados de igual forma en todos los nodos del escenario, tanto los pertenecientes a la red privada como a la red pública, y de igual manera para los dos tipos de slices considerados.

6.3.2. Resultados algoritmos con distintos tamaño de bloque de recursos

En esta sección se presentan los resultados obtenidos por el algoritmo al aplicar diferentes anchos de banda de la portadora, lo que proporciona conocimiento sobre el comportamiento del algoritmo y los costos en términos de recursos radio para el escenario planteado.

Para evaluar los recursos utilizados en cada configuración, se utilizará la proporción de recursos utilizados respecto a los recursos disponibles según la siguiente ecuación:

$$Proporcion\ recursos\ utilizados = \frac{Recursos\ utilizados}{Recursos\ disponibles\ en\ la\ celda} \quad (6.1)$$

A continuación, se muestra la razón de los recursos utilizados por red. En relación a la red privada, se considera recurso de la celda al conjunto de recursos tanto disponibles como consumidos en las cuatro celdas del área industrial. En el caso de la red pública, se considera el conjunto de recursos disponibles como los recursos proporcionados por la macrocelda.

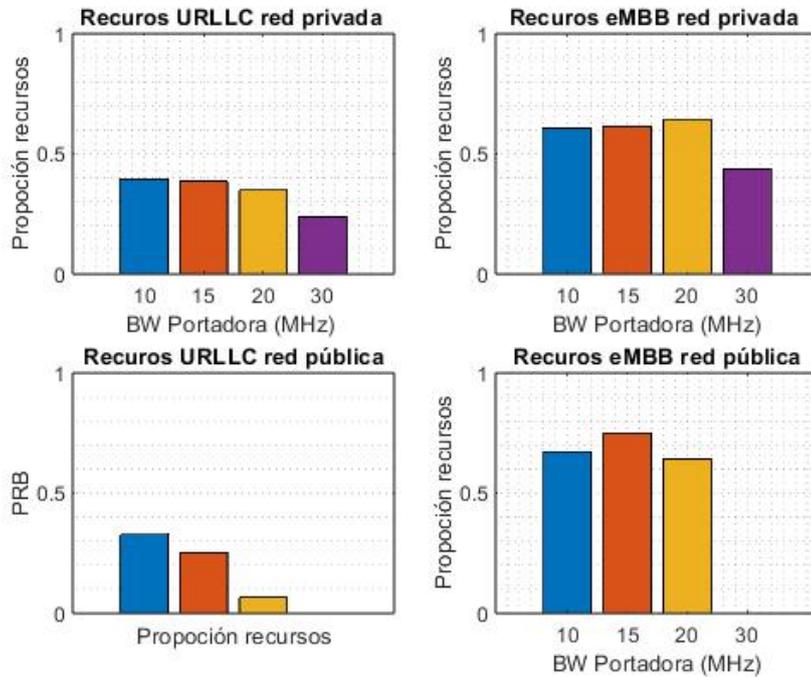


Figura 6.8: RBs consumidos por cada slice en cada red

Como se muestra en la figura 6.8, el slice eMBB requiere un aporte de recursos mayor que URLLC para cumplir los requisitos de calidad de servicio. En las tres primeras configuraciones (10 MHz, 15 MHz y 20 MHz), los recursos de la red privada son insuficientes, lo que hace necesario un aporte de recursos de la macrocelda de la red pública. De manera similar al caso de la red privada, se requiere una mayor proporción de recursos para el slice eMBB.

La figura 6.9 muestra la razón de recursos totales consumidos. En primer lugar, se muestra respecto al total de recursos de la red privada, incluyendo las cuatro femtoceldas, y en segundo lugar, añadiendo al total de la red privada los recursos de la red pública, tanto usados como disponibles. Para las dos primeras configuraciones con un ancho de banda de celda de 10 MHz y 15 MHz, se consumen todos los recursos disponibles de ambas redes. En la tercera configuración con un ancho de banda de celda de 20 MHz, ya se analizó en detalle en la sección 6.2.1. En el caso de la configuración con un ancho de banda de celda de 30 MHz, se observa que no es necesario el uso de recursos aportados por la red pública, siendo suficientes los aportados por la red privada.

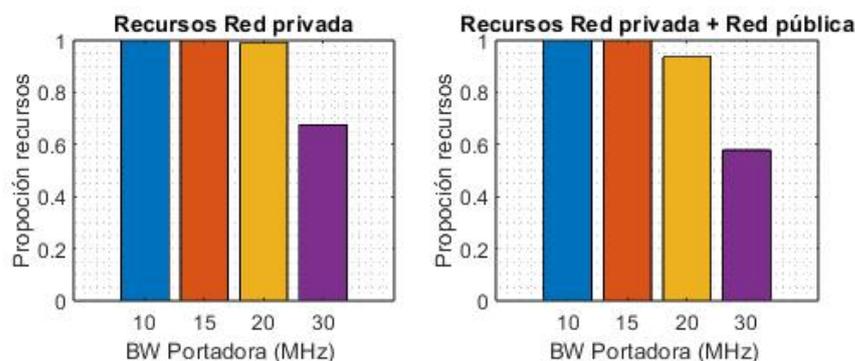


Figura 6.9: Razón de recursos totales utilizados

La asignación de recursos llevada a cabo por el algoritmo se hace perceptible y controlada a través de los parámetros de control establecidos, es decir, la Probabilidad de Bloqueo y la Tasa de No Cumplimiento. A continuación, se presentan los resultados de dichos parámetros tras la última asignación realizada. Los resultados que se exponen en la siguiente figura corresponden tanto a la red privada como a los parámetros totales, considerando las femtoceldas como una entidad única, antes de que se produzca la reasignación de tráfico a la macrocelda. En las figuras inferiores se ilustra el valor de los parámetros medidos cuando a los recursos de la red privada se les suman los recursos disponibles en la red pública.

En la figura 6.10, se muestra con una línea horizontal negra discontinua los valores umbrales de 0.05 tanto para la Tasa de No Cumplimiento como para la Probabilidad de Bloqueo. Para las configuraciones con anchos de banda de 10 y 15 MHz, tanto para eMBB como para URLLC, los parámetros de control se sitúan muy por encima de sus valores umbral, lo que evidencia la insuficiencia de recursos disponibles para dichas configuraciones, como se puede observar en la figura 6.9, donde se asignó el total de recursos disponibles y resultaron insuficientes. En el caso de la configuración con un ancho de banda de 20 MHz y un aporte de recursos desde la red pública, se logra que los valores de los parámetros de control se sitúen por debajo de los valores umbral, permitiendo cumplir con los requisitos de calidad de servicio. Por último, para la configuración de 30 MHz en ambos slices, se obtiene un valor inferior al umbral y, en conjunto con la información presentada en la figura 6.8, se observa que no ha sido necesario el aporte de recursos desde la red pública.

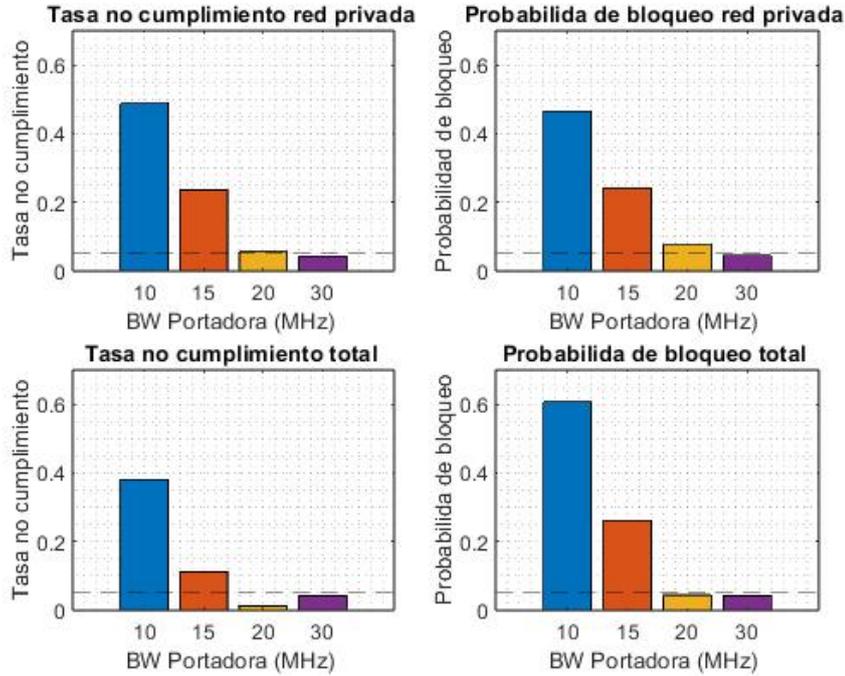


Figura 6.10: Valores totales de los parámetros de análisis

Los resultados expuestos en este capítulo demuestran la capacidad de planificación de recursos del algoritmo para evaluar la eficiencia de diversas configuraciones de la red de acceso radio en un escenario específico con requisitos de calidad.

6.4. Tiempo de ejecución

Por ultimo se presenta análisis de los tiempos de ejecución del algoritmo de planificación de recursos en redes privadas y públicas. Se abordará el estudio en dos contextos: la asignación de recursos en el ámbito de la red privada y en el ámbito de la red pública.

En la Figura 6.11, se muestra la evolución del tiempo de ejecución a lo largo de las iteraciones en la red privada para cuatro configuraciones distintas de ancho de banda establecidas. Se observa un comportamiento interesante: durante las primeras ocho iteraciones, el algoritmo requiere un tiempo de ejecución superior en comparación con las iteraciones posteriores. Este fenómeno se explica por el proceso de reasignación de tráfico de las femtoceldas con recursos insuficientes a las femtoceldas con recursos disponibles que aportan una mayor SINR a UE. Con el progreso de las iteraciones, la

asignación de recursos entre las femtoceldas se estabiliza, lo que conlleva una disminución en el tiempo de ejecución.

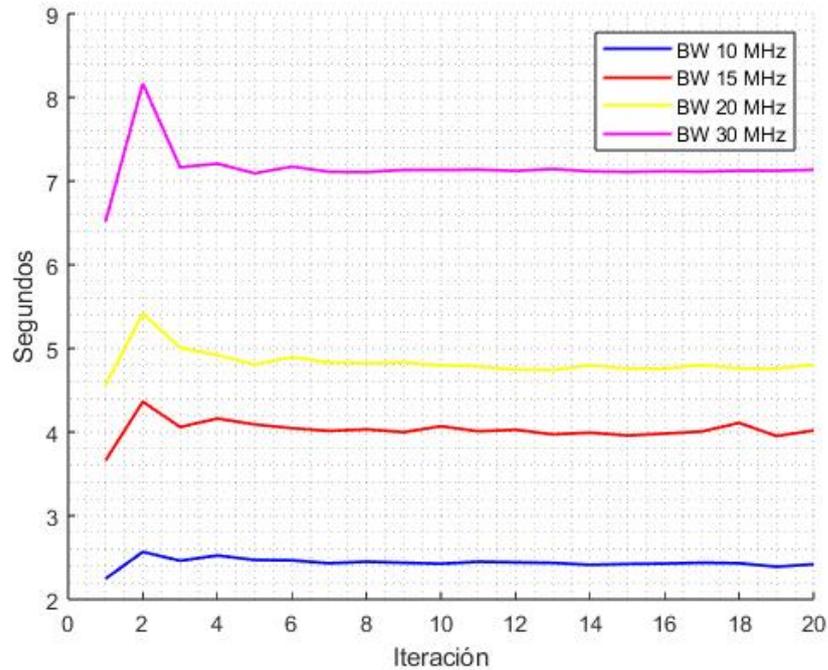


Figura 6.11: Evolución tiempo de ejecución iteraciones red privada

| Configuración BW | Tiempo medio | Varianza |
|------------------|--------------|----------|
| 10 MHz | 2.4366 s | 0.0036 |
| 15 MHz | 4.0250 s | 0.0157 |
| 20 MHz | 4.8295 s | 0.0264 |
| 30 MHz | 7.1512 s | 0.0767 |

Tabla 6.7: Tiempo medio y varianza de ejecución de algoritmo para adjudicación de recursos en red privada

En la Tabla 6.7, se presentan los tiempos medios por iteración y las varianzas de ejecución del algoritmo para la asignación de recursos en la red privada. Los resultados reflejan que los tiempos medios aumentan a medida que crecen los recursos disponibles para la asignación. Además, la varianza también aumenta con el incremento de recursos, atribuible a la dinámica de reasignación que realiza el algoritmo.

| Configuración BW | Tiempo ejecución |
|------------------|------------------|
| 10 MHz | 1 min 18.5 s |
| 15 MHz | 2 min 14.05 s |
| 20 MHz | 2 min 23.07 s |
| 30 MHz | 1 min 5 s |

Tabla 6.8: Tiempo ejecución de algoritmo para adjudicación de recursos en red pública

Por otro lado, en la Tabla 6.8, se detallan los tiempos de ejecución del algoritmo en la asignación de recursos en la red pública. Se aprecia una tendencia casi lineal en los tiempos de ejecución en función del número de recursos asignados por el algoritmo. En las tres primeras configuraciones de asignación, el tiempo aumenta con el número de recursos, sin embargo, en la última configuración, que requiere una menor cantidad de recursos, se observa un tiempo de ejecución más breve en comparación con configuraciones previas.

En conclusión, se deduce que los tiempos de ejecución del algoritmo de asignación de recursos varían según el contexto y la cantidad de recursos disponibles.

Capítulo 7

Conclusiones y Trabajos Futuros

En este capítulo, se expondrán las conclusiones obtenidas durante el desarrollo de este trabajo de fin de grado. Estas conclusiones representan una síntesis de los conocimientos adquiridos durante la realización de la investigación, que abarcan tanto la fundamentación teórica necesaria para el desarrollo del trabajo como la propia implementación y los resultados presentados. Además, en una segunda sección, se llevará a cabo un análisis crítico del trabajo desarrollado, utilizando este como punto de partida para proponer futuras mejoras o desarrollos que puedan derivarse de esta investigación.

7.1. Conclusiones

La integración de la tecnología 5G NR destaca la continua evolución del conocimiento y el desarrollo tecnológico aplicado a diversas actividades de la vida cotidiana, especialmente en entornos productivos. Esta integración no hace más que demostrar cómo esta evolución constante ha logrado aumentar la eficiencia, el control y la automatización en dichos entornos, promoviendo una mayor conectividad y eficiencia en la gestión de dispositivos. Los beneficios tangibles obtenidos incluyen mejoras concretas en la producción, la calidad y la reducción de los tiempos de respuesta.

Hasta hace poco, las industrias han hecho uso de la tecnología Wi-Fi para satisfacer sus necesidades de conectividad inalámbrica. Sin embargo, con la llegada del 5G, han surgido las redes público-privadas. Estas son redes públicas que se utilizan como base para desarrollar redes privadas en entornos industriales, proporcionando conectividad de alta velocidad, baja latencia y privacidad. Además, permiten mantener el control de la red interna, lo que permite su configuración y gestión de forma independiente a la red pública.

Un sector que se beneficia enormemente de la integración de esta tecnología es el sector industrial, ya que permite optimizar sus procesos de produc-

ción. Esto se traduce en mayor eficiencia gracias a dispositivos de control que operan con tiempos de respuesta mínimos, la aplicación de Internet de las cosas (IoT), conexiones de alta velocidad, sistemas de conducción autónoma y una mayor interconexión entre los trabajadores.

El desarrollo de las redes público-privadas también ha sido posible gracias al desarrollo e integración de la tecnología Network Slicing en 5G. Posibilita la prestación de servicios diferenciados como el caso de los slice eMBB y URLLC.

Las demandas de requisitos estrictos, impulsadas por el surgimiento de redes privadas en casos de uso como la industria 4.0, hacen necesario el desarrollo de una herramienta de simulación. Esta herramienta integra modelos de canal, modelos de tráfico y modelos de radio con el fin de crear un escenario sintético que traduzca todos estos requisitos a recursos radioeléctricos. A este escenario se le aplica un algoritmo de planificación de recursos de manera que se pueda observar la respuesta del mismo ante la asignación de recursos, obteniendo resultados en términos de calidad de servicio.

El algoritmo de planificación permite realizar un análisis previo de las necesidades de recursos radioeléctricos que requerirá un entorno industrial en función de la cantidad y tipo de conexiones presentes, así como la infraestructura propia. Esto proporciona una herramienta valiosa para evaluar los costos económicos de la infraestructura de red radioeléctrica al momento de implantar nuevos sistemas de producción. El algoritmo no solo optimiza la asignación de recursos, sino que también permite una planificación más eficiente y una toma de decisiones informada en la implementación de tecnología 5G en la industria 4.0.

El corto tiempo de ejecución posibilita la simulación de numerosos escenarios, lo que a su vez brinda la oportunidad de configurar diversas infraestructuras industriales.

Además, posibilita la realización de auditorías en empresas con el fin de evaluar el estado actual de su infraestructura de red. Esto permite obtener un conocimiento minucioso tanto de la calidad de servicio como de la asignación de recursos en su red privada. Por ejemplo, según los recursos disponibles en la red en el momento actual, se pueden considerar la implementación de nuevos sistemas que requieran servicios con requisitos específicos.

Según los resultados obtenidos mediante el algoritmo de planificación en el capítulo 6, se observa que el slice eMBB requiere un mayor número de recursos en comparación con URLLC, de acuerdo con las necesidades de los dispositivos UEs. Esta diferencia se refleja claramente en la Figura 6.2, donde se muestra la evolución de los ratios de calidad, que se utilizan como variables de decisión para asignar recursos. En el caso de URLLC, es más sensible a la asignación de recursos, ya que incluso con una asignación mínima de RB, su valor de ratio disminuye. Por otro lado, para eMBB se requiere una asignación de un mayor número de RBs para lograr una disminución significativa en el valor del ratio.

Además, se hace evidente la necesidad de repetir el proceso de asignación de recursos en un escenario donde las celdas vecinas operan en la misma frecuencia de portadora, lo que puede causar interferencias que afectan directamente a las variables clave de calidad, según los modelos de calidad de canal utilizados. Este proceso debe repetirse hasta que los valores de calidad se estabilicen, y en nuestro caso, esto se logra después de aproximadamente 8 iteraciones.

Se destaca cómo un mayor ancho de banda asignado a una femtocelda resulta en una disminución de la necesidad de recursos proporcionados por la red pública. En otras palabras, a medida que el ancho de banda de la femtocelda aumenta, se dispone de más recursos para asignar a los slices configurados, reduciendo así la necesidad de recursos externos, como en el caso presentado en la Figura 6.8, donde un ancho de banda de 30 MHz no requirió la contribución de recursos de la red pública.

7.2. Trabajos futuros

En esta sección, se presentan posibles mejoras y nuevas líneas de trabajo que tienen el potencial de enriquecer y agregar valor al trabajo realizado hasta el momento.

Una posible mejora sería la incorporación de un coste asociado al ancho de banda en el planificador de recursos. De esta manera, además de considerar los recursos necesarios, se podría evaluar el coste total de asignar esos recursos, lo que permitiría tomar decisiones más informadas.

Otra área de mejora podría centrarse en la asignación de recursos, introduciendo diferentes variables de decisión o estrategias de asignación más eficientes. Esto podría llevar a una asignación mejorada de recursos en función de las necesidades específicas de cada servicio.

La implementación del código de la herramienta de simulación también podría mejorarse con el objetivo de reducir el consumo computacional y el tiempo de ejecución. Esto podría lograrse mediante la optimización de algoritmos o la paralelización de procesos, lo que aceleraría significativamente la simulación.

Además, sería beneficioso agregar nuevos modelos a la herramienta para que pueda contemplar servicios emergentes como mMTC. Esto permitiría evaluar cómo la red responde a las demandas de servicios futuros.

También sería relevante considerar recursos de naturaleza diferente en el simulador, como los recursos computacionales de las CUs y las unidades DUs. Estos recursos desempeñan un papel crítico en la implementación eficiente de redes públicas-privadas y deben ser tenidos en cuenta.

Por último, se podría aplicar modelos más complejos y precisos en la planificación de recursos para obtener resultados más realistas. Por ejemplo, en el caso de servicios eMBB, podría considerarse el fenómeno de fast-fading

que causa rápidas fluctuaciones en la amplitud y fase de la señal debido durante el viaje del emisor al receptor o la movilidad de los usuarios dentro del entorno. Asimismo, en el modelo de retardo, podría incorporarse la posibilidad de que un pequeño porcentaje de los paquetes experimente retardo, lo que sería más representativo de situaciones de la vida real.

Estas posibles mejoras y nuevas líneas de trabajo pueden contribuir significativamente a perfeccionar la planificación de recursos y la simulación de redes públicas-privadas, lo que en última instancia mejoraría la eficiencia y la calidad de los servicios ofrecidos en estos entornos.

Bibliografía

- [1] Ericsson, “Ericsson mobility report,” ., JUN 2023. [Online]. Available: <https://www.ericsson.com/49dd9d/assets/local/reports-papers/mobilityreport/documents/2023/ericsson-mobility-report-june-2023.pdf>
- [2] T. TELECOM, “Tucana,” ., 2021, 15/07/2023. [Online]. Available: <https://www.tucana.com>
- [3] H. Remmert, “¿qué es la arquitectura de red 5g?” ., MAR 2021, uRL: <https://es.digi.com/blog/post/5g-network-architecture>.
- [4] O. Adamuz-Hinojosa, P. Muñoz, P. Ameigeiras, and J. M. Lopez-Soler, “Sharing gnb components in ran slicing: A perspective from 3gpp/nfv standards,” ., pp. 1–7, 2019.
- [5] ShareTechnote, “5g/nr frame structure,” ., Sept 2018, uRL: https://www.sharetechnote.com/html/5G/5G_FrameStructure.html#RadioFrame_Structure_SlotConfig0_u_5.
- [6] X. Li, M. Samaka, H. A. Chan, D. Bhamare, L. Gupta, C. Guo, and R. Jain, “Network slicing for 5g: Challenges and opportunities,” ., vol. 21, no. 5, pp. 20–27, 2017.
- [7] J. Ordóñez-Lucena, P. Ameigeiras, L. Contreras, J. Folgueira, and D. López, “Sobre el despliegue del corte de red en redes de operadores: un radar tecnológico,” ., vol. 21, no. 23, p. 8094, Dec 2021.
- [8] THE3G4GBLOG, “Non-public networks (nbn) - private networks by another name,” ., May 2019, uRL: <https://blog.3g4g.co.uk/2019/05/non-public-networks-nbn-private.html>.
- [9] O. Adamuz-Hinojosa, P. Ameigeiras, P. Muñoz, and J. M. Lopez-Soler, “Analytical model for the ue blocking probability in an ofdma cell providing gbr slices,” ., pp. 1–7, 2021.
- [10] 3GPP, “Etsi ts 138 101-1 v17.6 table 5.3.2-1: Maximum transmission bandwidth configuration nrb : Fr1,” ., Ago 2022.

- [11] R. Adeva, “Telefonía 5g: qué es, ventajas y cobertura en españa – comparativa 4g vs 5g,” ., MAY 2022. [Online]. Available: <https://www.adslzone.net/reportajes/telefonía/5g/>
- [12] ITU, “Qoe factors for new services in 5g networks,” ., Mar 2018. [Online]. Available: https://www.itu.int/itu-t/workprog/wp_item.aspx?isn=14680
- [13] R. Trivisonno, R. Guerzoni, I. Vaishnavi, and D. Soldani, “Sdn-based 5g mobile networks: architecture, functions, procedures and backward compatibility,” ., vol. 26, no. 1, pp. 82–92, 2015. [Online]. Available: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/ett.2915>
- [14] C. Bouras, A. Kollia, and A. Papazois, “Sdn & nfv in 5g: Advancements and challenges,” ., vol. ., no. ., pp. 107–111, 2017.
- [15] B. Li, Z. Li, F. Chen, H. Zhou, Y. Wang, J. Zhou, and W. Hou, “Research on the requirements and deployment of 5g mec in power grid applications,” ., vol. 2, pp. 351–355, 2021.
- [16] UNIR, “La industria 4.0, la transformación digital de las organizaciones industriales,” ., FEB 2021, uRL:<https://www.unir.net/ingenieria/revista/que-es-industria-4-0/>.
- [17] J. García-Morales, M. C. Lucas-Estañ, and J. Gozalvez, “Latency-based 5g ran slicing descriptor to support deterministic industry 4.0 applications,” ., pp. 1359–1362, 2019.
- [18] C. de comercio de Valencia, “Caminar con éxito hacia la industria 4.0: Capítulo 11 – infraestructuras (i) redes inalámbricas,” ., MAY 2020, uRL:<https://ticnegocios.camaravalencia.com/servicios/tendencias/caminar-con-exito-hacia-la-industria-4-0-capitulo-11-infraestructuras-i-redes-inalambricas/>.
- [19] C. M. S. Jose Antonio Moran, “El espectro radioeléctrico como recurso limitado,” ., MAR 2022. [Online]. Available: <https://blogs.uoc.edu/informatica/espectro-radioelectrico-recurso-limitado/>
- [20] P. C. y Multimedia S.L.U, “Pccomponentes,” <https://www.pccomponentes.com/>, 2023.
- [21] T. M. S.l., “Mathworks,” https://es.mathworks.com/store/link/products/student/new?s_iid=htb_buy_gtwy_cta3, 2023.
- [22] Tuslario.es, “Ingenieros en telecomunicaciones,” 2023. [Online]. Available: <https://tusalario.es/>
- [23] 3GPP, “Ts 23.501 system architecture for the 5g system (5gs),” ., Mar 2020.

-
- [24] Techplayon, “5g reference network architecture,” <https://www.techplayon.com/5g-reference-network-architecture/>, May 2017, uRL: <https://www.techplayon.com/5g-reference-network-architecture/>.
- [25] 3GPP, “Ts 138 300nr and ng-ran overall description,” , ENE 2021.
- [26] R. Schmidt and N. Nikaein, “Motor ran: Ran orientada a servicios a través de microservicios en contenedores,” , vol. 18, no. 1, pp. 469–481, 2021.
- [27] L. Larsen, A. Checko, and H. Christiansen, “A survey of the functional splits proposed for 5g mobile crosshaul networks,” , vol. 21, pp. 146–172, 2019.
- [28] 3GPP, “Ts 38.101-1user equipment (ue) radio transmission and reception (release 15),” , oct 2018.
- [29] G. T. 38.101-2, “User equipment (ue) radio transmission and reception (release 15),” , oct 2018.
- [30] G. T. 38.211, “Physical channels and modulation (release 16),” , Jul 2020.
- [31] A. Gholami, N. Torkzaban, and J. S. Baras, “Mobile network slicing under demand uncertainty: A stochastic programming approach,” , pp. 272–276, 2023.
- [32] S. Zhang, “An overview of network slicing for 5g,” , vol. 26, no. 3, pp. 111–117, 2019.
- [33] 3GPP, “Ts 28.541management and orchestration; 5g network resource model (nrm);,” , oct 2019.
- [34] G. AMERICAS, “New services and applications with 5g ultra-reliable low latency communications,” , Nov 2018.
- [35] J. Prados-Garzon, P. Ameigeiras, J. Ordonez-Lucena, P. Muñoz, O. Adamuz-Hinojosa, and D. Camps-Mur, “5g non-public networks: Standardization, architectures and challenges,” , vol. 9, 2021.
- [36] C. Europea, “Usos del espectro radioeléctrico,” <https://digital-strategy.ec.europa.eu/es/policies/uses-radio-spectrum#ecl-inpage-ky1llra8>, May 2022, uRL: <https://digital-strategy.ec.europa.eu/es/policies/uses-radio-spectrum#ecl-inpage-ky1llra8>.
- [37] J. D. Lacasa, “La futura oferta de espectro se empieza a construir ahora,” , Feb 2023.
- [38] T. S. Rappaport, “Wireless communications: Principles and practice,” , 2002.

-
- [39] L. Chinchilla-Romero, J. Prados-Garzon, P. Muñoz, P. Ameigeiras, and J. M. Lopez-Soler, “Ullc achieved data rate through exploiting multi-connectivity in industrial private 5g networks with multi-wat rans,” *„*, pp. 1–6, 2023.
- [40] J. Tang, B. Shim, and T. Q. S. Quek, “Service multiplexing and revenue maximization in sliced c-ran incorporated with ullc and multicast embb,” *„*, vol. 37, no. 4, pp. 881–895, 2019.
- [41] S. Schiessl, H. Al-Zubaidy, M. Skoglund, and J. Gross, “Delay performance of wireless communications with imperfect csi and finite-length coding,” *„*, vol. 66, no. 12, pp. 6527–6541, 2018.
- [42] H. Alshaer and H. Haas, “Sdn-enabled li-fi/wi-fi wireless medium access technologies integration framework,” pp. 1–6, 2016.
- [43] J. Prados-Garzon, L. Chinchilla-Romero, P. Ameigeiras, P. Muñoz, and J. M. Lopez-Soler, “Red asíncrona sensible al tiempo para redes industriales,” *„*, pp. 130–135, 2021.
- [44] 3GPP, “Ts 122.104. service requirements for cyber-physical control applications in vertical domains,” *„*, MAY 2022.
- [45] “3gpp tr-126.928. extended reality (xr) in 5g,” *„*, Ene 2021.

Apéndice A

Código herramienta de simulación

```
1 %% VARIABLES %%
2 %
3 % Rb: inidce de la matriz RAN.
4 % Rb_max: longitud del array RAN que nos da el numero
   de RBs para una
5 % fentocelda i.
6 % Pb: Probabilidad de bloqueo para unos parametros
   determinados.
7 % Pb_umbral: Probabilidad de bloqueo maxima requerida
   .
8 % D: Dealy para unos parametros determiandos.
9 % D_umbral: Delay maxima requerida.
10 % th_GBR:(scalar): GBR Throughput para un usuario (
    Mbps)
11 % lambda: (scalar): Tasa de usuarios activando una
    sesion.
12 % mu:(scalar) Tasa de usuarios servidos.
13 % Rmax:(scalar) Maximo numero de RBs para en la celda
    .
14 % SE(array): (vector): Rangos de eficiencia espectral
    que un usuario puede percibir en una celda,
15 % es decir, depende del SINR. Cada rango se percibe
    en una region especifica. Los rangos de eficiencia
16 % espectral deben ordenarse de menor a mayor.
17 % cp(array): Probabilidades de que un usuario inicie
    una sesion con un rango especifico de eficiencia
    espectral.
```

```
18 % El arreglo debe ordenarse de menor a mayor
    probabilidad del rango de menor eficiencia a mayor
    eficiencia.
19 % Tofdm(scalar): Duracion media del simbolo OFDM).
    Depende de la numerologia utilizada en la celda.
20 % RBGsize(scalar): Es el tamaño del Grupo de Bloques
    de Recursos (RBG). Un RBG es la cantidad minima de
    RBs
21 % que se pueden asignar a un UE especifico.
22 % Slice_eMBB= RBs de la macrocelda asignado al Slice
    eMBB.
23 % Slice_URLLC= RBs de la macrocelda asignado al Slice
    URLLC.
24
25 %%%%%%%%% ASIGNACION VALORES MACROCELDA%%%%%%%%
26
27
28 % We define the spectral efficiency for the case with
    15 cqi (NR)
29 SE = [0.1524 0.377 0.877 1.4764 1.914 2.4064 2.7306
    3.3222 3.9024 4.5234 5.115 ...
30     5.5544 6.2264 6.9072 7.4064];
31
32 % We define the throughput for a user:
33 th_GBR = 5*10^6; % 10 Mbps
34 lambda = 20;
35 mu = 1;
36 RBGsize = 4; % We assume BWP size <= 36 RBs and
    Config. 2
37 BW=180*10^3; % Mhz ancho de banda asigando a urrlc
38 num_RB=106;
39 Slice_eMBB= 2;
40 Slice_URLLC= 1;
41 %%%%%%%%% Escenario %%%%%%%%%
42 Nmacro=1;
43 Nfemto=4;
44 Nslice=2;
45 %%%%%%%%% INICIALIZACION MACROCELDA
    %%%%%%%%%
46 %addpath('C:\Users\placi\Dropbox\TELECO\granada\TFG\
    IN_PROGES\MODELO_OPTIMIZACION\MODELO_MACRO_FEMTO ')
    ;
47 cd ./MODELO_MACRO_FEMTO
48
```

```
49 load('Data.mat', 'slices');
50 load('Data.mat', 'cells');
51 load('Data.mat', 'RAN');
52 for i=1:Nmacro+Nfemto % RAN3 va a ser el GRID de
    recursos general los primero son los macros.
53     RAN3.SlicePRBGs(i,:)= RAN.SlicePRBGs(1,:);
54     RAN3.AllocatedPRBGs(i,:)= RAN.AllocatedPRBGs(1,:)
        ;
55 end
56 RAN3.AllocatedPRBGs(:,1:2)=1;
57 RAN3.SlicePRBGs(:,1)=1;
58 RAN3.SlicePRBGs(:,2)=2;
59 slices1=slices;
60 cells1=cells;
61
62
63 RAN2=RAN_FEMTO_EMBB(RAN3,Nfemto,Nmacro);
64 Macro_se= Black_Box(RAN2,slices1,cells1);
65 cd ..
66 SEo= Macro_se.SE_cells;
67 cpo= Macro_se.pdf_cells;
68 prob=Macro_se.UEProbCell;
69
70 %%%%%%%%% ELIMINAMOS LAS COLUMNAS IGUAL A CERO
    %%%%%%%%%
71
72
73 col_no_cero = any(SEo ~= 0, 1);
74 SE1 = SEo(:, col_no_cero);
75 col_no_cero = any(cpo ~= 0, 1);
76 cp1 = cpo(:, col_no_cero)
77 Rmax=sum(RAN3.SlicePRBGs(2,:)==2);
78 cd ./MODELO_BLOQUEO
79 Pb = GBRCeIlCapacityModel(th_GBR,lambda*prob(1),mu,
    Rmax,SE1(1,:),cp1(1,:),Tofdm,RBGsize);
80 cd ..
81
82 %%%%%%%%% INICIALIZACION FEMTOCELDA
    %%%%%%%%%
83
84 cd ./MODELO_FEMTOCELDA3.2
85 [SINR1,serv_bs,SINR_UE]=main_femto(RAN3,10);
86 cd ..
87 E=0.001
```

```
88 GBR= 1.55*10^6; % bitrate para urrlce
89 Psize= 2*10^3; % tamaño maximo de los paquetes valor
    de prueba
90
91 Nfemto=4;
92 Rb_max=num_RB;
93 Pb_umbral=0.05;
94 D_umbral=0.05;
95 %%%%%%%%%%%CALUCLO INICIAL PB Y DELAY
96
97 serv=buscar_valor(serv_bs,2);
98 serv(:,2)=zeros(size(serv,1),1);
99 serv(:,3)=zeros(size(serv,1),1);
100 nbs=2;
101 Service = resource_delay(SINR1,RAN3,serv,nbs,BW,E,GBR
    ,Psize,D_umbral);
102 n_delay_in=contar_valor_rango(Service(:,3),0,D_umbral
    );
103 Pb_UE_delayn =((size(Service,1)-n_delay_in)/size(
    Service,1));
104 %%%%%%%%%%% ALGORITMO OPTIMIZACION RECURSOS
    %%%%%%%%%%%
105
106 Nfemto=4;
107 Nmacro=1;
108 Pb_umbral=0.050;
109 D_umbral=0.001;
110 PDelay= 0.05;
111 Ratio_Pb=0;
112 Ratio_Delay=0;
113
114
115
116 %%%%%%%%%%%
117 result=struct();
118 result.Delay=zeros(Nfemto,1);
119 result.Pb=zeros(Nfemto,1);
120 num_stp=50;
121 Time_femto=zeros(num_stp,1);
122
123 for k=1:num_stp
124
125     tic;
126
```

```
127
128     cd ./MODELO_FEMTOCELDA3.2
129     [SINR1,serv_bs,SINR_UE]=main_femto(RAN3,12);
130     cd ..
131
132
133     cd ./MODELO_MACRO_FEMTO
134     RAN2=RAN_FEMTO_EMBB(RAN3,Nfemto,Nmacro);
135     Macro_se= Black_Box(RAN2,slices1,cells1);
136     cd ..
137     SEo= Macro_se.SE_cells;
138     cpo= Macro_se.pdf_cells;
139     prob=Macro_se.UEProbCell;
140
141     RAN3.AllocatedPRBGs(:,:)=0;
142     RAN3.SlicePRBGs(:,:)=0;
143     RAN3.AllocatedPRBGs(:,1:2)=1;
144     RAN3.SlicePRBGs(:,1)=1;
145     RAN3.SlicePRBGs(:,2)=2;
146
147
148     for i=1:Nfemto
149
150         col_no_cero = any(SEo(i,:) ~= 0,1);
151         SE1 = SEo(i, col_no_cero);
152         col_no_cero = any(cpo(i,:) ~= 0,1);
153         cp1 = cpo(i, col_no_cero);
154         Rmax=sum(RAN3.SlicePRBGs(i+Nmacro,:)==2);
155         cd ./MODELO_BLOQUEO
156         Pb = GBRCellCapacityModel(th_GBR,lambda*prob(
            i),mu,Rmax,SE1,cp1,Tofdm,RBGsize);
157         cd ..
158
159
160         serv=buscar_valor(serv_bs,i+Nmacro);
161         Service(:,:)=0;
162         if isempty(serv)==1
163             Pb_UE_delayn=0;
164         else
165
166             serv(:,2)=zeros(size(serv,1),1);
167             serv(:,3)=zeros(size(serv,1),1);
168             Service=zeros(size(Service));
```

```
169     Service = resource_delay(SINR1,RAN3,serv,
170                             i+Nmacro,BW,E,GBR,Psize,D_umbral);
171     n_delay_in=contar_valor_rango(Service
172                                   (:,3),0,D_umbral);
173     Pb_UE_delayn =((size(Service,1) -
174                   n_delay_in)/size(Service,1));
175
176     end
177     Ratio_Pb=Pb/Pb_umbral;
178     Ratio_Delay=Pb_UE_delayn/PDelay;
179
180     for j=3:size(RAN3.SlicePRBGs,2)
181
182
183         if Ratio_Pb >= Ratio_Delay
184             if Pb > Pb_umbral
185                 if Pb_UE_delayn > PDelay
186                     RAN3.AllocatedPRBGs(i+Nmacro,
187                                           j)=1;
188                     RAN3.SlicePRBGs(i+Nmacro,j)
189                                   =2;
190
191                 elseif Pb_UE_delayn < PDelay
192                     RAN3.AllocatedPRBGs(i+Nmacro,
193                                           j)=1;
194                     RAN3.SlicePRBGs(i+Nmacro,j)
195                                   =2;
196
197                 end
198
199             elseif Pb < Pb_umbral
200
201                 if Pb_UE_delayn > PDelay
202                     RAN3.AllocatedPRBGs(i+Nmacro,
203                                           j)=1;
204                     RAN3.SlicePRBGs(i+Nmacro,j)
205                                   =1;
206
207                 end
208
209             end
210
211         end
212
213     end
```

```
204
205
206     end
207
208     if Ratio_Pb < Ratio_Delay
209
210         if Pb_UE_delayn > PDelay
211             if Pb > Pb_umbral
212                 RAN3.AllocatedPRBGs(i+Nmacro,
213                                     j)=1;
214                 RAN3.SlicePRBGs(i+Nmacro,j)
215                     =1;
216             elseif Pb < Pb_umbral
217                 RAN3.AllocatedPRBGs(i+Nmacro,
218                                     j)=1;
219                 RAN3.SlicePRBGs(i+Nmacro,j)
220                     =1;
221             end
222         elseif Pb_UE_delayn < PDelay
223             if Pb > Pb_umbral
224
225                 RAN3.AllocatedPRBGs(i+Nmacro,
226                                     j)=1;
227                 RAN3.SlicePRBGs(i+Nmacro,j)
228                     =2;
229             end
230         end
231     end
232
233
234
235     Rmax=sum(RAN3.SlicePRBGs(i+Nmacro,:)==2);
236     cd ./MODELO_BLOQUEO
237     Pb = GBRCellCapacityModel(th_GBR,lambda*
238         prob(i),mu,Rmax,SE1,cp1,Tofdm,RBGsize)
239     ;
240     cd ..
```

```
240     serv=buscar_valor(serv_bs,i+Nmacro);
241
242     if isempty(serv)==1
243         Pb_UE_delayn=0;
244     else
245         serv(:,2)=zeros(size(serv,1),1);
246         serv(:,3)=zeros(size(serv,1),1);
247
248         Service= [];
249         Service = resource_delay(SINR1,RAN3,
250             serv,i+Nmacro,BW,E,GBR,Psize,
251             D_umbral);
252         n_delay_in=contar_valor_rango(Service
253             (:,3),0,D_umbral);
254         Pb_UE_delayn =((size(Service,1)-
255             n_delay_in)/size(Service,1));
256     end
257     Ratio_Pb=Pb/Pb_umbral;
258
259     Ratio_Delay=Pb_UE_delayn/PDelay;
260
261     result.ratiopb(i,j)=Ratio_Pb; Ratio_Delay
262     result.ratiod(i,j)= Ratio_Delay;
263 end
264
265 result.Delay(i,k)= Pb_UE_delayn;
266 result.Pb(i,k)= Pb ;
267 result.PRB_URRLC(i,k)=sum(RAN3.SlicePRBGs(i+
268     Nmacro,')==1);
269 result.PRB_eMBB(i,k)=sum(RAN3.SlicePRBGs(i+
270     Nmacro,')==2);
271 result.Service(i).UE(1:size(Service,1),1:size
272     (Service,2))=Service;
273 result.Service(i).UE=[];
274 result.Service(i).UE(1:size(Service,1),1:size
275     (Service,2))=Service;
276 result.lambda_embb(i,k)=lambda*prob(i);
```

```

276
277     end
278     1+1;
279     vector_delay=0;
280     compara=RAN3.AllocatedPRBGs(2:end,:);
281     while sum(compara(:))< 4*num_RB && any(result.
        Delay(:,end) > PDelay) && ~isempty(
        vector_delay)
282         id_no_Del= find(result.Delay(:,end)> PDelay);
283         id_yes_Del=find(sum(RAN3.AllocatedPRBGs(2:end
            ,:),2)<num_RB);
284
285         [~,id_menor1]=max(result.Delay(id_no_Del,end)
            );
286         id_menor=id_no_Del(id_menor1);
287         vector_delay=find(result.Service(id_menor).UE
            (:,3)==0);
288         vector_delay_id=(result.Service(id_menor).UE(
            vector_delay,1));
289         id_femto1=find(max(SINR_UE(id_yes_Del+Nmacro,
            vector_delay_id(end))));%~= result.Delay(
            id_no_Del,end));
290         id_femto=id_yes_Del(id_femto1)+Nmacro;
291         serv_bs( vector_delay_id(end))=id_femto;
292         Pb_UE_delayn1=1;
293
294         while sum(RAN3.AllocatedPRBGs(id_femto,:))<
            num_RB && Pb_UE_delayn1 ~= 0
295             cero=find( RAN3.AllocatedPRBGs(id_femto
                ,:)==0,1);
296             serv(:)=0;
297             RAN3.AllocatedPRBGs(id_femto,cero)=1;
298             RAN3.SlicePRBGs(id_femto,cero)=1;
299             serv=buscar_valor(serv_bs,id_femto);
300             serv(:,2)=zeros(size(serv,1),1);
301             serv(:,3)=zeros(size(serv,1),1);
302             Service= [];
303
304             Service = resource_delay(SINR1,RAN3,serv,
                id_femto,BW,E,GBR,Psize,D_umbral);
305             n_delay_in=contar_valor_rango(Service
                (:,3),0,D_umbral);
306             Pb_UE_delayn1 =((size(Service,1)-
                n_delay_in)/size(Service,1));

```

```

307         result.Delay(end, id_femto - Nmacro) =
            Pb_UE_delayn1;
308         result.Service(id_femto - Nmacro).UE = [];
309         result.Service(id_femto - Nmacro).UE(1:size
            (Service, 1), 1:size(Service, 2)) = Service
            ;
310     end
311     serv(:) = 0;
312     serv = buscar_valor(serv_bs, id_menor + Nmacro);
313     serv(:, 2) = zeros(size(serv, 1), 1);
314     serv(:, 3) = zeros(size(serv, 1), 1);
315     Service = [];
316     Service = resource_delay(SINR1, RAN3, serv,
            id_menor + Nmacro, BW, E, GBR, Psize, D_umbral);
317     n_delay_in = contar_valor_rango(Service(:, 3), 0,
            D_umbral);
318     Pb_UE_delayn = ((size(Service, 1) - n_delay_in) /
            size(Service, 1));
319     result.Delay(end, id_menor) = Pb_UE_delayn;
320     result.Service(id_menor).UE = [];
321     result.Service(id_menor).UE(1:size(Service, 1)
            , 1:size(Service, 2)) = Service;
322     if result.Service(id_menor).UE(end, 1) == 0
323         result.Service(id_menor).UE(end, :) = [];
324     end
325     compara = RAN3.AllocatedPRBGs(2:end, :);
326     vector_delay = find(result.Service(id_menor).UE
            (:, 3) == 0);
327     end
328     result.PRB_Total(k) = sum(compara(:));
329     result.PB_Total(k) = sum(result.Pb(:, end) .* prob(:)
            )
330     n_delay_in = 0;
331     for m = 1:Nfemto
332         n_delay_in = n_delay_in + contar_valor_rango(
            result.Service(m).UE(:, 3), 0, D_umbral);
333         result.num_UE_URLLC(m + Nmacro, k) = sum(serv_bs ==
            m + Nmacro);
334         result.num_UE_URLLC_in(m, k) =
            contar_valor_rango(result.Service(m).UE
            (:, 3), 0, D_umbral);
335     end
336     result.Delay_Total(k) = (size(serv_bs, 1) -
            n_delay_in) / size(serv_bs, 1);

```

```
337     Time_femto(k)=toc;
338
339
340 end
341 result.Time_femto=Time_femto;
342
343 serv1B=buscar_valor(serv_bs ,Nmacro);
344 for j=1:size(serv1B,1)
345     for i=1:4
346         idc(i)=sum(RAN3.AllocatedPRBGs(i+Nmacro,:)
347                 ==1);
348     end
349     [~, indiceMenor] = min(idc);
350
351     if sum(RAN3.AllocatedPRBGs(indiceMenor+Nmacro,:))
352         <num_RB
353
354         serv_bs(serv1B(j))=indiceMenor+Nmacro;
355         cero=find( RAN3.AllocatedPRBGs(indiceMenor+
356             Nmacro ,:)==0,1);
357         serv=buscar_valor(serv_bs ,indiceMenor+Nmacro)
358             ;
359         serv(:,2)=zeros(size(serv,1),1);
360         serv(:,3)=zeros(size(serv,1),1);
361         Service = resource_delay(SINR1,RAN3,serv ,
362             indiceMenor+Nmacro ,BW,E,GBR,Psize,D_umbral
363             );
364         n_delay_in=contar_valor_rango(Service(:,3),0,
365             D_umbral);
366         Pb_UE_delayn =((size(Service,1)-n_delay_in)/
367             size(Service,1));
368
369         while Pb_UE_delayn > 0.05 && sum(RAN3.
370             AllocatedPRBGs(indiceMenor+Nmacro ,:)==1) <
371             num_RB
372
373             cero=find( RAN3.AllocatedPRBGs (
374                 indiceMenor+Nmacro ,:)==0,1);
375             RAN3.AllocatedPRBGs(indiceMenor+Nmacro ,
376                 cero)=1;
377             RAN3.SlicePRBGs(indiceMenor+Nmacro ,cero)
378                 =1;
379             serv=buscar_valor(serv_bs ,indiceMenor+
380                 Nmacro);
```

```

367         serv(:,2)=zeros(size(serv,1),1);
368         serv(:,3)=zeros(size(serv,1),1);
369         Service = resource_delay(SINR1,RAN3,serv,
            indiceMenor+Nmacro,BW,E,GBR,Psize,
            D_umbral);
370         n_delay_in=contar_valor_rango(Service
            (:,3),0,D_umbral);
371         Pb_UE_delayn =((size(Service,1)-
            n_delay_in)/size(Service,1));
372
373     end
374
375
376     result.Delay(indiceMenor,end)= Pb_UE_delayn;
377
378     result.PRB_URRLC(indiceMenor,end)=sum(RAN3.
        SlicePRBGs(indiceMenor+Nmacro,')==1);
379     result.PRB_eMBB(indiceMenor,end)=sum(RAN3.
        SlicePRBGs(indiceMenor+Nmacro,')==2);
380     result.Service(indiceMenor).UE(1:size(Service
        ,1),1:size(Service,2))=Service;
381
382
383     end
384 end
385 % Disminuye el trafico del Slice femto que hasta
        conseguir que Pb llegue
386 % hasta el umbral de tal con todas las femto luego
        ese trafico se anade a
387 % la macro celda en fomra de lambda.
388 tic;
389 if max(result.Pb(:,end)) > Pb_umbral
390     id_fem=find(result.Pb(:,end) > Pb_umbral );
391     Pb_fem=result.Pb;
392     dif_lambda= zeros(size(id_fem));
393     New_lambda=0;
394     for i=1:size(id_fem,1)
395
396
397         SEo= Macro_se.SE_cells;
398         cpo= Macro_se.pdf_cells;
399         col_no_cero = any(SEo(id_fem(i),:) ~= 0,1);
400         SE1 = SEo(id_fem(i), col_no_cero);
401         col_no_cero = any(cpo(id_fem(i),:) ~= 0,1);

```

```
402         cp1 = cpo(id_fem(i), col_no_cero);
403
404         Rmax=sum(RAN3.SlicePRBGs(id_fem(i)+Nmacro,:)
405                 ==2);
406
407         cd ./MODELO_BLOQUEO
408
409         Pb = GBRCellCapacityModel(th_GBR, lambda*prob(
410             id_fem(i)), mu, Rmax, SE1, cp1, Tofdm, RBGsize);
411
412         cd ..
413         New_lambda= lambda*prob(id_fem(i));
414
415         while Pb > Pb_umbral
416
417             New_lambda= New_lambda - 0.1;
418
419             cd ./MODELO_BLOQUEO
420
421             Pb = GBRCellCapacityModel(th_GBR,
422                 New_lambda, mu, Rmax, SE1, cp1, Tofdm,
423                 RBGsize);
424
425             cd ..
426         end
427         result.lambda_embb(id_fem(i), num_stp+1)=
428             New_lambda;
429         dif_lambda(i)= lambda*prob(id_fem(i))-
430             New_lambda;
431         result.Pb(id_fem, num_stp+1)=Pb;
432     end
433     lambda_Mac=sum(dif_lambda);
434 else
435     lambda_Mac=0;
436 end
437 flag=0;
438 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
439
440 if max(result.Delay(:,end))> PDelay)
441
442     id_no_Del= find(result.Delay(:,end)> PDelay);
443     for i=1:size(id_no_Del)
```

```
440     id_UE=find(result.Service(id_no_Del(i)).UE
441             (:,3)==0);
442     val_id_UE=result.Service(id_no_Del(i)).UE(
443             id_UE,1);
444     serv_bs(val_id_UE)= 1;
445     result.Service(id_no_Del(i)).UE(id_UE,:)=[];
446
447     n_delay_in=contar_valor_rango(result.Service(
448             id_no_Del(i)).UE(:,3),0,D_umbral);
449     Pb_UE_delayn =((size(result.Service(id_no_Del
450             (i)).UE,1)-n_delay_in)/size(result.Service
451             (id_no_Del(i)).UE,1));
452     result.Delay(id_no_Del(i),num_stp + 1)=
453             Pb_UE_delayn;
454     end
455     flag=1;
456 end
457
458 cd ./MODELO_MACROCELDA
459 load('Data.mat', 'slices');
460 load('Data.mat', 'cells');
461 load('Data.mat', 'RAN');
462 slicesM=slices;
463 cellsM=cells;
464 RANM=RAN_MACRO_EMBB(RAN3,Nmacro);
465 RAN.AllocatedPRBGs(7,:)= RANM.AllocatedPRBGs(1,:);
466 Macro_se1= Black_Box(RAN,slicesM,cellsM);
467 cd ..
468
469 cpm=Macro_se1.pdf_cells;
470 SEM=Macro_se1.SE_cells;
471 col_no_cero = any(SEM(7,:) ~= 0,1);
472 SEM = SEM(7, col_no_cero);
473 col_no_cero = any(cpm(7,:) ~= 0,1);
474 cpM = cpm(7, col_no_cero);
475 Rmax=sum(RAN3.SlicePRBGs(Nmacro,')==2);
476 cd ./MODELO_BLOQUEO
477 PbM = GBRCeIlCapacityModel(th_GBR,lambda_Mac,mu,Rmax,
478     SEM,cpM,Tofdm,RBGsize);
479 cd ..
```

```

477 if flag==1
478     serv_Bs=buscar_valor(serv_bs,Nmacro);
479     serv_Bs1= [serv_Bs];
480     serv_Bs1(:,2)=zeros(size(serv_Bs1,1),1);
481     serv_Bs1(:,3)=zeros(size(serv_Bs1,1),1);
482     Service_M= resource_delay(SINR1,RAN3,serv_Bs1,
        Nmacro,BW,E,GBR,Psize,D_umbral);
483     n_delay_in=contar_valor_rango(Service_M(:,3),0,
        D_umbral);
484     PbM_UE_delayn =((size(Service_M,1)-n_delay_in)/
        size(Service_M,1));
485 else
486     PbM_UE_delayn=0;
487     Service_M=0;
488 end
489
490 if lambda_Mac > 0 || flag==1
491     for y=3:size(RAN3.SlicePRBGs,2)
492
493         serv_Bs1(:,2)=zeros(size(serv_Bs1,1),1);
494         serv_Bs1(:,3)=zeros(size(serv_Bs1,1),1);
495         Service_M= resource_delay(SINR1,RAN3,serv_Bs1
            ,Nmacro,BW,E,GBR,Psize,D_umbral);
496         n_delay_in=contar_valor_rango(Service_M(:,3)
            ,0,D_umbral);
497         PbM_UE_delayn =((size(Service_M,1)-n_delay_in
            )/size(Service_M,1));
498
499         cd ./MODELO_MACROCELDA
500         RANM=RAN_MACRO_EMBB(RAN3,Nmacro);
501         RAN.AllocatedPRBGs(7,:)= RANM.AllocatedPRBGs
            (1,:);
502         Macro_se1= Black_Box(RAN,slicesM,cellsM);
503         cd ..
504         cpm=Macro_se1.pdf_cells;
505         SEM=Macro_se1.SE_cells;
506         col_no_cero = any(SEM(7,:) ~= 0,1);
507         SEM = SEM(7, col_no_cero);
508         col_no_cero = any(cpm(7,:) ~= 0,1);
509         cpM = cpm(7, col_no_cero);
510         Rmax=sum(RAN3.SlicePRBGs(Nmacro,')==2);
511         cd ./MODELO_BLOQUEO
512         PbM = GBRCellCapacityModel(th_GBR,lambda_Mac,
            mu,Rmax,SEM,cpM,Tofdm,RBGsize);

```

```
513         cd ..
514         on=0;
515         if lambda_Mac==0
516             PbM= 0;
517         end
518
519         if flag==0
520
521             PbM_UE_delayn=0;
522         end
523
524
525         Ratio_PbM=PbM/Pb_umbral;
526
527         Ratio_DelayM=PbM_UE_delayn/PDelay;
528
529         if PbM > Pb_umbral && Ratio_PbM >=
530             Ratio_DelayM && lambda_Mac > 0
531
532             RAN3.AllocatedPRBGs(Nmacro,y)=1;
533             RAN3.SlicePRBGs(Nmacro,y)=2;
534
535
536         elseif PbM_UE_delayn > 0.05 && Ratio_PbM <
537             Ratio_DelayM && flag==1
538
539             RAN3.AllocatedPRBGs(Nmacro,y)=1;
540             RAN3.SlicePRBGs(Nmacro,y)=1;
541         end
542
543     end
544     result.Time_Macro=toc;
545
546     result.PRB_Total(end+1)= sum(RAN3.AllocatedPRBGs
547         ());
548     if lambda_Mac==0
549         result.PB_Total(end+1)= sum(result.Pb(:,end)
550             .*prob(:));
551     else
552         result.PB_Total(end+1)= sum(result.Pb(:,end)
553             .*prob(:))+ (lambda/lambda_Mac)*PbM;
554     end
```

```
552
553     result.Delay_Total(end+1)= (size(Service_M,1)-
        n_delay_in)/size(serv_bs,1);
554 end
555 for k=1:Nfemto+Nmacro
556     result.UE_final_URRLC(k)=sum(serv_bs==k);
557 end
558 result.M_Pb=PbM;
559 result.M_Delay=PbM_UE_delayn;
560 result.AllocatedPRBGs=RAN3.AllocatedPRBGs;
561 result.SlicePRBGs=RAN3.SlicePRBGs;
562 result.M_Service=Service_M;
563 result.Mlambda=lambda_Mac;
564
565 save('result.mat', 'result');
566 result.Time_Total=toc;
```